

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DANIEL DA SILVA GAZZANA

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE ANÁLISE DE
ATERRAMENTO IMPULSIVO E EM ALTAS FREQUÊNCIAS
ASSOCIADO À AVALIAÇÃO DA SUPORTABILIDADE DOS
SERES HUMANOS COM BASE NO MÉTODO DA
MODELAGEM POR LINHAS DE TRANSMISSÃO (TLM)**

Porto Alegre

2012

DANIEL DA SILVA GAZZANA

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE ANÁLISE DE
ATERRAMENTO IMPULSIVO E EM ALTAS FREQUÊNCIAS
ASSOCIADO À AVALIAÇÃO DA SUPORTABILIDADE DOS
SERES HUMANOS COM BASE NO MÉTODO DA
MODELAGEM POR LINHAS DE TRANSMISSÃO (TLM)**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Energia

ORIENTADOR: Prof. Dr. Arturo Suman Bretas

COORIENTADOR: Prof. Dr. Marcos Telló

Porto Alegre

2012

CIP - Catalogação na Publicação

Gazzana, Daniel da Silva

Contribuição ao Estudo de Análise de Aterramento Impulsivo e em Altas Frequências Associado à Avaliação da Suportabilidade dos Seres Humanos com Base no Método da Modelagem por Linhas de Transmissão (TLM) / Daniel da Silva Gazzana. -- 2012. 128 f.

Orientador: Arturo Suman Bretas.

Coorientador: Marcos Telló.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Porto Alegre, BRRS, 2012.

1. Aterramento Impulsivo e em Altas Frequências. 2. Ionização do Solo. 3. Método da Modelagem por Linhas de Transmissão. 4. Potencial na Superfície do Solo. 5. Suportabilidade de Seres Humanos. I. Suman Bretas, Arturo, orient. II. Telló, Marcos, coorient. III. Título.

DANIEL DA SILVA GAZZANA

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE ANÁLISE DE
ATERRAMENTO IMPULSIVO E EM ALTAS FREQUÊNCIAS
ASSOCIADO À AVALIAÇÃO DA SUPORTABILIDADE DOS
SERES HUMANOS COM BASE NO MÉTODO DA
MODELAGEM POR LINHAS DE TRANSMISSÃO (TLM)**

Esta Tese de Doutorado foi julgada adequada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Orientador, Coorientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Arturo Suman Bretas, UFRGS

Doutor pela Virginia Tech – Blacksburg, Estados Unidos

Coorientador: _____

Prof. Dr. Marcos Telló, PUCRS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Álvaro Augusto Almeida de Salles, UFRGS

Doutor pela University of London – Londres, Inglaterra

Prof. Dr. Guilherme Alfredo Dentzien Dias, DDias Assessoria Empresarial

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. José Roberto Cardoso, USP

Doutor pela Universidade de São Paulo – São Paulo, Brasil

Prof. Dr. Roberto Chouhy Leborgne, UFRGS

Doutor pela Chalmers University Of Technology - Gotemburgo, Suécia

Prof. Dr. Roberto Petry Homrich, UFRGS

Doutor pela Universidade Estadual de Campinas – Campinas, Brasil

Coordenador do PPGEE: _____

Prof. Dr. João Manoel Gomes da Silva Jr.

Porto Alegre, Julho de 2012.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos aqueles que de alguma maneira contribuíram para a realização desta Tese de Doutorado. Dentre estes, não poderia deixar de citar:

DEUS, por estar sempre ao meu lado dando-me força e perseverança, alimentando minha fé e iluminando meu caminho;

meus orientadores prof. Dr. Arturo Suman Bretas e prof. Dr. Marcos Telló, pelos ensinamentos, por toda a disposição em auxiliar-me sempre que necessário, pela forma profissional de conduzir e orientar esta tese e sobretudo pela confiança depositada em mim;

minha namorada Karina, pelo carinho, paciência, ajuda, compreensão e principalmente por me fazer feliz;

meus pais Elcio e Terezinha, pela lição de vida, por terem formado o meu caráter e por todas as oportunidades que me proporcionaram dentre outras incontáveis razões;

meus irmãos André e Raquel, pelo exemplo de pessoas que são a quem procuro me espelhar;

prof. Dr. Guilherme Alfredo D. Dias, a quem devo boa parte de meu conhecimento;

meus orientadores no exterior prof. Dr. Dave W. P. Thomas e prof. Dr. Christos Christopoulos, pela oportunidade de desenvolver parte da minha pesquisa junto ao *The George Green Institute for Electromagnetics Research* na Universidade de Nottingham;

meu primo Marcos, pelas inúmeras horas de parceria aprimorando meu inglês;

meus colegas de laboratório em especial Daphne, Denise, Diogo, Diomar, Felipe, Gustavo, Hernan, Martin, Mario, Renato, Robert, Roberto e Ubirajara, pelos agradáveis momentos compartilhados;

a CAPES, pela bolsa de estudos propiciando a concretização desta tese;

a Companhia Estadual de Energia Elétrica CEEE-D, pela parceria junto a realização de projeto de P&D.

Sinceramente, muito obrigado.

RESUMO

Este trabalho fundamenta-se no desenvolvimento e aprimoramento de metodologias para a melhor representação do aterramento elétrico sob uma análise transiente. O estudo concentra-se no estabelecimento de contribuições ao estado da arte associadas à análise e modelagem de aterramento impulsivo e em altas frequências. O estudo vincula-se também à avaliação da suportabilidade de seres humanos submetidos a potenciais produzidos na superfície do solo, provenientes da corrente elétrica gerada por um surto atmosférico. A concepção das metodologias propostas baseou-se no uso do Método da Modelagem por Linhas de Transmissão em uma dimensão (TLM-1D). Destacam-se três grandes tópicos da pesquisa. O primeiro concentra-se no desenvolvimento de formulação para a inclusão do fenômeno de ionização do solo ao Método TLM-1D clássico. A formulação desenvolvida tem como característica ser uma técnica generalista, independente das propriedades do meio, dimensões do eletrodo e do surto atmosférico. O segundo foco concentra-se no aprimoramento e desenvolvimento de equacionamento analítico para a estimação de potenciais gerados na superfície do solo, originados pela corrente elétrica estabelecida sobre eletrodo de aterramento. Tal equacionamento tem grande aplicabilidade em conjunto com metodologias numéricas unidimensionais, as quais não são capazes de determinar diretamente os referidos potenciais. Por fim, a realização de estudo de suportabilidade e segurança de seres humanos em contato com eletrodos de aterramento submetidos a surto atmosférico, considerando modelo representativo baseado em circuitos elétricos, consolida o trabalho desenvolvido.

Palavras-chave: Aterramento Impulsivo e em Altas Frequências. Ionização do Solo. Método da Modelagem por Linhas de Transmissão. Potencial na Superfície do Solo. Suportabilidade de Seres Humanos.

ABSTRACT

This work is based on the development and improvement of methodologies for the best representation of the electrical grounding under a transient analysis. The study concentrated on establishing contributions to the state of the art related to the analysis and modeling of impulsive and high frequencies grounding systems. The study is also associated to the evaluation of the supportability of human beings submitted to the potentials produced on the soil surface from the electric current generated by a lightning. The conception of the proposed methodology was based on the Transmission Line Modeling Method in one dimension (TLM-1D). Three major research topics can be highlighted. The first involves the development of a formulation to include the soil ionization phenomenon in the classic TLM-1D algorithm. The developed formulation is a generalist technique, independent of the medium properties, characteristic of the electrode and lightning surge. The second aims at the improvement and development of analytical equations for estimating the generated potential on the soil surface, originated by the electric current calculated in the grounding electrode. Such equationing has great applicability in conjunction with one-dimensional numerical methods which are not able to determine such potential directly. Finally, the achievement of a supportability study and personal safety of humans in contact with the grounding electrodes subjected to a lightning, considering a representative model based on electrical circuits, consolidates the developed work

Keywords: Impulsive and High Frequency Grounding Systems. Potential on the Soil Surface. Soil Ionization. Supportability of Human Beings. Transmission Line Modeling Method.

SUMÁRIO

1. Introdução	17
1.1 Objetivos	17
1.2 Justificativa	18
1.3 Organização da Tese	19
2. Revisão do Estado da Arte	20
2.1 Introdução	20
2.2 Definições Sobre Aterramento Impulsivo.....	21
2.2.1 Fonte de Excitação	21
2.2.2 Características dos Eletrodos e do Meio.....	22
2.2.2.1 Dependência dos Parâmetros do Solo com a Frequência	23
2.2.2.2 O Fenômeno de Ionização do Solo.....	23
2.2.2.3 Impedância de Aterramento.....	25
2.2.3 Equações de Maxwell.....	26
2.3 Metodologias para Análise de Aterramento Impulsivo.....	27
2.3.1 Modelagem por Circuitos.....	27
2.3.2 Modelagem por Linhas de Transmissão.....	28
2.3.3 Modelagem por Campos Eletromagnéticos.....	29
2.3.4 Modelagem Híbrida.....	29
2.4 Métodos Numéricos	30
2.4.1 Método dos Momentos (MoM)	30
2.4.2 Método dos Elementos Finitos (FEM)	31
2.4.3 Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD).....	32
2.4.4 Método da Modelagem por Linhas de Transmissão (TLM).....	32
2.5 Considerações Sobre o Capítulo	34
3. Suportabilidade e Modelagem de Seres Humanos Submetidos a Surto Atmosférico.....	35
3.1 Introdução	35
3.2 Breve Histórico dos Estudos de Suportabilidade	36
3.3 Mecanismo de Danos em Seres Humanos Provocados por Surto Atmosférico.....	37
3.4 Representação e Modelagem do Corpo Humano	38
3.5 Considerações Sobre o Capítulo	42
4. O Método TLM em Uma Dimensão Aplicado a Análise de Aterramento Impulsivo.....	43
4.1 Introdução	43
4.2 Conceituação do Problema.....	43

4.3	Formulação Analítica	44
4.3.1	Cálculo das Tensões e Correntes sobre os Nós	46
4.3.1.1	Primeiro Nó	46
4.3.1.2	Nós Intermediários.....	47
4.3.1.3	Último Nó.....	48
4.3.2	Cálculo dos Elementos do Circuito	48
4.3.3	Cálculo do Comprimento do Segmento de Linha	50
4.3.4	Condições de Contorno	51
4.4	Implementação Numérica	51
4.5	Computação e Resultados	53
4.6	Validação.....	54
4.7	Considerações Sobre o Capítulo	55
5.	Contribuição ao Estudo de Aterramento Impulsivo e Suportabilidade de Seres Humanos	56
5.1	Introdução	56
5.2	Modelagem do Fenômeno de Ionização do Solo	57
5.2.1	Conceituação do Problema	57
5.2.2	Formulação Analítica	61
5.2.3	Implementação Numérica.....	64
5.2.4	Computação e Resultados.....	66
5.2.5	Validação.....	69
5.2.6	Considerações Sobre o Estudo	70
5.3	Estimação de Potencial na Superfície do Solo	71
5.3.1	Conceituação do Problema	71
5.3.2	Formulação Analítica	73
5.3.3	Implementação Numérica.....	76
5.3.4	Computação e Resultados.....	78
5.3.4.1	Identificação da Frequência de Cálculo.....	78
5.3.4.2	Potencial em um Ponto e no Plano xy na Superfície do Solo	78
5.3.5	Validação.....	81
5.3.6	Considerações Sobre o Estudo	83
5.4	Estudo de Suportabilidade em Seres Humanos	84
5.4.1	Conceituação do Problema	84
5.4.2	Caracterização e Parametrização do Modelo.....	87
5.4.3	Implementação Computacional	89
5.4.4	Computação e Resultados.....	90
5.4.5	Validação.....	92
5.4.6	Considerações Sobre o Estudo	94
5.5	Considerações Sobre o Capítulo	94
6.	Estudos de Caso	96

6.1	Introdução	96
6.2	Ionização do Solo	97
6.3	Potencial na Superfície do Solo	101
6.4	Suportabilidade e Segurança Pessoal	105
6.5	Considerações Sobre o Capítulo	109
7.	Conclusões	111
7.1	Modelagem do Fenômeno de Ionização do Solo	112
7.2	Estimação de Potencial na Superfície do Solo	113
7.3	Estudo de Suportabilidade em Seres Humanos	114
7.4	Sugestões para Trabalhos Futuros	114
	Referências	116
	Apêndice – Referências Pessoais	127
	Publicações em Profundidade	127
	Publicações em Abrangência	128

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Surto atmosférico de magnitude 32000A $T_1 = 8 \mu\text{s}$, $T_2 = 20 \mu\text{s}$	22
Figura 2 Geometrias básicas de aterramento.....	22
Figura 3 Caracterização do conjunto meio eletrodo.....	23
Figura 4 Fenômeno de ionização do solo.....	24
Figura 5 Impedância de aterramento.....	25
Figura 6 Resistência convencional de terra de diferentes sistemas de aterramento.....	25
Figura 7 Modelo de circuito proposto por Meliopoulos.....	28
Figura 8 Circuito equivalente.....	28
Figura 9 Propagação de um impulso: (a) impulso incidente; (b) 1ª iteração; (c) 2ª iteração.....	33
Figura 10 Modelo genérico de uma linha de transmissão.....	33
Figura 11 Mapa isoceráunico (GHCC, 2011).....	36
Figura 12 Mecanismo de contato de surto atmosférico em seres humanos.....	38
Figura 13 Modelo do corpo humano (ANDREWS, 2003).....	39
Figura 14 Modelo do corpo humano (MISBAH, 2011).....	41
Figura 15 Conjunto surto atmosférico, solo e eletrodo: (a) contrapeso; (b) haste.....	44
Figura 16 Célula básica de uma linha de transmissão em uma dimensão.....	45
Figura 17 Representação de um condutor de aterramento por segmentos de linha de transmissão: (a) condutor de aterramento; (b) linha de transmissão equivalente....	45
Figura 18 Circuito equivalente de um segmento de linha de transmissão.....	46
Figura 19 Tensões incidentes e refletidas sobre o primeiro nó (Nó 1) para um instante de tempo k	47
Figura 20 Tensões incidentes e refletidas sobre os nós intermediários.....	47
Figura 21 Tensões incidentes e refletidas sobre o último nó.....	48
Figura 22 Fluxograma do algoritmo TLM-1D.	52
Figura 23 Resposta de um condutor de aterramento frente a um surto atmosférico: (a) contrapeso; (b) haste.....	54
Figura 24 Tensão em diferentes pontos de um eletrodo horizontal: (a) resultados de (LORENTZOU, 2003b; AHMAD, 2008a); (b) resultados provenientes no algoritmo desenvolvido.	54
Figura 25 Tensão sobre a origem de um eletrodo: (a) eletrodo vertical considerando dados de (MENTER, 1994); (b) eletrodo horizontal considerando Modelo Eletromagnético (SES, 2006).....	55
Figura 26 Processo irregular de ruptura do solo. Adaptação de (GERI, 1999).....	57
Figura 27 Perfil da variação da resistividade do solo segundo o Modelo de Liew. Adaptação de (LIEW, 1974).....	58

Figura 28 Perfil do incremento do raio de eletrodo na região ionizada segundo Modelo de Velasquez.....	58
Figura 29 Perfil da variação da resistividade do solo segundo o Modelo de Sekioka. Adaptação de (SEKIOKA, 2006).	60
Figura 30 Representação de segmento de linha do Modelo TLM-1D com resistência e condutância variantes no tempo: (a) circuito equivalente; (b) correntes de deslocamento e condução.	61
Figura 31 Fluxograma do algoritmo TLM-1D considerando a ionização do solo.	64
Figura 32 Resposta do aterramento frente a um surto atmosférico considerando o fenômeno de ionização do solo: (a) surto injetado; (b) potencial gerado na origem; (c) impedância de aterramento; (d) campo elétrico na origem.	66
Figura 33 Comportamento dos componentes R e G presentes no Modelo TLM mediante o fenômeno de ionização do solo: (a) variação de R no tempo (nó 1); (b) variação de G no tempo (nó 1).	67
Figura 34 Variação do raio mediante o processo de ionização do solo: (a) aumento do raio efetivo do eletrodo (nó 1); (b) variação uniforme do raio ao longo do comprimento do eletrodo.....	68
Figura 35 Comparação da resposta do aterramento com e sem a presença do fenômeno de ionização do solo: (a) corrente injetada no eletrodo; (b) campo elétrico na origem; (c) potencial gerado na origem; (d) impedância de aterramento.....	69
Figura 36 Comparação entre modelos: (a) surto de corrente; (b) tensão gerada no eletrodo (nó 1).	70
Figura 37 Domínio de estudo em um espaço tridimensional.	72
Figura 38 Representação de um ponto P e um condutor C em um espaço tridimensional S	73
Figura 39 Fluxograma do algoritmo TLM-1D considerando a ionização e estimação de potencial na superfície do solo.	77
Figura 40 Surto de corrente: (a) domínio tempo; (b) domínio frequência.	78
Figura 41 Potencial calculado em um ponto P na superfície do solo considerando diferentes profundidades do eletrodo de aterramento: (a) $h = 1$ m; (b) $h = 0.5$ m; (c) $h = 0.1$ m; (d) $h = 0.01$ m.	79
Figura 42 Domínio de estudo na superfície do solo.	80
Figura 43 Potencial calculado em um perfil na superfície do solo: (a) perfil $p1$; (b) perfil $p2$	80
Figura 44 Superfícies de potencial geradas no solo para diferentes instantes de tempo: (a) primeiros instantes do transitório $t = 0.42$ μ s; (b) $t = 2$ μ s; (c) $t = 4.63$ μ s; (d) $t = 47.3$ μ s.	81
Figura 45 Curvas equipotenciais produzidas na superfície do solo em $t = 4.1$ μ s.....	81
Figura 46 Comparação entre métodos: (a) potencial na origem do condutor para solo com $\rho_s = 100$ Ω m e $\epsilon_r = 10$; (b) potencial na origem do condutor para solo com $\rho_s = 500$ Ω m e $\epsilon_r = 10$	82
Figura 47 Comparação entre método numérico e formulação analítica proposta: (a) potencial gerado sobre a superfície do solo considerando $\rho_s = 100$ Ω m e $\epsilon_r = 10$; (b) potencial gerado sobre a superfície do solo considerando $\rho_s = 500$ Ω m e $\epsilon_r = 10$	82

Figura 48	Comparação entre métodos e equacionamento para um surto de corrente rápido: (a) comparação entre métodos para determinação do potencial na origem do condutor; (b) potencial gerado sobre a superfície do solo.	83
Figura 49	Mecanismo de potencial de passo mediado pelo sistema de aterramento.	86
Figura 50	Mecanismo de potencial de contato mediado pelo sistema de aterramento: (a) potencial de toque; (b) potencial transferido.	86
Figura 51	Modelo base do corpo humano utilizado nas simulações.	87
Figura 52	Circuito equivalente do corpo humano considerando potencial de passo.	88
Figura 53	Circuito equivalente do corpo humano considerando potencial de toque.	88
Figura 54	Circuito equivalente do corpo humano considerando potencial transferido.	89
Figura 55	Estudo de suportabilidade para mecanismo de potencial de passo: (a) potenciais gerados; (b) corrente sobre o coração.	90
Figura 56	Estudo de suportabilidade para mecanismo de potencial de toque: (a) potenciais gerados; (b) corrente sobre o coração.	91
Figura 57	Estudo de suportabilidade para o mecanismo de potencial transferido: (a) potencial gerado; (b) corrente sobre o coração.	91
Figura 58	Estudo de suportabilidade para o mecanismo de potencial de passo: (a) potencial de passo; (b) corrente sobre o coração.	93
Figura 59	Surto de corrente utilizado nos estudos de caso.	97
Figura 60	Curvas de tensão e impedância sobre eletrodo de aterramento enterrado em planícies agrícolas ($\rho_s = 30 \Omega\text{m}$, $\epsilon_r = 20$): (a) tensão sobre a origem do eletrodo; (b) impedância do aterramento.	97
Figura 61	Curvas de tensão e impedância sobre eletrodo de aterramento enterrado em solo parcialmente arborizado ($\rho_s = 130 \Omega\text{m}$, $\epsilon_r = 13$): (a) tensão sobre a origem do eletrodo; (b) impedância do aterramento.	98
Figura 62	Curvas de tensão e impedância sobre eletrodo enterrado em colinas com florestamento ($\rho_s = 270 \Omega\text{m}$, $\epsilon_r = 12$): (a) tensão sobre a origem do eletrodo; (b) impedância do aterramento.	98
Figura 63	Curvas de tensão e impedância sobre eletrodo de aterramento enterrado em solo rochoso ($\rho_s = 500 \Omega\text{m}$, $\epsilon_r = 10$): (a) tensão sobre a origem do eletrodo; (b) impedância do aterramento.	99
Figura 64	Curvas de tensão e impedância sobre eletrodo de aterramento enterrado em áreas urbanas ($\rho_s = 1000 \Omega\text{m}$, $\epsilon_r = 6$): (a) tensão sobre a origem do eletrodo; (b) impedância do aterramento.	99
Figura 65	Curvas de tensão e impedância sobre eletrodo de aterramento enterrado em áreas industriais ($\rho_s = 3000 \Omega\text{m}$, $\epsilon_r = 4$): (a) tensão sobre a origem do eletrodo; (b) impedância do aterramento.	100
Figura 66	Plano xy sobre a superfície do solo utilizado nos estudos de caso.	102
Figura 67	Potencial sobre os pontos A, B e C considerando diferentes tipos de solo: (a) planícies agrícolas $\rho_s = 30 \Omega\text{m}$, $\epsilon_r = 20$; (b) solos parcialmente arborizados $\rho_s = 130 \Omega\text{m}$, $\epsilon_r = 13$; (c) colinas médias com florestamento $\rho_s = 270 \Omega\text{m}$, $\epsilon_r = 12$; (d) solos rochosos $\rho_s = 500 \Omega\text{m}$, $\epsilon_r = 10$; (e) áreas urbanas $\rho_s = 1000 \Omega\text{m}$, $\epsilon_r = 6$; (f) áreas industriais $\rho_s = 3000 \Omega\text{m}$, $\epsilon_r = 4$	103
Figura 68	Potencial sobre a superfície considerando diferentes tipos de solo: (a) planícies agrícolas $\rho_s = 30 \Omega\text{m}$, $\epsilon_r = 20$; (b) solos parcialmente arborizados $\rho_s = 130 \Omega\text{m}$, $\epsilon_r = 13$; (c) colinas médias com florestamento $\rho_s = 270 \Omega\text{m}$, $\epsilon_r = 12$; (d) solos	

rochosos $\rho_s = 500 \text{ } \Omega\text{m}$, $\varepsilon_r = 10$; (e) áreas urbanas $\rho_s = 1000 \text{ } \Omega\text{m}$, $\varepsilon_r = 6$; (f) áreas industriais $\rho_s = 3000 \text{ } \Omega\text{m}$, $\varepsilon_r = 4$ 104

Figura 69 Potencial de passo considerando diferentes tipos de solo: (a) planícies agrícolas $\rho_s = 30 \text{ } \Omega\text{m}$, $\varepsilon_r = 20$; (b) solos parcialmente arborizados $\rho_s = 130 \text{ } \Omega\text{m}$, $\varepsilon_r = 13$; (c) colinas médias com florestamento $\rho_s = 270 \text{ } \Omega\text{m}$, $\varepsilon_r = 12$; (d) solos rochosos $\rho_s = 500 \text{ } \Omega\text{m}$, $\varepsilon_r = 10$; (e) áreas urbanas $\rho_s = 1000 \text{ } \Omega\text{m}$, $\varepsilon_r = 6$; (f) áreas industriais $\rho_s = 3000 \text{ } \Omega\text{m}$, $\varepsilon_r = 4$ 106

Figura 70 Tensão produzida sobre o eletrodo no ponto $P(x,y,z) = (12,0,-0.5)$ para diferentes tipos de solo. 108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Comparação de diferentes modelos.....	30
Tabela 2 Comparação entre métodos numéricos.....	34
Tabela 3 Estimativa de danos causados por descargas atmosféricas em seres humanos.....	38
Tabela 4 Máximos potenciais gerados sobre o eletrodo e na superfície do solo.....	80
Tabela 5 Quantificação de parâmetros de referência para estudo de suportabilidade.....	92
Tabela 6 Energia associada à fibrilação ventricular do coração.....	92
Tabela 7 Tipos de solo utilizados nos estudos de caso.....	97
Tabela 8 Quantificação de variáveis envolvidas no estudo comparativo entre simulação com e sem a presença do fenômeno de ionização do solo.....	101
Tabela 9 Comparação do valor de regime da impedância de aterramento.....	101
Tabela 10 Máximos potenciais estimados na superfície do solo.....	103
Tabela 11 Potencial de passo entre A e A'.....	106
Tabela 12 Potencial de passo entre B e B'.....	107
Tabela 13 Potencial de passo entre C e C'.....	107
Tabela 14 Potencial de toque.....	108
Tabela 15 Potencial transferido.....	109

LISTA DE ABREVIATURAS

ATP	Alternative Transients Program
CEM	Compatibilidade eletromagnética
DF	Domínio frequência
DT	Domínio tempo
ED	Equação diferencial
EI	Equação integral
EMTP	ElectroMagnetic Transients Program
EPD	Equação parcial diferencial
EPR	Elevação de potencial de terra (<i>Earth Potential Rise</i>)
FDTD	Método das Diferenças Finitas no Domínio Tempo (<i>Finite Differences Time Domain Method</i>)
FEM	Método dos Elementos Finitos (<i>Finite Elements Method</i>)
FETD	Método dos Elementos Finitos no Domínio Tempo (<i>Finite Elements Time Domain</i>)
IFFT	Transformada Rápida Inversa de Fourier (<i>Inverse Fast Fourier Transform</i>)
MoM	Método dos Momentos (<i>Moments Method</i>)
SPDA	Sistema de proteção contra descargas atmosféricas
TLM	Método da Modelagem por Linhas de Transmissão (<i>Transmission Line Modeling Method</i>)
TLM-1D	Método da Modelagem por Linhas de Transmissão em uma dimensão (<i>Transmission Line Modeling Method - One Dimension</i>)
TLM-3D	Método da Modelagem por Linhas de Transmissão em três dimensões (<i>Transmission Line Modeling Method - Three Dimension</i>)

LISTA DE CONSTANTES

ϵ_0	Permissividade do vácuo	$8.8419 \cdot 10^{-12}$ F/m
μ_0	Permeabilidade do vácuo	$1.256 \cdot 10^{-6}$ H/m
μ_1	Permeabilidade relativa do solo	1
ρ_c	Resistividade do condutor (cobre)	$1.7241 \cdot 10^{-8}$ Ω m

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo introdutório serão apresentados os objetivos desta pesquisa, os quais se associam a concepção e aprimoramento de metodologias numéricas para a modelagem de aterramento elétrico sob uma análise transiente. A motivação para a realização do referido estudo também é apresentada, tendo seu argumento principal na necessidade de desenvolvimento de metodologias para melhor representação de sistemas de aterramento submetidos a surto atmosférico e sua interação com o ser humano. Por fim, a organização da tese é também descrita.

1.1 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é estabelecer contribuições à representação, análise e modelagem de aterramento impulsivo, vinculado ao estudo de suportabilidade de seres humanos¹ submetidos à diferença de potencial, provenientes da dissipação de corrente elétrica pelo sistema de aterramento. Para tanto, tem-se como foco o desenvolvimento e aprimoramento de modelos computacionais baseados no Método da Modelagem por Linhas de Transmissão (TLM). Para alcançar tal objetivo, a formulação do Método TLM em uma dimensão (TLM-1D), utilizado para a simulação numérica de problemas relacionados à compatibilidade eletromagnética (CEM), foi estendida de modo a possibilitar a avaliação de transitórios em eletrodos de aterramento.

Como primeiro objetivo do trabalho, tem-se o desenvolvimento de formulação para a inclusão do fenômeno de ionização do solo ao Método TLM-1D tradicional, com a peculiaridade de ser uma metodologia de caráter generalista, independente das propriedades do meio, características do eletrodo e do surto atmosférico. Considerando uma abordagem iterativa, o fenômeno de disrupção do solo foi representado numericamente com base na variação dos componentes resistivo e condutivo do Modelo TLM-1D.

O segundo objetivo esteve focado no aprimoramento e conseqüente desenvolvimento de equacionamento analítico para a estimação de potenciais gerados na superfície do solo, originados pela corrente elétrica calculada sobre condutor de aterramento por meio do TLM-1D. Tal formulação tem grande relevância na sua utilização em conjunto com metodologias numéricas unidimensionais de forma geral, as quais não são capazes de determinar diretamente os referidos potenciais. O equacionamento proposto leva em consideração além da resistividade do solo, sua permeabilidade e permissividade com dependência da frequência.

O terceiro e último objetivo diz respeito à realização de estudo de suportabilidade e segurança de seres humanos em contato com eletrodos de aterramento submetidos a surto atmosférico.

¹ Neste trabalho, os termos suportabilidade e segurança de seres humanos referem-se exclusivamente a uma abordagem com foco em grandezas elétricas geradas sobre o coração.

Para tanto, um modelo representativo do corpo humano baseado em circuitos elétricos foi utilizado e aprimorado, onde alguns dos principais mecanismos de contato direto e indireto com descargas atmosféricas foram avaliados em termos de corrente e energia geradas sobre o coração.

Adicionalmente, também foi objetivo do trabalho a realização de estudo de sensibilidade das propriedades de diferentes tipos de meio no processo da dissipação de corrente elétrica. Deste modo, teve-se como meta verificar a influência do fenômeno de ionização, comportamento do potencial na superfície do solo e eficácia de um sistema de aterramento na segurança e suportabilidade de seres humanos.

1.2 Justificativa

Sabe-se que as instalações elétricas de uma forma geral estão constantemente sujeitas à ocorrência de elevadas correntes de curto-circuito provenientes de faltas nos dispositivos elétricos a elas conectados e principalmente de descargas atmosféricas. No caso da ocorrência de tal fenômeno natural, um dos principais recursos capazes de manter a integridade do sistema elétrico e, fundamentalmente, garantir a segurança de pessoas e animais é o sistema de aterramento. O projeto adequado de malha do sistema de aterramento frente ao comportamento impulsivo e de altas frequências da descarga elétrica mostra-se relevante, tendo como premissa básica conferir maior eficiência ao mesmo com conseqüente segurança pessoal. Para tanto, deve-se utilizar uma metodologia de avaliação o mais precisa possível.

Segundo levantamento realizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) a incidência de raios nas regiões sul, sudeste e parte da centro-oeste no ano de 2009 aumentou cerca de 40% se comparado ao ano de 2007 (INPE, 2010). No biênio 2009-2010 foi constatado um aumento de 11% na ocorrência de descargas atmosféricas em cidades com maior urbanização, acima de 200 mil habitantes, em relação à média dos dois últimos biênios (INPE, 2011). Tal constatação está fortemente relacionada às variações que o clima vem sofrendo nos últimos tempos. Desta forma, nos próximos anos descargas atmosféricas podem vir a se intensificar ainda mais nestas regiões do país. Adicionalmente, dados revelam que os prejuízos no Brasil causados por este fenômeno giram em torno de R\$ 1 bilhão por ano, sendo cerca da metade deste valor associado a perdas do setor elétrico (PIANTINI, 2007). Tais argumentos reforçam a relevância de estudos relacionados ao desenvolvimento e aprimoramento de metodologias que propiciem aumento na confiabilidade, segurança e eficácia de sistemas de aterramento.

Boa parte das metodologias de análise existentes atualmente utiliza um grande número de aproximações empíricas em seus modelos, sendo parte destas voltadas para soluções pontuais de caráter não generalista. Ainda, importantes fenômenos têm sido negligenciados no processo de interação entre o meio, sistema de aterramento e seres humanos. Tais metodologias estão fortemente focadas, quase que exclusivamente, na redução da impedância do sistema de aterramento (TELLÓ, 2007a). Estudos da avaliação dos potenciais gerados na superfície do solo proveniente da dissipação de correntes de descargas atmosféricas são atualmente muito pouco explorados.

A norma que melhor aborda os efeitos das descargas atmosféricas nos seres humanos e no gado bovino, é a (IEC/TR 60479-4, 2004). Ainda assim, esta é puramente qualitativa, não apresentando modelos matemáticos de qualquer espécie. Raros são os estudos vinculados ao contato de seres humanos com surto atmosférico, tão pouco da influência do sistema de aterramento como elemento deste mecanismo. Deste modo, contribuições nesta área, fortemente carente de investigação, mostram ser de grande valia.

Neste contexto, o desenvolvimento de metodologias inovadoras para análise impulsiva e em altas frequências focadas no aprimoramento de métodos numéricos de simulação associados à aferição da segurança pessoal é inédito e salienta a relevância do trabalho proposto.

1.3 Organização da Tese

Além deste, a presente tese foi dividida em mais seis capítulos sumarizados a seguir.

O capítulo 2 tem seu foco na revisão do estado da arte, onde definições importantes relacionadas a aterramento impulsivo são apresentadas. As principais metodologias numéricas para a modelagem e análise transitória destes sistemas também são discutidas.

O capítulo 3 aborda aspectos relacionados à suportabilidade e modelagem de seres humanos submetidos a surto atmosférico. Uma breve descrição do histórico de pesquisas relacionadas ao referido tema é relatada, com consequente apresentação dos principais mecanismos de contato com tal fenômeno. Os modelos representativos do corpo humano com maior aceitação na literatura também são descritos.

O capítulo 4 apresenta a formulação analítica do Método da Modelagem por Linhas de Transmissão em uma dimensão (TLM-1D) adaptado para a análise de sistemas de aterramento. O conteúdo do capítulo, com enfoque numérico, descreve os procedimentos necessários para o desenvolvimento de algoritmo computacional para a representação de eletrodos verticais e horizontais de aterramento.

No capítulo 5 são relatadas as contribuições ao estado da arte conferidas a este trabalho. Uma metodologia para a inclusão do fenômeno de ionização do solo ao Método TLM-1D é descrita. Posteriormente, é apresentada uma formulação analítica para a estimação de potenciais gerados na superfície do solo. Por fim, contribuições ao estudo de suportabilidade de seres humanos são apresentadas.

O capítulo 6 contextualiza a aplicação dos métodos desenvolvidos com base em estudos de caso. Considerando eletrodo de aterramento tipicamente utilizado como componente do sistema de proteção contra descargas atmosféricas (SPDA) de linhas transmissão de energia elétrica, diferentes tipos de solo foram analisados, ressaltando as potencialidades das metodologias propostas.

No capítulo 7 são apresentadas as conclusões obtidas com a pesquisa realizada, além de sugestões para trabalhos futuros.

No apêndice são listadas as publicações do autor referentes ao tema da tese.

2. REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

Neste capítulo faz-se uma revisão do estado da arte de questões pertinentes à simulação computacional de sistemas de aterramento destinados à dissipação de descargas atmosféricas para o solo. Definições e parâmetros relevantes para a representação deste fenômeno transiente são comentados. Os principais modelos e métodos numéricos utilizados para a simulação do conjunto surto, meio e eletrodo de aterramento são caracterizados, sendo enfatizadas suas vantagens e desvantagens.

2.1 Introdução

Sistemas de aterramento são um dos principais recursos capazes de manter a integridade física de uma instalação no caso da ocorrência de curto-circuito e descargas atmosféricas. Tais esquemas são também importantes para a segurança da população e de equipamentos (JAROSLAW, 2003; PORTELA, 1997a).

A principal importância de um sistema de aterramento contra descargas atmosféricas é garantir a proteção de pessoas na ocorrência de tal fenômeno. A corrente elétrica ao passar pelo corpo humano tem seus efeitos associados à duração, à magnitude e à frequência, tendo como um de seus possíveis efeitos a fibrilação ventricular do coração podendo ocasionar a morte. Adicionalmente, um surto atmosférico induz tensões e correntes transientes antes que a descarga elétrica seja dissipada para o solo. Estas tensões e correntes induzidas podem prejudicar dispositivos conectados ao sistema, causando erros da operação e até mesmo destruição de equipamentos, bem como danos a seres humanos e animais (LIU, 2001; TELLÓ, 2007a).

Entre os critérios de desempenho de um sistema de aterramento em baixa frequência, no que se refere à segurança de pessoas, considera-se que os potenciais de passo e toque toleráveis produzidos na superfície do solo não devem ser ultrapassados. Tais potenciais são considerados como parâmetros de referência na análise de malhas de terra em regime permanente (baixas frequências). Entretanto, esses potenciais podem ser excedidos no período transiente de um impulso elétrico como na ocorrência de um surto atmosférico (MATTOS, 2003). Desta maneira, a análise impulsiva durante o período transitório deve ser avaliada, considerando principalmente a energia imposta pela descarga atmosférica ao organismo humano.

Com o crescente aumento da eficiência computacional nas últimas décadas, a etapa de simulação vem se tornando uma ferramenta importante no projeto de sistemas de aterramento, seja para baixas ou altas frequências. No caso específico das altas frequências, foco deste estudo, a análise do comportamento de grandezas elétricas e magnéticas em regime transitório permite conhecer a resposta de um sistema de aterramento antes da implantação física do mesmo com uma precisão razoável, desde que certos parâmetros sejam bem estabelecidos como, por exemplo, as características elétricas do solo. Deste modo, modelos apropriados que

simulem o comportamento de um esquema de aterramento, frente a uma descarga atmosférica, podem prover o embasamento necessário para a construção de malhas de terra mais eficientes permitindo, por sua vez, um aumento na confiabilidade e segurança da operação do sistema elétrico envolvido (TELLÓ, 2007a).

Nos últimos anos, métodos analíticos e numéricos foram desenvolvidos e aplicados para o projeto e a avaliação de aterramento. O Método dos Elementos Finitos - FEM (LIU, 2004), o Método dos Momentos - MoM (DAWALIBI, 1993; FORTIN, 2006), as aproximações por Linhas de Transmissão integrada ao software de análise de transientes eletromagnéticos - EMTP (MENTER, 1994), o Método das Diferenças Finitas do Domínio Tempo - FDTD (LIU, 2004) o Método da Modelagem por Linhas de Transmissão - TLM (JOHNS, 1971; CHRISTOPOULOS, 1995; CHRISTOPOULOS, 2006) entre outras, são metodologias utilizadas para a finalidade citada. Dentre tais métodos o TLM provavelmente é o mais estudado e aprimorado nos últimos anos. Geometrias complexas, meios não homogêneos e com perdas, materiais com parâmetros variáveis (não lineares, dispersivos e anisotrópicos) podem ser modelados com TLM (ALMAGUER, 2003).

Neste contexto, nas próximas seções, serão apresentados de forma sucinta alguns conceitos básicos relacionados às metodologias citadas para a análise em altas frequências de sistemas de aterramento enfatizando suas características, vantagens e desvantagens. Tais sistemas são comumente chamados de aterramento impulsivo, devido à característica de impulso elétrico predominante em um surto atmosférico.

2.2 Definições Sobre Aterramento Impulsivo

Antes de proceder com a apresentação da modelagem e análise de aterramento impulsivo utilizando as técnicas citadas, alguns conceitos devem ser apresentados de modo que o modelo computacional a ser utilizado represente de forma mais fidedigna o comportamento do sistema em sua totalidade. Deste modo, aspectos referentes à fonte de excitação (descarga atmosférica), propriedades do meio (solo / ar) e do condutor (eletrodo) devem ser analisados.

A consideração de tais aspectos é fundamental para a obtenção de uma adequada representação do sistema de aterramento. Tal interação está fundamentalmente relacionada à solução de um conjunto de equações que descreve o comportamento dos campos elétrico e magnético e suas iterações com o meio (Equações de Maxwell).

2.2.1 Fonte de Excitação

A excitação do sistema (surto atmosférico) pode ser representada computacionalmente por meio de uma onda do tipo dupla exponencial, caracterizada pela sua magnitude, pelo tempo de subida (T1) e pelo tempo de descida correspondente a 50% do valor de pico (T2) conforme exemplifica a Figura 1. Esta onda impulsiva pode ser modelada com base na equação 2.1 (dupla exponencial padrão) utilizada em softwares como Alternative Transients Program - ATP ou pelas equações 2.2a e 2.2b apresentadas a seguir (AHMAD, 2008).

$$A_s(k\Delta t) = A_0 \left[e^{(-\alpha k\Delta t)} - e^{(-\beta k\Delta t)} \right] \quad (2.1)$$

$$A_s(k\Delta t) = \frac{A_0 \left[e^{(-\alpha k\Delta t)} - e^{(-\beta k\Delta t)} \right]}{e^{(-\alpha w)} - e^{(-\beta w)}} \quad (2.2a)$$

$$w = \frac{\left[\ln \left(\frac{\alpha}{\beta} \right) \right]}{[\alpha - \beta]} \quad (2.2b)$$

Onde:

- A_s corrente do surto no instante de tempo t (A);
 A_0 valor de pico da corrente (A);
 Δt passo de tempo (s);
 k número do passo de tempo;
 α inverso de 50% do valor de pico ($1/ T_2$);
 β inverso do tempo de pico ($1/ T_1$).

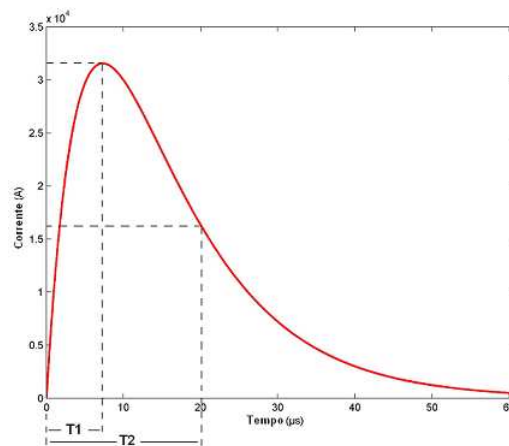


Figura 1 Surto atmosférico de magnitude 32000A $T_1 = 8 \mu s$, $T_2 = 20 \mu s$.

Adicionalmente, existem outros modelos que podem ser utilizados para a representação de um surto atmosférico, como a representação por meio das funções de Heidler (HEIDLER, 1985).

Um fator importante a ser considerado no projeto de um sistema de aterramento é a faixa de frequência que o mesmo deve atender. Para tanto, considera-se como aterramento em baixa frequência aquele vinculado a frequências da ordem de 50 Hz e 60 Hz (frequência industrial) tendo a finalidade de proteção contra defeitos a terra como curto-circuito do sistema elétrico de potência (TELLÓ, 2007a). O aterramento em altas frequências ou aterramento impulsivo deve responder a frequências na faixa de 10 kHz a 3 MHz e está associado a transitórios eletromagnéticos como é o caso de uma descarga atmosférica (VELASCO, 2010).

2.2.2 Características dos Eletrodos e do Meio

Sistemas de aterramento são constituídos desde simples hastes horizontais ou verticais até grandes malhas de terra. A Figura 2 ilustra as geometrias de condutores de aterramento citadas. A combinação entre tais elementos, configurando geometrias arbitrárias, também costumam ser empregadas.



Figura 2 Geometrias básicas de aterramento.

Via de regra, a modelagem destes sistemas deve levar em consideração as características elétricas e dimensionais do condutor além das propriedades elétricas do meio: resistividade

elétrica (ρ), permissividade elétrica (ε) e permeabilidade magnética (μ), conforme é ilustrado de forma simplificada na Figura 3.

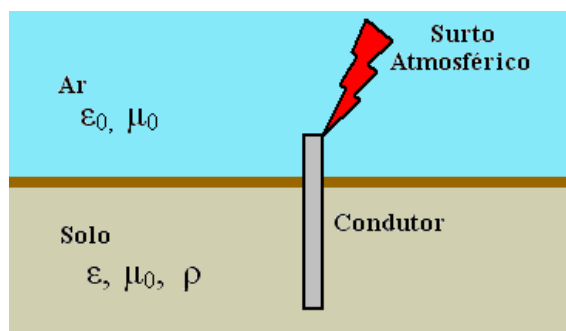


Figura 3 Caracterização do conjunto meio eletrodo.

Sabe-se que o solo é constituído por diversas camadas nas mais variadas posições e configurações. Entretanto, a consideração de tal característica tornaria impraticável a sua representação computacional. Desta forma, o solo costuma ser representado como um meio homogêneo e estratificado em camadas horizontais ou verticais. Boa parte dos métodos numéricos considera o solo como sendo homogêneo e estratificado em uma ou duas camadas.

2.2.2.1 Dependência dos Parâmetros do Solo com a Frequência

Em baixas frequências, assume-se que o solo possui um comportamento puramente resistivo, sendo o mesmo representado apenas pela condutividade elétrica (σ) ou pela sua resistividade elétrica (ρ) definida como $\rho = 1/\sigma$. Deste modo, é considerada apenas a corrente de condução que circula pela resistência do solo. Além disso, ε , σ e μ são considerados invariantes no tempo (VISACRO, 2007).

Em altas frequências, onde se verifica frentes de onda com altas taxas de crescimento da corrente no tempo, além da resistência, a indutância e a capacitância do solo devem ser levadas em conta. Assim, associada à corrente de condução haverá uma corrente de deslocamento que circula pela capacitância do solo (TELLÓ, 2007a).

De um modo geral, um meio pode ser descrito pela sua condutividade elétrica σ^* composta por uma condutividade elétrica à frequência zero mais a permissividade elétrica que é dependente da frequência $\varepsilon(\omega)$, conforme representado pela equação 2.3 onde ω é a frequência angular (rad/s) (IBEN, 1996).

$$\sigma^* = \sigma + j\omega \cdot \varepsilon(\omega) \quad (2.3)$$

Analisando tal equação, verifica-se que com o aumento da frequência o segundo termo (lado direito da equação) passa a ter valor significativo na quantificação da condutividade elétrica do meio. Desta forma, para a análise da propagação de transitórios eletromagnéticos no solo, como uma descarga atmosférica, os parâmetros elétricos são dependentes da frequência (LIMA, 2007; PEDROSA, 2010; PORTELA, 2003; VISACRO, 2011; VISACRO, 2012; WISINTAINER, 2010).

2.2.2.2 O Fenômeno de Ionização do Solo

Outro fenômeno importante a ser considerado na modelagem e análise de aterramento é a Ionização do solo. Se a tensão produzida ao longo do eletrodo de aterramento e em sua vizinhança, devido a uma descarga atmosférica, for suficientemente elevada a ponto de ultrapassar certo valor crítico de campo elétrico pode ocorrer à ruptura do dielétrico do solo até uma determinada distância radial. Na prática, este fenômeno provoca uma espécie de

“*aumento do raio efetivo do eletrodo*”. Tudo se passa como se o eletrodo aumentasse de tamanho, acarretando em redução no seu valor de impedância de aterramento.

Conforme a corrente aumenta com o tempo, ocorre um aumento na produção de descargas elétricas propiciando a evaporação da umidade do solo com conseqüente surgimento de arcos ao redor dos eletrodos de aterramento. Nesta região de arcos, a resistividade elétrica do solo decresce de seu valor original (TELLÓ, 2007a).

O campo elétrico crítico, o qual é o valor de campo elétrico onde se inicia a ionização do solo, é determinado experimentalmente podendo assumir o valor de 400 kV/m (CIGRE, 1991) ou conforme os estudos de Mousa 300 kV/m (MOUSA, 1994). Entretanto, valores na faixa de 300 kV/m a 1500 kV/m têm sido utilizados em diversas investigações (GRCEV, 2009b). Alguns estudos como os de (LORENTZOU, 2003) culminaram no desenvolvimento de uma equação (equação 2.4), onde o campo elétrico crítico pode ser estimado com base na condutividade elétrica do meio. Adicionalmente, outros trabalhos como o de (MANNA, 2007) vem contribuindo para a determinação desta grandeza.

$$E_{cr} = 241 \cdot \sigma^{-0.215} \quad (2.4)$$

Onde:

E_{cr} campo elétrico crítico (V/m);

σ condutividade elétrica ($[\Omega\text{m}]^{-1}$).

Sendo assim, quando o valor de campo elétrico crítico é excedido são criados canais de disrupção no solo afetando os parâmetros elétricos do mesmo. A Figura 4 ilustra o fenômeno de ionização do solo.

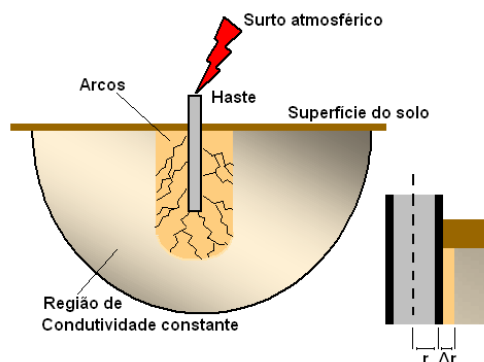


Figura 4 Fenômeno de ionização do solo.

Devido aos elevados valores de campo elétrico gerados no processo de dissipação da corrente produzida por um surto atmosférico, a ionização do solo é um fenômeno quase que constantemente presente. Neste contexto, algumas metodologias foram propostas e vem sendo aprimoradas como o Modelo Dinâmico de Liew (LIEW, 1974; WANG 2005), Modelo Analítico de Velasquez (VELASQUEZ, 1984), Método da Resistividade Residual (LIU, 2004), Método do Balanço da Energia (SEKIOKA, 2006) e o método de cálculo baseado na consideração de resistência de aterramento não linear (IMECE, 1996) recomendado pelo IEEE Power & Energy Society (IEEE Std 1410, 2011). Embora alguns estudos atuais ignorem este processo natural na representação de malhas de terra (GRCEV, 2011), pesquisas recentes reafirmam a importância da consideração deste mecanismo no modelo computacional, conferindo maior fidedignidade na representação do surto, meio e eletrodo (LI, 2011).

2.2.2.3 Impedância de Aterramento

Diante de uma descarga atmosférica, o aterramento exerce papel fundamental na dissipação da corrente elétrica para o solo. Neste fenômeno, a impedância da malha de terra deve ser menor que a impedância equivalente do restante do sistema elétrico envolvido, caso contrário a descarga fluirá para o sistema podendo causar inúmeros danos (LIU, 2001). Neste contexto, algumas definições importantes em relação à impedância são apresentadas (TELLÓ, 2007a).

- Impedância dinâmica de surto ou impedância impulsiva: é definida como a relação entre os valores instantâneos da tensão de terra (diferença de potencial entre o eletrodo de aterramento e o terra remoto) e a corrente injetada. Seu valor varia muito rapidamente no tempo estando associado ao período transitório e a altas frequências.
- Impedância de surto: é definida como a razão da elevação de potencial pela corrente no ponto de injeção de um surto.
- Resistência à frequência industrial de terra: é definida como o valor para o qual a impedância de aterramento converge após a passagem do período transitório provocado por um surto, como uma descarga atmosférica. É a componente de regime permanente a baixas frequências (50 / 60 Hz).

A Figura 5 mostra o comportamento da impedância de um condutor de aterramento de 100 m de comprimento enterrado horizontalmente em solo homogêneo com $\rho = 100 \Omega\text{m}$ e $\varepsilon = 4$ submetido ao surto de corrente apresentado na Figura 1.

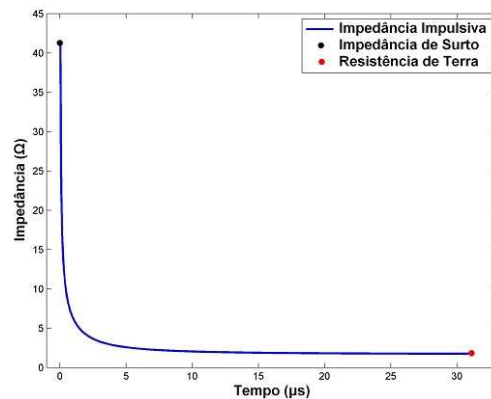


Figura 5 Impedância de aterramento.

A Figura 6, adaptação de (MAZZETTI, 2003), mostra a resistência à frequência industrial de terra para diferentes configurações de eletrodos de aterramento submetidos a surto atmosférico.

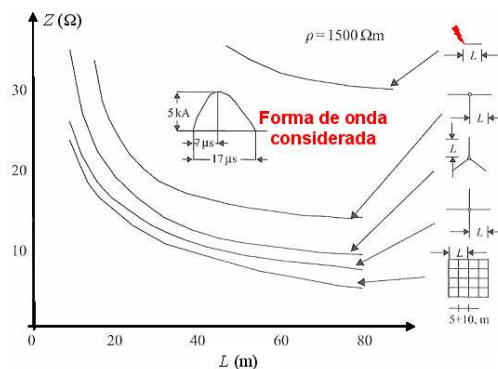


Figura 6 Resistência convencional de terra de diferentes sistemas de aterramento.

A avaliação do desempenho de eletrodos de geometrias simples baseadas na comparação entre estudos teóricos e experimentais, como os apresentados na Figura 6, permite chegar a algumas conclusões:

- o comprimento do eletrodo de aterramento que realmente contribui para a dispersão da corrente impulsiva depende principalmente da resistividade elétrica do solo (ρ), do tempo de crista da onda impulsiva (T_1) e do valor de pico da corrente (I). Tal comprimento pode ser entendido como comprimento efetivo de eletrodo (AHMAD, 2009; GAZZANA, 2012);
- a expressão analítica simplificada para avaliar o comprimento efetivo de eletrodos é dada pela equação 2.5 (MAZZETTI, 2003).

$$l_e = K_0(\rho \cdot T_1)^{\frac{1}{2}} \quad (2.5)$$

Onde:

l_e comprimento efetivo do eletrodo a partir do ponto de injeção da corrente (m);

ρ resistividade do solo (Ωm);

T_1 tempo até a crista da onda impulsiva (μs)

K_0 fator dependente da geometria do eletrodo de aterramento, assumindo:

1.4 para um condutor energizado por um terminal;

1.55 para um condutor energizado pelo centro;

1.65 para condutores em estrela energizados pelo centro.

Uma vez que a amplitude e forma de onda da corrente injetada, as dimensões do eletrodo de aterramento e a resistividade elétrica do solo definem a distribuição do potencial ao longo do eletrodo e, conseqüentemente, a dispersão da corrente nas diversas partes do mesmo, estes parâmetros definem a resistência de terra convencional.

Entretanto, com base na revisão realizada constata-se que não existe um exato consenso de definições na literatura. Leonid Grcev define Impedância de surto como sendo a razão entre o máximo potencial produzido pelo valor de pico da corrente injetada, o que não necessariamente ocorre no mesmo instante de tempo. O autor também considera como comprimento efetivo, o máximo comprimento do eletrodo para o qual o mesmo apresenta comportamento predominantemente resistivo (GRCEV, 2009a).

2.2.3 Equações de Maxwell

A análise impulsiva e em altas frequências de aterramento é feita tradicionalmente pela solução das equações de Maxwell e suas relações constitutivas (equação 2.6a a equação 2.6e).

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2.6a)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.6b)$$

$$B = \mu \cdot H \quad (2.6c)$$

$$D = \varepsilon \cdot E \quad (2.6d)$$

$$J = \sigma \cdot E \quad (2.6e)$$

Onde:

H	vetor campo magnético (A/m);
E	vetor campo elétrico (V/m);
B	vetor densidade de fluxo magnético (T);
D	vetor densidade de fluxo elétrico (C/m ²);
J	vetor densidade superficial de corrente elétrica (A/m ²);
μ	permeabilidade magnética (H/m);
ε	permissividade elétrica (F/m);
σ	condutividade elétrica ([Ω m] ⁻¹).

Tal equacionamento, já conhecido e consolidado baseia-se na resolução de um conjunto de equações diferenciais que representam o acoplamento entre solo e eletrodo. Sabe-se que a representação de problemas físicos com consequente solução matemática deste tipo de equação não é uma tarefa trivial (COSTA, 2006; PORTELA, 1997b; PORTELA, 1997c).

Problemas relacionados à modelagem e análise de sistemas de aterramento são não-lineares, onde nem sempre uma solução analítica é possível. Neste cenário, o uso de métodos numéricos mostra ser uma alternativa viável e vem sendo empregado com sucesso para a solução deste tipo de problema.

2.3 Metodologias para Análise de Aterramento Impulsivo

Problemas envolvendo análise de aterramento podem ser solucionados utilizando abordagens empíricas, numéricas e analíticas (IEC 1024-1-1, 1993). Os principais métodos de modelagem baseiam-se em circuitos elétricos (LIU, 2004), linhas de transmissão (MENTER, 1994), Modelo Eletromagnético e modelagem híbrida (MATOS, 2005).

Os fenômenos transientes em sistemas de aterramento podem ser caracterizados por meio de duas abordagens: aquelas baseadas no domínio frequência (DF) com consequente transformação para o domínio tempo usando a Transformada Inversa de Fourier (IFFT); aquelas baseadas no cálculo da solução diretamente no domínio tempo (DT). A modelagem por campos eletromagnéticos (GRCEV, 1990; GRCEV, 1997) utiliza a abordagem DF enquanto a modelagem por circuitos (VELASQUEZ, 1984) e por linhas de transmissão (MELIOPOULOS, 1983) utiliza a abordagem DT para o cálculo da resposta do sistema de aterramento frente a uma banda larga de frequências. Nas próximas seções, estas técnicas serão apresentadas e analisadas.

2.3.1 Modelagem por Circuitos

A modelagem por circuitos, também chamada de modelagem de rede considera o eletrodo de aterramento como um circuito elétrico equivalente composto por uma associação de elementos resistivos (R), capacitivos (C) e indutivos (L) (VELASQUEZ, 1984). As principais características deste modelo são:

- segmentação dos eletrodos de aterramento;
- obtenção de um circuito equivalente para cada segmento e cálculo dos parâmetros próprios e mútuos;
- solução de equações nodais do circuito equivalente utilizando as leis de Kirchoff.

A modelagem por circuitos elétricos para analisar transitórios em sistemas de aterramento foi utilizada por (MELIOPOULOS, 1983). Neste modelo, cada segmento do condutor de

aterramento é substituído por uma linha de transmissão sem perdas e dois “shunts” como pode ser visto na Figura 7 e posteriormente transformado no circuito da Figura 8.

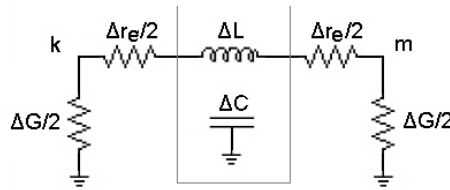


Figura 7 Modelo de circuito proposto por Meliopoulos.

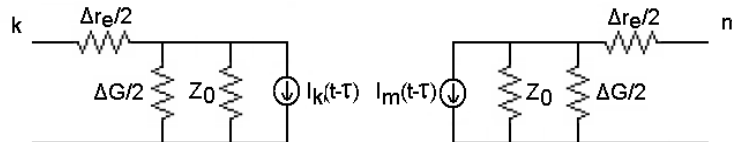


Figura 8 Circuito equivalente

A equação modal do circuito equivalente apresentado acima é dada por 2.7.

$$[Y] \cdot [V(t)] = [I_s(t)] + [b(t - \Delta t, \dots)] \quad (2.7)$$

Onde:

- $[Y]$ matriz admitância do circuito equivalente;
- $[V(t)]$ matriz de tensões no tempo t para os nós;
- $[I_s(t)]$ matriz da corrente injetado nos nós do circuito;
- $[b(t - \Delta t, \dots)]$ matriz histórico de correntes.

Este modelo é compatível com a solução provida pelo programa de Análise de Transientes Eletromagnéticos - EMTP (ADAPA, 1990).

Posteriormente, diversas melhorias nesta teoria foram feitas por (MELIOPOULOS, 1987; RAMAMOORTY, 1989; GERI, 1999; OTERO, 1999; CIDRAS, 2000). A metodologia de Otero foi provavelmente a primeira solução de análise transitória em sistemas de aterramento no domínio frequência usando modelagem por circuitos.

A modelagem por circuitos é fácil de ser compreendida, sendo o comportamento transiente do sistema de aterramento simulado pela solução de circuitos equivalentes. A ionização do solo pode ser incorporada ao modelo (LIU, 2004).

2.3.2 Modelagem por Linhas de Transmissão

A teoria de linhas de transmissão para modelagem de sistemas de aterramento foi introduzida por Erling Ditlef Sunde (SUNDE, 1968), onde o conceito de linhas de transmissão com parâmetros por unidade de comprimento dependentes da frequência foi empregado. O objetivo era avaliar o comportamento transiente de um condutor horizontal na superfície do solo devido a uma descarga atmosférica direta com base na solução da equação 2.8 e da equação 2.9 dadas a seguir “*telegrapher’s equations*”.

$$\frac{dI(x, j\omega)}{dx} = -Y \cdot V(x, j\omega) \quad (2.8)$$

$$\frac{dV(x, j\omega)}{dx} = -Z \cdot I(x, j\omega) \quad (2.9)$$

Onde:

Z impedância longitudinal por unidade de comprimento do condutor;

Y admitância longitudinal por unidade de comprimento do condutor.

Neste modelo os condutores de aterramento são tratados por técnicas de ondas viajantes (MELIOPOULOS, 1987). O modelo proposto por (MARTI, 1982) aprimorou o Método de Sunde. Aspectos referentes ao emprego desta técnica podem ser encontrados em (MENTER, 1992; MENTER, 1994; HATZIARGYRIOU, 1997). As tensões e correntes ao longo do eletrodo podem ser calculadas usando modelos do EMTP.

A modelagem por linhas de transmissão pode ser usada para analisar o comportamento transiente de aterramento no domínio frequência, mas é mais fácil incluir o efeito da ionização do solo para uma abordagem DT. Tal modelagem possibilita incluir o acoplamento mútuo entre eletrodos. Este método permite a avaliação de altas frequências o que é bastante apropriado para estudos de descargas atmosféricas. O tempo computacional exigido é menor que o requerido pelo Modelo de Campos Eletromagnéticos (LORENTZOU, 2003).

2.3.3 Modelagem por Campos Eletromagnéticos

A modelagem por campos eletromagnéticos ou simplesmente Modelo Eletromagnético é caracterizada pela sua elevada precisão. Este método é o mais rigoroso para modelar o comportamento transiente em sistemas de aterramento. Baseia-se na resolução das equações de Maxwell com mínimas aproximações. Pode ser implementado usando o Método dos Elementos Finitos (FEM) ou o Método dos Momentos (MoM) (LIU, 2004).

Leonid Grcev desenvolveu um modelo baseado no MoM para analisar o comportamento transiente de sistemas de aterramento (GRCEV, 1990; GRCEV, 1992; GRCEV, 1996a; GRCEV, 1996b). A principal vantagem deste método é sua exatidão, propiciada por mínimas aproximações em sua modelagem, porém é complexo de ser programado. Outra desvantagem, é que devido ao fato do modelo basear-se em uma solução no DF, a inclusão de não-linearidades como a ionização do solo não é uma tarefa trivial (LIU, 2004).

Uma implementação baseada no FEM foi desenvolvida por (NEKHOUL, 1995; NEKHOUL, 1996) partindo da resolução de equações de energia elétrica e magnética. A dificuldade neste modelo é transformar as condições de contorno abertas do ar e do solo em condições de contorno fechadas, de modo a reduzir o tamanho do problema a ser analisado (BRUNOTTE, 1992). Uma importante conveniência do FEM associado à modelagem eletromagnética é a elevada flexibilidade de discretização da geometria e do meio. O FEM não resolve diretamente as equações de Maxwell, razão pela qual sua compreensão torna-se mais complicada do que o MoM (LIU, 2004).

Ainda, no caso da modelagem por campos eletromagnéticos, pelo fato de basear-se em métodos no DF, a solução de sistema de equações é feita para determinado componente de frequência individualmente. Deste modo, a solução para uma única frequência aumenta consideravelmente o tempo de simulação, uma vez que os fenômenos transitórios envolvem um grande número de frequências.

2.3.4 Modelagem Híbrida

Esta técnica resulta da combinação da modelagem por circuitos elétricos e Modelo Eletromagnético, tendo sido desenvolvida por (DAWALIBI, 1986a; DAWALIBI, 1986b) e posteriormente modificada por (ANDOLFATO, 2000). A vantagem deste modelo, em relação aos demais, é que ele é mais preciso que a modelagem por circuitos quando a fonte de excitação possui valores elevados de magnitude (valor de pico de corrente ou tensão), além da

exatidão conferida pelo Modelo Eletromagnético. A Tabela 1 apresenta alguns critérios importantes relacionados aos modelos apresentados para a análise transiente de sistemas de aterramento.

Tabela 1 Comparação de diferentes modelos.

Modelo	Expressão Matemática	Compreensão	Precisão	Procedimento de Solução	Desempenho Computacional
Circuitos	Simple	Fácil	Preciso	Simple	Pequena
Linhas de Transmissão	Mais simples	Fácil	Preciso	Simple	Pequena
Eletromagnético	Trabalhosa	Difícil	Mais preciso	Trabalhoso	Grande
Híbrido	Trabalhosa	Difícil	Preciso	Trabalhoso	Grande

Fonte: adaptação de (LIU, 2004).

2.4 Métodos Numéricos

Em problemas complexos, onde a determinação de uma solução analítica é de difícil obtenção, o uso de métodos numéricos para a análise e modelagem é uma alternativa atraente. Em geral, os métodos numéricos de análise e modelagem de sistemas de aterramento solucionam (numericamente) as Equações de Maxwell, sujeitas a determinadas condições de contorno. Estas metodologias são classificadas em duas categorias: a primeira delas baseia-se em modelos de equações diferenciais (ED) e a segunda em modelos de equações integrais (EI). Do ponto de vista computacional, estas técnicas podem ser aplicadas para a solução de problemas no domínio tempo (DT) ou no domínio frequência (DF).

Técnicas de modelagem no domínio tempo mostram ser mais apropriadas para a solução de problemas envolvendo uma banda larga de frequências. Entretanto, dependendo da complexidade do problema a ser modelado o tempo de processamento pode ser bastante elevado (SADIKU, 2009). Metodologias baseadas no domínio frequência possuem melhor eficiência quando aplicadas a solução de problemas envolvendo um pequeno número de frequências, como é o caso de aterramento em baixa frequência (50 Hz e 60 Hz) considerando a avaliação em regime permanente. Por outro lado, a análise de transitórios em sistemas de aterramento tem sido realizada com sucesso utilizando métodos baseados no DF (GRCEV, 1996b; MONTAÑA, 2006). Neste contexto, diversas metodologias foram desenvolvidas e vem recebendo constantes aprimoramentos ao longo dos últimos anos. O Método dos Momentos (MoM), o Método dos Elementos Finitos (FEM), o Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD) e a Modelagem por Linhas de Transmissão (TLM) podem ser consideradas as principais metodologias aplicadas para a solução de problemas de compatibilidade eletromagnética e mais especificamente, de aterramento impulsivo (BRÜNS, 2007).

A seguir, serão descritos e analisados os principais métodos numéricos utilizados para a modelagem e análise de transientes em aterramento impulsivo e em altas frequências (GAZZANA, 2009).

2.4.1 Método dos Momentos (MoM)

MoM é uma técnica no domínio frequência (DF), baseado no método dos “*pesos residuais*” sendo introduzido originalmente por (HANINGTON, 1968), onde uma equação integral é obtida através do uso de funções de Green no espaço livre. Esta equação integral é

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

No caso de estruturas compostas por hastes e contrapesos, como em malhas de terra, a chamada “*thin-wire approach*” é usualmente aplicada sendo baseada na distribuição de corrente elétrica ao longo do eletrodo. Outra formulação do método utiliza equações integrais de volume. O uso mais comum do MoM baseia-se na formulação de superfície de corrente onde a discretização da mesma é feita através de elementos triangulares e retangulares. O procedimento para a programação do Método dos Momentos usualmente envolve quatro passos (SADIKU, 2009):

- derivação da equação integral apropriada (EI);
- discretização da equação integral em uma matriz de equações usando bases ou funções de expansão e funções de ponderação;
- estimação dos elementos da matriz;
- resolução da matriz de equações e obtenção dos parâmetros de interesse.

Por se tratar de um método no domínio frequência, é melhor aplicável à solução de problemas envolvendo uma única frequência ou banda estreita de frequências, tornado a análise de sinais impulsivos, como descargas atmosféricas, um pouco mais exaustiva. O tempo computacional e a memória requerida aumentam drasticamente se o número de elementos é elevado (JITHESH, 2003). Adicionalmente, para a análise de estruturas contendo materiais não homogêneos, um método híbrido composto por MoM e FEM pode ser apropriado (YUAN, 1990).

2.4.2 Método dos Elementos Finitos (FEM)

O Método dos Elementos Finitos é uma técnica no domínio frequência (DF) usada para solucionar equações parciais diferenciais (EPD). Embora possua uma formulação do domínio do tempo, chamado Método dos Elementos Finitos do Domínio do Tempo (FETD) sua aplicação no DF é mais usual. FEM foi concebido originalmente para análise estrutural (COURANT, 1943), passando a ser utilizado para a solução de problemas de eletromagnetismo na década de 60.

O FEM assim como o MoM converte uma equação diferencial ou integral em uma matriz de equações. O sistema de equações a ser solucionado é esparso e tipicamente simétrico. O problema de integração de uma EPD é substituído pela busca de uma função que retorna o valor mínimo de uma integral em particular (BRÜNS, 2007).

Modelos baseados no FEM contêm informações sobre a geometria do objeto de estudo (forma da malha de terra), excitação (impulso de corrente) e condições de contorno (potencial no ponto de injeção do impulso “1.0 pu” e no terra remoto “0.0 pu”). A análise utilizando FEM envolve basicamente quatro passos (JITHESH, 2003):

- discretização da região de interesse (domínio de estudo), em sub-regiões ou elementos tipicamente triangulares ou tetraédricos;
- obtenção das equações de campo nas superfícies de cada elemento;
- junção de todos os elementos na região de solução utilizando uma matriz de equações;
- solução do sistema de equações obtido.

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

FEM é uma boa alternativa para modelar meios não homogêneos. As propriedades dos materiais dos elementos da malha podem ser definidas de forma independente conferindo ao método propriedades de anisotropia do meio. Além disso, mostra ser uma metodologia apropriada para a solução de problemas de dispersão, como é o caso de análise transitória de aterramento impulsivo. Embora o MoM possua uma programação mais simples, se comparado ao FEM, o Método dos Elementos Finitos é uma técnica numérica mais versátil para manipular problemas envolvendo geometrias complexas e não homogêneas (JITHESH, 2003). Por outro lado, devido ao fato do método ser uma técnica no DF, a análise de uma banda larga de componentes de frequências provenientes de um impulso como uma descarga atmosférica, pode demandar um elevado processamento computacional.

2.4.3 Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD)

A forma mais usual de utilização do Método das Diferenças Finitas é no domínio tempo (FDTD). O método baseia-se na discretização das equações de Maxwell diretamente no tempo e espaço, dividindo o volume de interesse em células unitárias. Usualmente, a malha gerada por tais células necessita ser uniforme, sendo assim a densidade da malha é determinada pelo menor detalhe de interesse do modelo. A idéia principal do algoritmo é aplicar o conceito de diferenças finitas na forma diferencial das equações de Maxwell (BRÜNS, 2007).

FDTD foi introduzido por (YEE, 1966). Tal metodologia é numericamente estável, contanto que o passo de tempo não seja maior que certo limite chamado “*Critério de Courant-Friedrichs-Lewy*”. FDTD é um método bastante apropriado para a análise da resposta de sistemas de aterramento frente a uma descarga atmosférica possibilitando a avaliação de geometrias de malhas de terra irregulares, meios não lineares e com perdas.

A malha de elementos do FDTD é composta por células retangulares onde cada aresta é associada a um campo elétrico. É possível especificar materiais diferentes para cada aresta da malha, conferindo ao método propriedade de anisotropia para a análise de conjunto solo eletrodo (BRÜNS, 2007).

FDTD é um método iterativo, onde o campo elétrico e magnético é calculado a cada passo de tempo. Estes campos são posteriormente propagados através da malha de elementos, representando desta forma o fenômeno transitório (JITHESH, 2003). O uso típico do FDTD para a simulação de problemas de aterramento impulsivo envolve a excitação do sistema modelado por um pulso de corrente sendo registradas as totalidades dos campos ao longo das células da malha durante todo o período de transitório considerado. Na sequência, algoritmos da Transformada de Fourier permitem a extração do domínio frequência e de parâmetros de dispersão.

FDTD é um método explícito onde todo o domínio computacional é discretizado, não sendo necessário resolver um conjunto de equações. Devido a isto, é matematicamente menos denso e mais intuitivo que outros métodos numéricos como, por exemplo, o Método dos Momentos (BRÜNS, 2007).

2.4.4 Método da Modelagem por Linhas de Transmissão (TLM)

O Método da Modelagem por Linhas de Transmissão (TLM), também chamado de Método das Matrizes de Linhas de Transmissão, é um método numérico diferencial possuindo

formulações no domínio tempo e no domínio frequência. Neste método a solução do equacionamento de Maxwell é realizada por analogia com a teoria de linhas de transmissão.

No caso de problemas eletromagnéticos envolvendo fenômenos transitórios, as tensões e correntes que se propagam ao longo de uma estrutura de aterramento baseiam-se no Princípio de Huygens (CHRISTOPOULOS, 1995). Segundo este princípio, cada ponto de frente de onda produz ondas secundárias que se espalham em todas as direções. A Figura 9 mostra o princípio de propagação de um impulso unitário em um plano. Tal propagação é utilizada como base no cálculo das tensões incidentes e refletidas no algoritmo TLM.

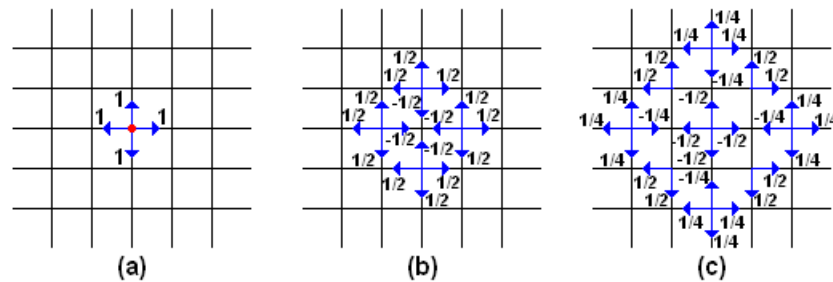


Figura 9 Propagação de um impulso: (a) impulso incidente; (b) 1ª iteração; (c) 2ª iteração.

O TLM permite a modelagem de problemas tridimensionais com estruturas de geometrias complexas, materiais com propriedades não lineares e não homogêneas, com perdas, dispersivos (dependente da frequência) e anisotrópicos, como é o caso do solo atuando como dielétrico em um sistema de aterramento (ALMAGUER, 2003).

Para a análise de transitórios eletromagnéticos, como os provenientes de descargas atmosféricas a formulação do domínio tempo mostra ser mais adequada tendo similaridades com o Método de FDTD (SADIKU, 2009). A diferença básica entre tais metodologias é que a analogia utilizada pelo TLM é feita com circuitos elétricos e não com conceitos matemáticos como é o caso do Método FDTD. Sua formulação inicial foi desenvolvida por (JOHNS, 1971; JOHNS, 1972), entretanto, seu desenvolvimento aprofundou-se a partir dos anos 80 favorecido pelos constantes avanços no desempenho computacional.

O Método TLM caracteriza-se pela divisão da região de solução em um conjunto de linhas de transmissão (segmentos). Junções são formadas, onde as linhas se cruzam formando discontinuidades de impedância. A comparação entre as equações de linhas de transmissão e as equações de Maxwell permite realizar uma equivalência entre as tensões e as correntes nas linhas e os campos eletromagnéticos na região de solução (JITHESH, 2003). A Figura 10 mostra o exemplo de uma linha de transmissão genérica utilizada como base do algoritmo TLM-1D (uma dimensão).

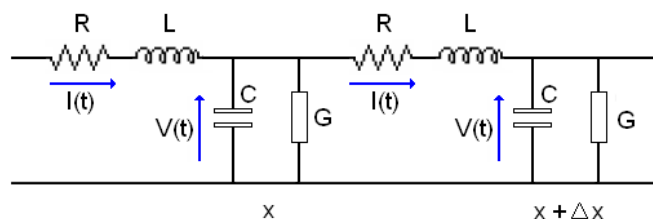


Figura 10 Modelo genérico de uma linha de transmissão.

O algoritmo TLM pode ser descrito pelos seguintes passos (PEREIRA, 2008):

- determinação das tensões incidentes em cada segmento considerando a excitação presente;
- cálculo dos campos associados aos segmentos de interesse;

- cálculo das tensões refletidas por cada segmento;
- aplicação das condições de contorno para os segmentos ou nós que se localizam nas extremidades do domínio de cálculo;
- determinação das novas tensões incidentes para a próxima iteração.

Entre as diversas vantagens do TLM pode-se citar (FERREIRA, 1999; PEREIRA, 2008):

- o cálculo de correntes, tensões, campo elétrico e magnético podem ser feitos simultaneamente na mesma simulação;
- a formulação para casos de materiais não homogêneos e não lineares é simples;
- a formulação das versões em duas e três dimensões apresenta facilidade de programação quando a versão unidimensional é conhecida;
- a resposta impulsiva e o comportamento no tempo de um sistema podem ser determinados explicitamente;
- praticamente não existem problemas com estabilidade, convergência ou soluções espúrias.

Algumas vantagens e desvantagens do TLM são similares as do FDTD, entretanto o tempo de simulação e a memória requerida dependem da complexidade da geometria a ser analisada. Em alguns casos a simulação pode se tornar mais pesada que a do FDTD (JITHESH, 2003).

Importantes critérios relacionados aos métodos numéricos apresentados anteriormente para a modelagem e análise de transientes em sistemas de aterramento podem ser encontrados na Tabela 2.

Tabela 2 Comparação entre métodos numéricos.

Modelo	Expressão Matemática	Compreensão	Precisão	Procedimento de Solução	Desempenho Computacional
MoM	Trabalhosa	Difícil	Preciso	Trabalhoso	Muito grande
FEM	Trabalhosa	Difícil	Preciso	Trabalhoso	Muito grande
FDTD	Simple	Fácil	Preciso	Simple	Pequena
TLM	Mais simples	Fácil	Preciso	Simple	Grande

Fonte: adaptação de (LIU, 2004).

2.5 Considerações Sobre o Capítulo

Neste capítulo uma breve revisão sobre o estado da arte de aspectos relevantes para a representação computacional de sistemas de aterramento foi apresentada. Importantes definições referentes à modelagem de aterramento impulsivo foram abordadas. Os principais modelos matemáticos e métodos numéricos para a simulação de fenômenos transientes foram sucintamente descritos.

Com base na revisão apresentada, verificou-se que dentre as principais metodologias passíveis para a solução e representação de problemas de compatibilidade eletromagnética, o Método da Modelagem por Linhas de Transmissão mostra ser uma das alternativas mais apropriadas para a solução do problema em questão.

Dando continuidade ao estudo, no próximo capítulo aspectos referentes à suportabilidade e modelagem de seres humanos submetidos a contato direto ou indireto com surto atmosférico serão apresentados.

3. SUPORTABILIDADE E MODELAGEM DE SERES HUMANOS SUBMETIDOS A SURTO ATMOSFÉRICO

Neste capítulo será apresentada uma revisão do estado da arte de questões pertinentes ao estudo de suportabilidade de seres humanos submetidos a surto atmosférico. Um breve histórico dos estudos relacionados com o tema é descrito com consequente apresentação dos principais mecanismos de danos em seres humanos provocados por contato com este fenômeno natural. Alguns modelos representativos encontrados na literatura também são apresentados, os quais serviram como base para a realização deste trabalho.

3.1 Introdução

Desde os primórdios da humanidade, centenas de acidentes causadas por descargas atmosféricas vêm sendo constatadas, ocasionando fatalidades e danos aos seres humanos de efeitos de curta e longa duração (MISBAH, 2011). Sabe-se que os efeitos da corrente elétrica ao passar pelo corpo humano estão prioritariamente associados a sua duração, frequência e magnitude (TELLÓ, 2007a).

Diversos são os esforços, ao longo das últimas décadas, dedicados ao estabelecimento de limites de referência e desenvolvimento de estudos vinculados aos efeitos da corrente elétrica em seres humanos e animais. Contudo, tais pesquisas consideram apenas baixas frequências e estão focados fundamentalmente na análise de corrente senoidal com frequência na ordem de 15 Hz a 100 Hz, os quais culminaram na elaboração da normatização internacional atualmente em vigor (IEC/TS 60479-1, 2005; IEC/TS 60479-2, 2007; IEC/TS 60479-3, 1998; IEC/TR 60479-5, 2007; IEEE Std 80, 2000).

A norma que aborda de forma mais direta os efeitos da corrente elétrica, gerada por um surto atmosférico, ao passar pelo corpo humano é a (IEC/TR 60479-4, 2004). Entretanto, tal normatização é basicamente qualitativa, não apresentando formulações analíticas, tão pouco parâmetros de referência vinculados a suportabilidade de seres humanos.

Embora os danos provocados por contato com uma descarga atmosférica possuam um elevado grau de severidade, 70 % dos acidentes não costumam ser fatais. De modo a reduzir estes acidentes, a adoção de práticas de proteção costuma reduzir sensivelmente a probabilidade de danos de maior severidade. Para tanto, a consideração de normas da série IEC 62305 costuma ser adotada (IEC 62305-1, 2006; IEC 62305-2, 2006; IEC 62305-3, 2006; IEC 62305-4, 2006).

A probabilidade de danos provocados por surto atmosférico está diretamente associada ao número de ocorrências de tal fenômeno. Como pode ser visto no mapa isoceráunico² apresentado na Figura 11, durante o período de Janeiro de 1998 a Maio de 2011, boa parte da

² Mapa isoceráunico determina o número de dias de tempestades por ano para uma dada região (POTIER, 2010).

ocorrência de descargas atmosféricas foi registrada nas proximidades na Linha do Equador. O Brasil, sendo um país tropical e devido a sua latitude possui uma grande concentração de ocorrência deste fenômeno natural, com conseqüente alta probabilidade de danos físicos, letais ou não, a população.

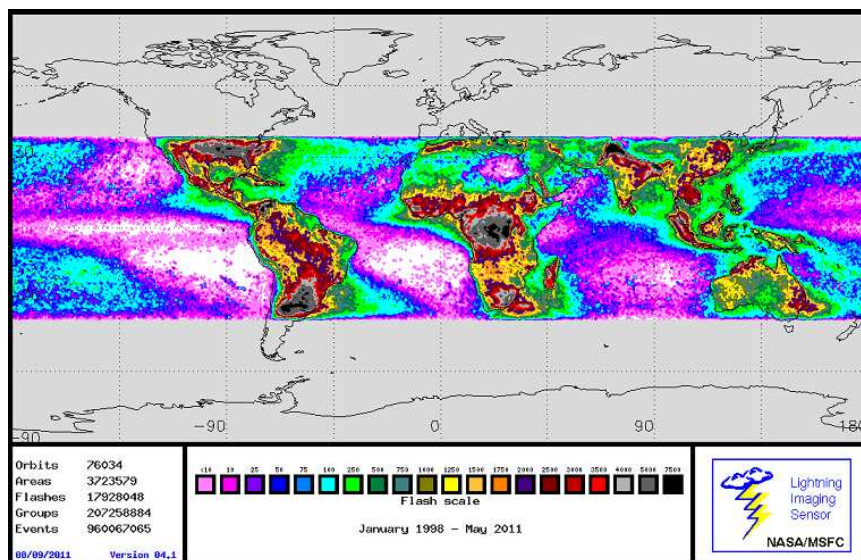


Figura 11 Mapa isocerânico (GHCC, 2011).

3.2 Breve Histórico dos Estudos de Suportabilidade

Na literatura existente são encontradas poucas informações a respeito do caminho da corrente pelo corpo humano no caso de submissão a surto atmosférico, bem como dos efeitos danosos da magnitude, tempo de exposição, frequência dentre outros parâmetros. É muito difícil verificar experimentalmente os efeitos provocados por descargas atmosféricas em seres humanos. É óbvio que seria inaceitável submeter pessoas a contato com choque elétrico, prática esta que gera polêmica até mesmo envolvendo animais. Esta pode ser a razão que estudos referentes ao caminho da corrente, magnitudes e tempos de exposição prejudiciais dentre outros tem recebido pouca atenção, tornando a modelagem uma alternativa viável (ANDREWS, 2003).

Como um experimento paralelo, em (DARVENIZA, 1980) o autor examina as propriedades elétricas da madeira usadas em estruturas do sistema de potência. A madeira é mais homogênea que o corpo de um ser humano em um todo, mas não obstante possui possíveis canais para o fluxo da corrente elétrica, assim como no caso do homem. Em seus experimentos, Darveniza submeteu tal estrutura de madeira a impulsos de corrente internos e externos. Segundo suas observações, o caminho da corrente depende de diversos fatores, em especial dois de grande relevância: a umidade da madeira (maior umidade favorece o caminho interno) e a existência de algum ponto de entrada (um parafuso na madeira por exemplo). No caso de madeira seca, onde a umidade relativa é inferior a 20% o caminho da corrente é invariavelmente externo e para o caso onde a umidade é superior a 50% o caminho é invariavelmente interno.

De posse desta informação e fazendo uma analogia, o corpo humano possui características que favorecem o caminho interno da corrente, incluindo alto percentual de umidade, baixos comprimentos e presença de locais de entrada, em especial os orifícios do crânio. Entretanto, o corpo também pode estar suscetível a passagem da corrente elétrica pelo seu lado externo, como por exemplo, no caso do mesmo estar molhado por chuva e pelo fato de não ser tão homogêneo, como o caso da madeira.

Um trabalho pioneiro de (ISHIKAWA, 1985) verificou o nível de corrente letal de um surto aplicado em coelhos anestesiados usando uma técnica de aplicação de múltiplos pulsos. Com tal estudo concluiu-se que uma energia gerada de aproximadamente 62.6J/Kg poderia ser fatal.

Paralelamente, (FLISOWSKI, 1985) desenvolveu um método analítico para prever o nível de mortalidade devido a surto atmosférico, dada uma distribuição de probabilidade da corrente de um surto, parâmetros locais e níveis fatais de corrente para o corpo humano.

Estudos referentes aos “efeitos a favor da segurança” devido ao surgimento de *flashover*³ em seres humanos atingidos por descargas atmosféricas foram apresentados por (OHASHI, 1986). 50 vítimas foram analisadas, 9 tiveram evidência de *flashover* e 41 não. Para o primeiro caso, 5 sobreviveram e para o último caso apenas 6. Embora o estudo seja subjetivo, os resultados são impressionantes. Deste modo, concluiu-se que a ocorrência de um *flashover* mostrou ser um mecanismo a favor da segurança. Em um experimento com animais, constatou-se também que se um *flashover* ocorrer em menos de 20 μ s após o contato com um surto, as chances de sobrevivência são muito maiores, se comparadas à ocorrência de um *flashover* tardio.

3.3 Mecanismo de Danos em Seres Humanos Provocados por Surto Atmosférico

Danos físicos em seres humanos provocados por surtos atmosféricos podem ser examinados em diferentes níveis incluindo efeito fisiológico (curta duração), patofisiológico (longa duração) e térmico. Tais efeitos estão associados ao possível caminho do fluxo de energia pelo corpo, podendo ser interno ou externo. Segundo (COOPER, 2008; IEC/TR 60479-4, 2004) os mecanismos mais comuns de lesões em seres humanos são os seguintes:

Surto direto: ocorre quando uma descarga atmosférica atinge diretamente a vítima. Sua ocorrência é mais comum em áreas abertas quando uma pessoa está em local totalmente desprotegido. A Figura 12a ilustra este mecanismo.

Potencial de contato ou potencial de toque: ocorre quando uma pessoa toca algum objeto atingido por um surto atmosférico ou está em contato com algo atingido a uma longa distância, neste caso chamado de potencial transferido. Tem-se como exemplo o contato com encanamentos e cercas metálicas, equipamentos elétricos com fio, telefone dentre outros como pode ser visto na Figura 12b. Um gradiente de potencial é estabelecido no objeto do ponto de injeção do surto para o terra.

Descarga lateral: ocorre quando uma descarga atmosférica atinge um objeto como uma árvore ou uma edificação, onde parte do surto “salta” em direção a uma pessoa que está relativamente próxima. A corrente do surto é dividida em dois caminhos na proporção inversa de sua resistência. Este mecanismo é ilustrado na Figura 12c.

Potencial de passo: ocorre quando uma descarga atmosférica atinge o solo ou algum objeto aterrado ocasionando uma diferença de potencial entre os dois pés de uma pessoa em contato com o mesmo. Usualmente, a corrente elétrica flui pelas pernas na parte de baixo do corpo. Este mecanismo é ilustrado na Figura 12d.

Potencial de passo com descarga lateral: ocorre quando uma descarga atmosférica atinge o solo ou algum objeto aterrado ocasionando uma diferença de potencial no mesmo com consequente descarga lateral entre duas pessoas. A Figura 12e contextualiza este mecanismo.

³ A norma IEC/TR 60479-4 define *flashover* como sendo um arco elétrico formado sobre a superfície do corpo carregando uma porção significativa da corrente.

Líder ascendente: ocorre quando uma pessoa serve como caminho de um dos múltiplos líderes ascendentes induzidos por um líder descendente. Neste caso a corrente elétrica flui pela vítima de baixo para cima. Informações complementares sobre os mecanismos de formação de líderes podem ser encontrados em (POTIER, 2010).

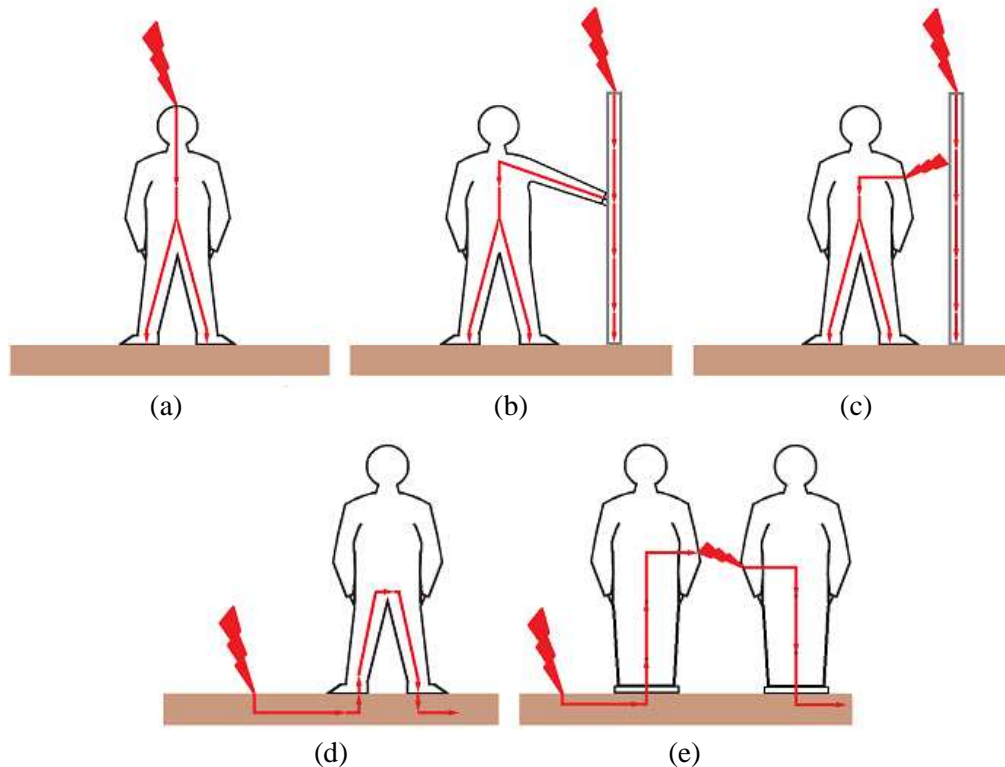


Figura 12 Mecanismo de contato de surto atmosférico em seres humanos.

A Tabela 3 quantifica uma estimativa da distribuição percentual dos cinco mecanismos mais comuns de danos causados em seres humanos por descargas atmosféricas (COOPER, 2008).

Tabela 3 Estimativa de danos causados por descargas atmosféricas em seres humanos.

Mecanismo	Frequência de ocorrência (%)
Surto direto	3 a 5
Potencial de contato	15 a 25
Descarga lateral	20 a 30
Potencial de passo	40 a 50
Líder ascendente	10 a 15

Usualmente, um surto atmosférico direto está associado aos maiores danos, enquanto potenciais de passo são no mínimo prejudiciais. Potenciais gerados por contato ou devido a descargas laterais, via de regra, estão associados à consequências intermediárias (ANDREWS, 2003).

3.4 Representação e Modelagem do Corpo Humano

Segundo a norma IEC (IEC/TS 60479-1, 2005) a resistência do corpo humano depende da umidade, temperatura e de diversas propriedades físicas do mesmo. Considera-se ainda que o

corpo humano possui duas impedâncias a saber: a externa ou da pele e a interna. A parte interna do corpo possui menor impedância se comparada à impedância da pele. Tal grandeza pode ser representada pela combinação de componentes resistivos e capacitivos. Ainda, a impedância do corpo é dependente da tensão, frequência e da área de contato, considerando a passagem da corrente elétrica pelo mesmo.

Deste modo, conforme o pressuposto apresentado verifica-se que inúmeros são os fatores que influenciam o valor da impedância do corpo humano e conseqüentemente os possíveis caminhos da corrente elétrica pelo mesmo. Este conjunto aleatório de possibilidades pode convergir para um dano fatal ou não, no caso de submissão a um dos vários mecanismos de contato com um surto atmosférico. Conclui-se então que qualquer afirmativa para qualificação de um dano com base em um modelo representativo é conjectural. Um modelo é capaz de sinalizar e quantificar grandezas elétricas e ou magnéticas envolvidas no processo, mas não de afirmar a severidade de um dano (ANDREWS, 2003).

Uma aproximação para representar o corpo humano é modelar o mesmo por uma associação de componentes elétricos, sendo um grupo de componentes associado a uma determinada parte do corpo. Na literatura podem ser encontrados modelos que simulam o comportamento de diferentes órgãos de um ser humano como o coração por exemplo (SHI, 2009), além de modelos generalistas, os quais representam o corpo em sua totalidade. Este último modelo é o de interesse para este estudo (ANDREWS, 2003; MISBAH, 2011).

O modelo proposto por (ANDREWS, 2003) considera uma resistência interna de $1\text{ k}\Omega$ distribuída entre o torso, braços e pernas. Para a representação da pele, como sua resistividade é relativamente maior que a resistência interna do corpo, a mesma é modelada pela associação em paralelo de um resistor e um capacitor de valores de $10\text{ k}\Omega$ e $0.25\text{ }\mu\text{F}$ respectivamente. Novamente, um componente RC neste caso com valor capacitivo de $10\mu\text{F}$ representa a cabeça no modelo. O Modelo de Andrews pode ser visto na Figura 13. Adicionalmente, nas simulações realizadas foi considerada uma resistência de contato com o solo de $300\text{ }\Omega$ para cada pé ($150\text{ }\Omega$ ambos os pés).

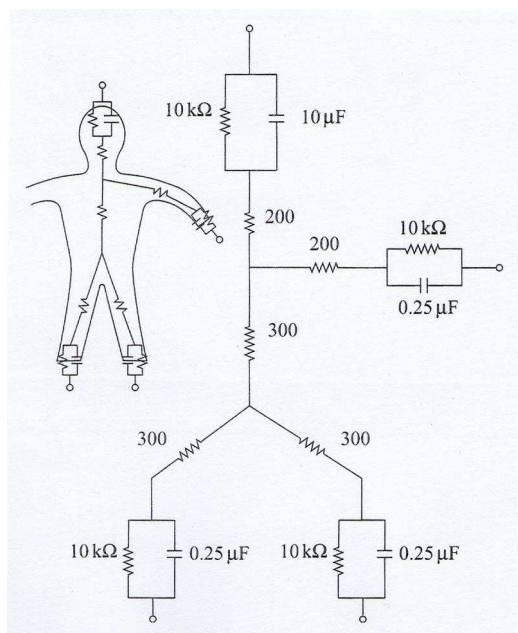


Figura 13 Modelo do corpo humano (ANDREWS, 2003).

Em seus estudos Andrews avaliou a resposta do corpo humano frente os mecanismos de surto direto com a sem a presença de *flashover*, potencial de passo e contato mediado por linha

telefônica. Com base nas simulações realizadas Andrews obteve as conclusões expostas a seguir.

- Para o caso de surto direto sem a presença de *flashover* onde um pulso de corrente foi injetado na parte superior do modelo (crânio), a corrente é transferida internamente atingindo altos valores de magnitude. Durante o período da passagem desta corrente pela parte interna do corpo, a capacitância da pele é carregada até um limiar, quando o capacitor descarrega ocorrendo um momentâneo aumento da corrente interna. Este limite é chamado de *skin breakdown*. Tal mecanismo de contato é compreendido pelo autor como extremamente danoso e possivelmente fatal. Neste caso a corrente seria conduzida diretamente ao coração pelos vasos sanguíneos. Com base em uma extrapolação do trabalho de (DALZIEL, 1972), Andrews concluiu que um pulso de duração de 50 μ s com magnitude superior a 16.4 A pode ser letal.
- Considerando novamente um surto direto aplicado sobre a cabeça, mas para este caso com a ocorrência de *flashover* a tensão e corrente interna geradas possuem magnitudes bem inferiores se comparada ao caso da não ocorrência deste fenômeno. No momento da ocorrência do *flashover*, a tensão e corrente interna decaem rapidamente para zero, e a maioria da corrente é transferida externamente para o terra. Novamente, com base no estudo de (DALZIEL, 1972), Andrews conclui que mesmo com a ocorrência de *flashover* um surto direto seria fatal.
- Para o caso de EPR, as simulações realizadas consideram potencial de passo gerado em um ser humano distante 10 m e 20 m do ponto de injeção de um surto no solo. Com base nas simulações, foi concluído que o coração não sofreria um risco elevado de dano permanente, já que o mesmo não se encontra no caminho mais provável da passagem da corrente elétrica pelo corpo. Desta forma, a probabilidade de uma fatalidade provocada por potencial de passo é reduzida, se comparada ao contato com surto direto.
- Tendo em vista a possibilidade de submissão a surto atmosférico por contato mediado por uma linha telefônica, Andrews propõem a inclusão de um elemento capacitivo ao modelo representando o acoplamento entre a orelha, mão e telefone. O Autor argumenta que os possíveis danos causados seriam de origem acústica e elétrica, sendo este último o foco do trabalho. Partindo da linha telefônica, o caminho mais provável da corrente elétrica passaria pelo aparelho e crânio em direção a um caminho de retorno pelos pés, ou outra parte do corpo em contato com alguma estrutura aterrada. Com base em suas simulações, Andrews concluiu que a corrente e o respectivo tempo de exposição não seriam suficientes para causar fibrilação ventricular do coração, desta forma a probabilidade de dano letal seria baixa.

Outra observação dos estudos de Andrews é o aumento da temperatura interna do coração, considerado com volume aproximado de 200 mL. Com base em seu modelo e considerando um surto de corrente de 5 kA (8 x 20) μ s, estimou-se um aumento de 0.04 °C para a condição de surto direto com *flashover* e de 224 °C para o contato com surto direto sem *flashover*, neste último caso com forte evidência de dano térmico. Adicionalmente, aplicações do Modelo de Andrews podem ser encontradas em (DIAS, 2009; DIAS, 2010; GAZZANA, 2011).

Posteriormente, Misbah apresentou um modelo do corpo humano com algumas diferenças do modelo proposto por Andrews (MISBAH, 2011). Conforme ilustra a Figura 14, neste modelo pode ser observada a inclusão de indutâncias na região do torso, resistência da palma da mão e elementos RC representando os sapatos. Em suas simulações, Misbah avaliou tensões e correntes em diversos pontos do corpo considerando a exposição do modelo a surto direto, potencial de contato, descarga lateral e EPR.

Em seu trabalho, Misbah chegou às seguintes conclusões descritas a seguir.

- Para o caso de descarga direta sobre a cabeça, espera-se que o fluxo de corrente dessa em direção ao peito, pernas e pés, devido à tendência da corrente fluir para o terra. Pelo fato da corrente elétrica ter grande probabilidade de passar pelo cérebro e órgãos vitais como o coração, existe uma grande chance deste mecanismo de contato ser letal.
- No caso de potencial de passo espera-se que os pés e as pernas sofram as maiores consequências do contato com o surto, ocasionado em prováveis contrações musculares e paralisia temporária da cintura para baixo.
- Considerando o contato com algum objeto atingido por um surto (potencial de contato), a tendência da corrente elétrica é fluir da mão, passando pelo braço, peito, pernas e pés, sendo este o caminho natural para o terra. Novamente, caso o coração estiver no caminho da corrente, o potencial de contato gerado pode ser fatal.
- No mecanismo de descarga lateral, um provável caminho do surto é se dissipar a partir do peito para o restante do corpo indo em direção a terra. Dependendo do ponto de contato, este mecanismo pode causar desde queimaduras na pele até parada respiratória.

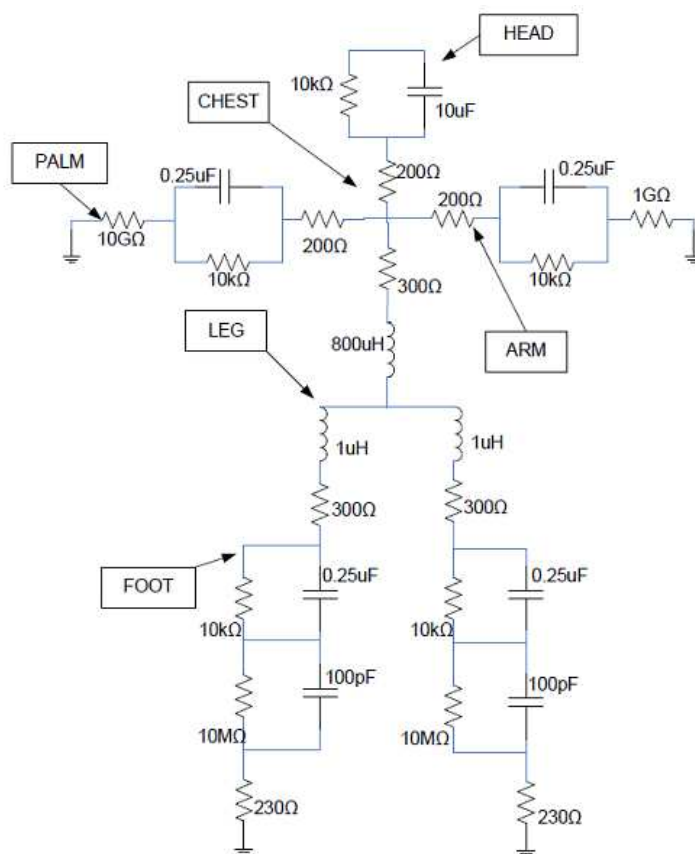


Figura 14 Modelo do corpo humano (MISBAH, 2011).

Outros modelos representativos do corpo humano podem ser encontrados na literatura. Carlos Portela representou o corpo humano por meio de sua impedância equivalente em seu trabalho referente à análise do comportamento transiente de uma malha de aterramento frente a surto atmosférico (PORTELA, 1997c).

Um estudo relacionado à avaliação de transitórios eletromagnéticos em sistemas de proteção contra descarga atmosférica – SPDA, considerando a presença de um ser humano na superfície do solo é apresentado em (ALA, 2002). Neste trabalho, o efeito do acoplamento

entre a parte aérea do SPDA e o sistema de aterramento é avaliado de forma a estimar os potenciais de passo e toque gerados, considerando a presença do ser humano, o qual é representado novamente pela sua impedância equivalente.

Um modelo cilíndrico simplificado foi utilizado por (POILJAK, 2007) em seu estudo relacionado à densidade de corrente induzida no corpo humano devido ao campo elétrico irradiado por para-raio atingido por descarga atmosférica. Entretanto, tal modelo mostra ser mais apropriado para estudos de suportabilidade referente a campos eletromagnéticos.

A representação do corpo por meio de um único componente resistivo, idealizando novamente um modelo simplificado, foi utilizada por Becerra e Cooray (BECERRA, 2009) em seus estudos referentes à interação do mecanismo de líderes ascendentes com seres humanos.

3.5 Considerações Sobre o Capítulo

Foi apresentada neste capítulo uma contextualização de aspectos referentes aos efeitos da corrente elétrica em seres humanos em contato com surto atmosférico. Esforços em termos de pesquisas experimentais e probabilísticas para estabelecer limites e modelos de modo a contribuir para o estudo de suportabilidade de seres humanos foram apresentados.

Os principais mecanismos de danos causados em seres humanos provocados por contato direto ou indireto com surto atmosférico foram relatados, sendo enfatizados os prováveis caminhos da corrente pelo corpo com seu consequente grau de lesão, podendo ser fatal ou não.

Alguns dos modelos encontrados na literatura para representar o corpo humano mediante contato com surto atmosférico também foram descritos, onde simulações para diferentes mecanismos de contato deram margem para a inferência de prováveis consequências causadas por este fenômeno natural.

Vale ressaltar que todo o estudo aqui apresentado, bem como o estado da arte no que diz respeito à suportabilidade de seres humanos não é totalmente consolidado. Percebe-se claramente uma carência de estudos mais aprofundados sobre este tema. Fator este que pode ser justificado pela dificuldade de obtenção de dados reais e experimentais. Esta barreira dificilmente será rompida principalmente por questões éticas, sendo impraticável a submissão de seres humanos ao contato com corrente elétrica da ordem de grandeza de um surto atmosférico. Entretanto, percebe-se uma tendência no desenvolvimento de pesquisas com enfoque qualitativo e a utilização de modelos matemáticos e analogias para representar o corpo humano e sua interação com as descargas atmosféricas. Sendo assim, toda e qualquer contribuição nesta área é de grande valia.

Dando continuidade ao trabalho, no próximo capítulo aspectos práticos referentes à implementação computacional do Método de Modelagem por Linhas de Transmissão em uma dimensão (TLM-1D) para a representação de sistemas de aterramento impulsivo e em altas frequências serão apresentados. Posteriormente, as grandezas elétricas determinadas por tal método serão utilizadas como dados de entrada para idealizar um estudo de sensibilidade do comportamento do corpo humano submetido a contato com surto atmosférico.

4. O MÉTODO TLM EM UMA DIMENSÃO APLICADO A ANÁLISE DE ATERRAMENTO IMPULSIVO

Este capítulo tem por objetivo apresentar aspectos voltados ao desenvolvimento de algoritmo baseado no Método da Modelagem por Linhas de Transmissão em Uma Dimensão TLM-1D. O capítulo está focado na descrição do método no ponto de vista de modelagem e análise de aterramento impulsivo composto por eletrodo horizontal ou vertical. Partindo do entendimento do problema, o equacionamento fundamental e o processo iterativo de solução propiciado pelo método são abordados.

4.1 Introdução

Um dos grandes desafios da humanidade é tentar compreender o mundo ao seu redor e as diversas inter-relações presentes no mesmo. Ao se deparar com tais questionamentos a alternativa mais plausível é tentar trazer um determinado problema para um domínio de conhecimento e experiência, de modo que tal questionamento possa ser melhor compreendido e posteriormente representado. Com base em tal premissa, todo o processo de aprendizagem e construção do conhecimento, referente a um processo presente na natureza, pode ser representado por meio de um modelo.

Um modelo por sua vez deve ser o mais conciso possível, de modo que a problemática em questão possa ser estimada de forma clara e compreensível. Deste modo, o uso de analogias pode ser uma alternativa viável para o tratamento de um fenômeno presente na natureza e para tanto, torna-se necessário a utilização de um método de cálculo.

Segundo (CHRISTOPOULOS, 2006) no ponto de vista de modelagem numérica, um modelo pode ser desenvolvido com base em cinco passos, a saber: conceituação; formulação; implementação numérica; computação e validação. Neste contexto, serão apresentados no capítulo aspectos práticos referentes ao desenvolvimento de algoritmo computacional para a análise de aterramento impulsivo utilizando o Método da Modelagem por Linha de Transmissão em Uma Dimensão (TLM-1D).

Vale ressaltar que o objetivo do estudo aqui descrito está focado na apresentação da formulação necessária para a representação do problema em questão por meio de algoritmo computacional. Desta forma, o detalhamento e a dedução do equacionamento do Método TLM-1D para a solução de problemas de compatibilidade eletromagnética de forma generalizada podem ser encontrados em (CHRISTOPOULOS, 1995; FACCIONI, 1997).

4.2 Conceituação do Problema

A primeira etapa relacionada à escolha de um modelo está vinculada à concepção do problema a ser solucionado. Neste contexto, a decisão por uma dada técnica de modelagem exerce papel fundamental para o sucesso da representação do real. Tendo como foco do

estudo aqui apresentado: a necessidade de analisar o comportamento de um condutor de aterramento submetido a um surto atmosférico de modo a determinar grandezas elétricas sobre o mesmo e suas inter-relações com o meio, constatou-se que o Método TLM em uma dimensão é capaz de representar o fenômeno físico com uma boa precisão (AHMAD, 2008b; AHMAD, 2008c; MATTOS, 2009).

Deste modo, destacam-se as características do problema em questão:

- consideração de eletrodo horizontal de aterramento (contrapesos) enterrado a uma profundidade constante ao longo de toda a sua extensão;
- consideração de eletrodo vertical de aterramento (haste) totalmente enterrado no solo;
- consideração de solo homogêneo composto por uma camada horizontal representado pela sua resistividade elétrica (ρ), permissividade elétrica (ϵ) e permeabilidade magnética (μ) em contato direto com uma camada de ar de altura considerada infinita. A variação dos parâmetros do solo com a frequência não é levada em consideração na modelagem;
- consideração de um pulso de corrente ou tensão, representando um surto atmosférico, injetado em uma das extremidades do condutor de aterramento;
- necessidade de determinação da tensão, corrente, resistência e campo elétrico ao longo do condutor de aterramento;
- possibilidade de inclusão do fenômeno de ionização do solo;
- necessidade de cálculo das grandezas anteriormente citadas com o passar do tempo, possibilitando a análise em regime transitório no domínio tempo.

A Figura 15 contextualiza o conjunto surto atmosférico, solo e eletrodo utilizados na modelagem.

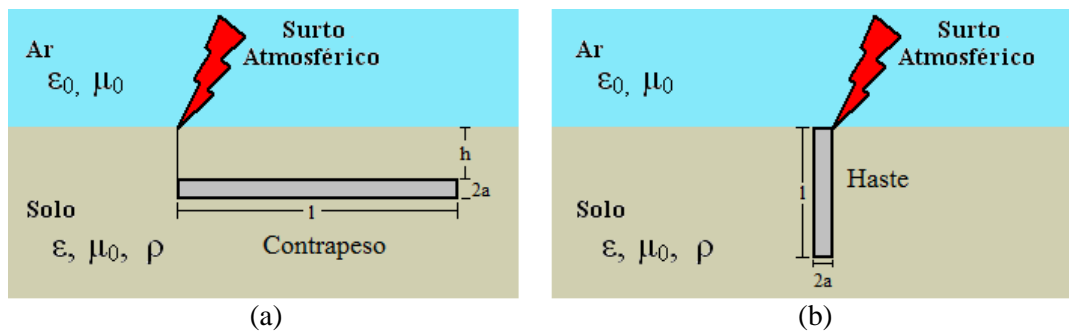


Figura 15 Conjunto surto atmosférico, solo e eletrodo: (a) contrapeso; (b) haste.

Como o estudo proposto objetiva a consideração de um eletrodo horizontal ou um eletrodo vertical de aterramento, a utilização de um método numérico em uma dimensão mostra ser apropriada (AHMAD, 2008a).

4.3 Formulação Analítica

Para a representação de um elemento de linha de transmissão com perdas possuindo comprimento x , uma associação de elementos resistivo (R), indutivo (L), condutivo (G) e capacitivo (C) pode ser utilizada com base em um modelo do tipo π conforme ilustra a Figura 16. Neste modelo de linha, os componentes R , L , G e C são a resistência e indutância série e a admitância e capacitância *shunt* respectivamente. Desta forma, o conjunto de elementos presentes na Figura 16 pode ser considerado a célula básica do Modelo TLM em uma dimensão TLM-1D.

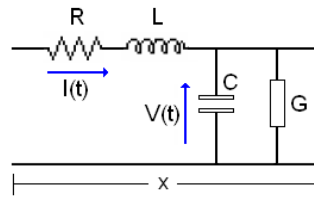


Figura 16 Célula básica de uma linha de transmissão em uma dimensão.

Considerando a associação série de diversas células com o mesmo comprimento x pode-se determinar, com base no algoritmo TLM-1D, tensões e correntes nos pontos de interconexão entre duas células adjacentes para um dado instante de tempo. A título de contextualização, a conexão entre duas células é definida como nó, e o trecho entre dois nós é definido como segmento da linha.

Desta forma, um condutor de aterramento de comprimento l pode ser representado pela associação de diversas células ou segmentos de linha conforme ilustra a Figura 17.

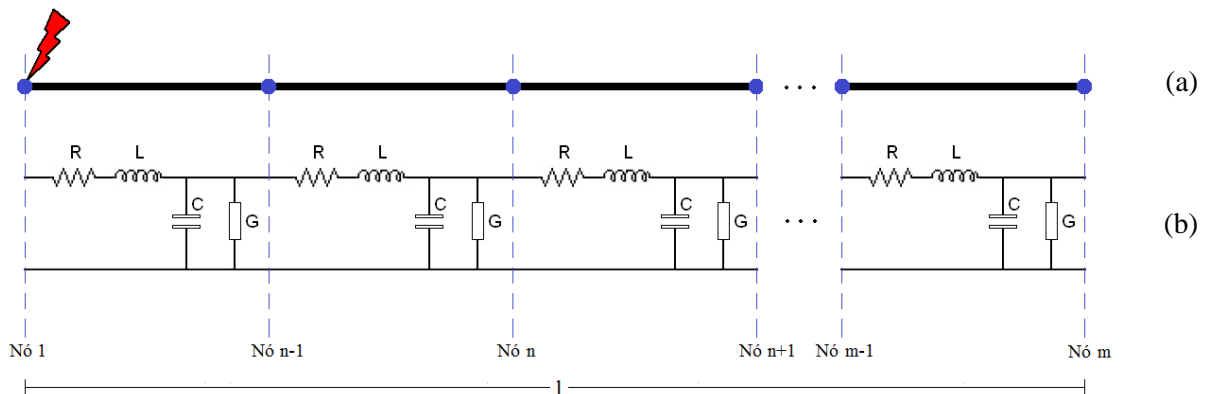


Figura 17 Representação de um condutor de aterramento por segmentos de linha de transmissão: (a) condutor de aterramento; (b) linha de transmissão equivalente.

A partir das Leis de Kirchhoff para tensão e corrente e utilizando algumas operações matemáticas pode-se determinar a impedância característica da linha (impedância de surto) e o tempo de propagação de um pulso entre dois nós adjacentes conforme apresentado nas equações 4.1 e 4.2 respectivamente. Desta forma, um segmento de linha apresentado na Figura 16 pode ser representado por seu circuito equivalente conforme ilustra a Figura 18.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (4.1)$$

$$\Delta t = \sqrt{L \cdot C} \quad (4.2)$$

Onde:

Z_0 impedância característica da linha (Ω);

L indutância da linha (H);

C capacitância da linha (F);

Δt passo de tempo (s).

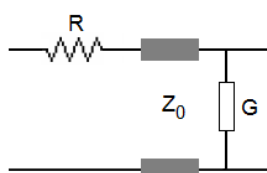


Figura 18 Circuito equivalente de um segmento de linha de transmissão.

4.3.1 Cálculo das Tensões e Correntes sobre os Nós

Com base em uma implementação discreta do Princípio de Huygens adaptado ao espaço de uma dimensão (JOHNS, 1974), um impulso de tensão se propaga de um nó a um nó consecutivo em um instante de tempo Δt . Posteriormente, o impulso propaga-se para o próximo nó adjacente. Este processo de propagação ocorre desde o ponto de injeção de um surto em uma das extremidades da linha até o final da mesma. Cada segmento é entendido como uma linha independente. Um nó é visto como o encontro de duas linhas, cuja conexão é idealizada de acordo com a incidência e a reflexão do impulso de tensão.

Analisando a Figura 17, verifica-se que existem três tipos distintos de nós presentes no processo de propagação:

- primeiro nó ou nó junto ao ponto de injeção do surto (Nó 1) com tensões incidentes e refletidas pelo lado direito do nó;
- segundo nó (Nó n-1) ao penúltimo nó (Nó m-1) com tensões incidentes e refletidos pelo lado esquerdo e direito do nó;
- último nó (Nó m) com tensões incidentes e refletidas pelo lado esquerdo do nó.

Desta forma, cada um destes três tipos de nós necessita ser tratado separadamente. Partindo então da utilização do equivalente de Thévenin, as tensões sobre os mesmos podem ser determinadas conforme apresentado a seguir.

A título de definição, são consideradas as seguintes grandezas no processo de propagação:

- ${}_k Vd_n^i$ tensão incidente pelo lado direito de um nó n em um instante de tempo k (V);
- ${}_k Ve_n^i$ tensão incidente pelo lado esquerdo de um nó n em um instante de tempo k (V);
- ${}_k Vd_n^r$ tensão refletida pelo lado direito de um nó n em um instante de tempo k (V);
- ${}_k Ve_n^r$ tensão refletida pelo lado esquerdo de um nó n em um instante de tempo k (V);
- ${}_k Vd_n$ tensão a direita do nó n em um instante de tempo k (V);
- ${}_k Ve_n$ tensão a esquerda do nó n em um instante de tempo k (V);
- ${}_k V_n$ tensão sobre o nó n em um instante de tempo k (V);
- ${}_k I_n$ corrente sobre o nó n em um instante de tempo k (A).

4.3.1.1 Primeiro Nó

Para a propagação de um impulso partindo do primeiro nó, aqui representado pelo ponto de inserção do surto no eletrodo de aterramento, observam-se tensões incidentes e refletidas apenas a direita deste nó (Nó 1) conforme apresentado na Figura 19.

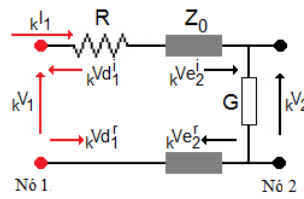


Figura 19 Tensões incidentes e refletidas sobre o primeiro nó (Nó 1) para um instante de tempo k .

Considerando um impulso de corrente inserido no primeiro nó e assumindo que a fonte de corrente é ideal com resistência interna = 0, onde ${}_k I_f$ é a corrente injetada no nó 1 no instante de tempo k tem-se:

$${}_k I_1 = {}_k I_f \quad (4.3)$$

$${}_k V_1 = {}_k I_1 (R + Z_0) + 2 \cdot {}_k V d_1^i \quad (4.4)$$

A tensão à direita e a tensão refletida do primeiro nó são dadas pelas equações 4.5 e 4.6.

$${}_k V d_1 = 2 \cdot {}_k V d_1^i + {}_k I_1 \cdot Z_0 \quad (4.5)$$

$$V d_1^r = {}_k V d_1 - {}_k V d_1^i \quad (4.6)$$

A conexão com o próximo instante de tempo ($k+1$) é estabelecida pela equação 4.7.

$${}_{k+1} V d_1^i = {}_k V e_2^r \quad (4.7)$$

4.3.1.2 Nós Intermediários

No processo de propagação, um nó intermediário n está sujeito a tensões incidentes e refletidas pelo lado esquerdo e direito conforme ilustra a Figura 20.

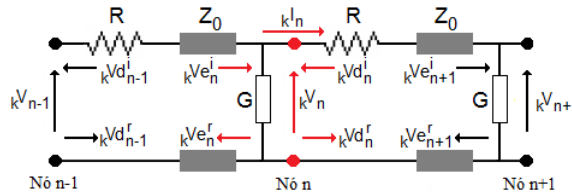


Figura 20 Tensões incidentes e refletidas sobre os nós intermediários.

A tensão e a corrente sobre um nó n pode ser determinada utilizando as equações 4.8 e 4.9 respectivamente.

$${}_k V_n = \frac{2 \cdot {}_k V e_n^i + 2 \cdot {}_k V d_n^i}{\frac{1}{Z_0} + \frac{1}{R + Z_0} + G} \quad (4.8)$$

$${}_k I_n = \frac{{}_k V_n - 2 \cdot {}_k V d_n^i}{(R + Z_0)} \quad (4.9)$$

As equações 4.10 e 4.11 estabelecem as tensões a esquerda e a direita do nó n respectivamente. Tem-se então:

$${}_k V e_n = {}_k V_n \quad (4.10)$$

$${}_k Vd_n = 2 \cdot {}_k Vd_n^i + {}_k I_n Z_0 \quad (4.11)$$

As tensões refletidas a esquerda e a direita do nó intermediário n são expressas com base nas equações 4.12 e 4.13 apresentadas a seguir.

$${}_k Ve_n^r = {}_k Ve_n - {}_k Ve_n^i \quad (4.12)$$

$${}_k Vd_n^r = {}_k Vd_n - {}_k Vd_n^i \quad (4.13)$$

A conexão com o momento seguinte ($k+1$) pode ser determinada utilizando as equações 4.14 e 4.15 como segue.

$${}_{k+1} Ve_n^i = {}_k Vd_{n-1}^r \quad (4.14)$$

$${}_{k+1} Vd_n^i = {}_k Ve_{n+1}^r \quad (4.15)$$

4.3.1.3 Último Nó

Para o último nó, representando a extremidade do condutor de aterramento, considera-se a conexão de uma carga RC ao circuito. Deste modo, o fim da linha é entendido como um circuito aberto com ${}_k I_m = 0$. Para este nó, considera-se tensões refletidas e incidentes apenas pelo seu lado esquerdo. A Figura 21 ilustra o fenômeno de propagação no último nó do Modelo TLM-1D.

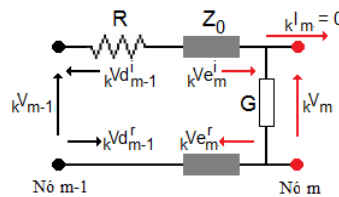


Figura 21 Tensões incidentes e refletidas sobre o último nó.

Assim como para os demais nós do modelo, a tensão sobre o último nó pode ser obtidas pela equação 4.16.

$${}_k V_m = \frac{2 \cdot {}_k Ve_m^i}{\frac{Z_0}{Z_0} + G} \quad (4.16)$$

A equação 4.17 determina a tensão refletida a esquerda do último nó.

$${}_k Ve_m^r = {}_k V_m - {}_k Ve_m^i \quad (4.17)$$

A conexão com próximo instante de tempo dá-se pelo cálculo da tensão incidente à esquerda do último nó, a qual pode ser obtida com o uso da equação 4.18.

$${}_{k+1} Ve_m^i = {}_k Vd_{m-1}^r \quad (4.18)$$

4.3.2 Cálculo dos Elementos do Circuito

Para a representação de um condutor de aterramento conforme modelo de linha apresentado na Figura 17, os parâmetros R , L , G e C precisam ser determinados. Para tanto, torna-se necessário conhecer a priori os parâmetros de linha por unidade de comprimento. Algumas formulações, ligeiramente diferentes, podem ser encontradas na literatura para o cálculo de

tais parâmetros (GRCEV, 2005; GRCEV, 2009c, VELASQUEZ, 1984). A seguir, a formulação adotada para o desenvolvimento deste trabalho será apresentada.

Considerando um condutor de aterramento enterrado em solo homogêneo com valor de resistividade elétrica ρ_c , raio uniforme a e de seção transversal consideravelmente menor que o comprimento do eletrodo, a resistência por unidade de comprimento pode ser estimada pela equação 4.19 (VELASQUEZ, 1984).

$$R_d = \frac{\rho_c}{\pi \cdot a^2} \quad (4.19)$$

Para o caso de um condutor enterrado horizontalmente no solo a uma profundidade h , sua indutância, capacitância e condutância por unidade de comprimento podem ser determinadas pelas equações 4.20, 4.21 e 4.22 apresentadas a seguir (VELASQUEZ, 1984).

$$L_d = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \left[\ln \left(\frac{2 \cdot l}{\sqrt{2 \cdot h \cdot a}} \right) - 1 \right] \quad (4.20)$$

$$C_d = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}{\ln \left(\frac{2 \cdot l}{\sqrt{2 \cdot h \cdot a}} \right) - 1} \quad (4.21)$$

$$G_d = \frac{2 \cdot \pi}{\rho_s \cdot \left[\ln \left(\frac{2 \cdot l}{\sqrt{2 \cdot h \cdot a}} \right) - 1 \right]} \quad (4.22)$$

Considerando um condutor enterrado verticalmente no solo, os parâmetros indutância, capacitância e condutância por unidade de comprimento podem ser obtidos com base nas equações 4.23, 4.24 e 4.25 (GRCEV, 2005).

$$L_d = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot l}{a} \right) \quad (4.23)$$

$$C_d = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}{\ln \left(\frac{2 \cdot l}{a} \right)} \quad (4.24)$$

$$G_d = \frac{2 \cdot \pi}{\rho_s \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot l}{a} \right)} \quad (4.25)$$

Onde:

- R_d resistência por unidade de comprimento (Ω/m);
- L_d indutância por unidade de comprimento (H/m);
- C_d capacitância por unidade de comprimento (F/m);
- G_d condutância por unidade de comprimento (S/m);
- ρ_c resistividade do condutor (Ωm);
- ρ_s resistividade do solo (Ωm);
- ϵ_r permissividade relativa do solo;

ε_0	permissividade do vácuo (F/m);
μ_0	permeabilidade do vácuo (H/m);
a	raio do eletrodo (m);
l	comprimento do eletrodo (m);
h	profundidade do enterramento do eletrodo (m).

Com os parâmetros de linha por unidade de comprimento e considerando a distribuição constante de R , L , C e G ao longo de cada segmento da linha (parâmetros distribuídos), pode-se por fim determinar o valor dos componentes presentes no Modelo TLM-1D, onde Δx é o comprimento do segmento de linha em metros. Tem-se então:

$$R = R_d \cdot \Delta x \quad (4.26)$$

$$L = L_d \cdot \Delta x \quad (4.27)$$

$$C = C_d \cdot \Delta x \quad (4.28)$$

$$G = G_d \cdot \Delta x \quad (4.29)$$

Adicionalmente, a determinação dos componentes resistivos do circuito TLM considerando o efeito pelicular sob altas frequência pode ser adotado (JOHNSON, 1950). Entretanto, simulações mostraram que este efeito pode ser considerado desprezível para a faixa de frequência sob estudo.

4.3.3 Cálculo do Comprimento do Segmento de Linha

Com base na Teoria de Linhas de Transmissão, um eletrodo de aterramento deve ser dividido em um determinado número de pequenos segmentos, sendo que o máximo comprimento de cada segmento requerido para se obter uma boa precisão na simulação depende da máxima frequência do impulso injetado como excitação do sistema (LIU, 2004). Ainda, considerando as limitações de uma solução *quase estacionária*, o comprimento de cada segmento deve ser escolhido de forma a atender a relação abaixo (CECCONI, 2005; GRCEV, 2009e).

$$l_{seg} < \frac{\lambda}{10} \quad (4.30)$$

A expressão da constante de propagação em um meio com perdas e o comprimento de onda são dados pelas equações 4.31 e 4.32.

$$\gamma = \sqrt{j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{max} \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \left(\frac{1}{\rho_s} + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{max} \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \right)} = \beta_1 + j \cdot \beta_2 \quad (4.31)$$

$$\lambda = \frac{2 \cdot \pi}{\beta_2} \quad (4.32)$$

Onde:

γ	constante de propagação;
β_1	constante de atenuação;
β_2	constante de fase;
λ	comprimento de onda (m);

f_{max} máxima frequência do impulso injetado (Hz);

μ_r permeabilidade relativa do solo;

l_{seg} máximo comprimento do segmento (m).

Atendendo a equação 4.30, o número mínimo de nós N presentes na segmentação de uma linha de comprimento l deve ser um número inteiro de valor superior a relação $N \geq l / l_{seg}$. Desta forma, o comprimento de cada segmento Δx é dado pela equação a seguir.

$$\Delta x < \frac{l}{N - 1} \quad (4.33)$$

4.3.4 Condições de Contorno

Tendo em vista que o TLM é um método diferencial, torna-se necessário estabelecer condições de contorno na região de fronteira. Desta forma, assume-se que:

- a corrente elétrica na origem do condutor (Nó 1) é igual a corrente do surto de excitação ${}_k I_1 = {}_k I_f$;
- a outra extremidade do condutor é entendida como sendo um circuito aberto. Considera-se então que ${}_k I_m = 0$ e conseqüentemente ${}_k V_m \neq 0$.

Adicionalmente, considera-se que todas as tensões incidentes à esquerda e à direita de todos os nós no primeiro instante de tempo ($k = 1$) são iguais a Zero.

4.4 Implementação Numérica

Tendo em vista a caracterização do problema e utilizando a formulação analítica anteriormente apresentada, pode-se proceder com a implementação numérica do TLM-1D. O fluxograma apresentado na Figura 22 representa o algoritmo para a determinação de tensões e correntes em qualquer nó de um eletrodo de aterramento. O processo iterativo possibilita determinar tais grandezas em um determinado ponto do condutor para qualquer instante de tempo Δt .

Inicialmente, deve ser informado um conjunto de dados de entrada referentes às características do meio, do condutor e do surto, bem como alguns parâmetros de simulação. Posteriormente, algumas variáveis devem ser inicializadas. Nos cálculos iniciais, os parâmetros de linha por unidade de comprimento e o comprimento dos segmentos são estabelecidos. Em seguida, os elementos R , L , C e G da linha podem ser determinados, assim como sua impedância característica Z_0 e o passo de tempo Δt .

Neste momento inicia-se o processo iterativo partindo de $K = 1$ até $K = KT$ (número de iterações). A partir do ponto de injeção do surto no primeiro nó ($J = 1$) até o nó m ($J = N$) são calculadas as tensões e correntes para todos os nós e em seguida as tensões refletidas. A conexão com o momento seguinte dá-se pela determinação das novas tensões incidentes. Inicia-se então a próxima iteração ($K = K + 1$). A seguir os blocos presentes no fluxograma da Figura 22 serão descritos.

Dados de Entrada

- Dados do solo incluindo a sua resistividade ρ_s (Ω/m), permissividade relativa ϵ_r e permeabilidade relativa μ_r .
- Dados do ar representados pela permissividade ϵ_0 (F/m) e permeabilidade μ_0 (H/m) do vácuo.

- Dados do condutor como a sua resistividade ρ_c (Ωm), comprimento l (m), profundidade do enterramento h para o caso de eletrodo horizontal (m) e raio a (m).
- Dados do surto atmosférico o qual é representado pelo seu valor de pico A_0 (A), tempos $T1$ (s) e $T2$ (s) conforme ilustra a Figura 1.
- Parâmetros de simulação informando o tipo de eletrodo (horizontal ou vertical) e o número de iterações KT .

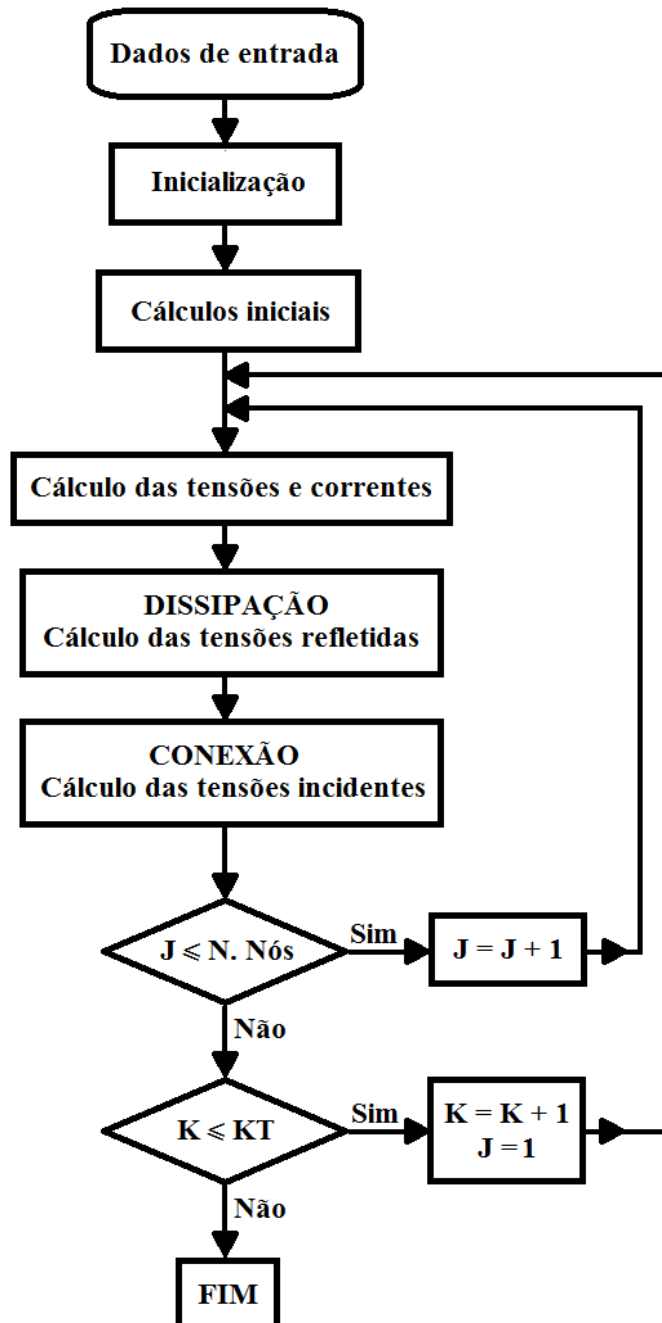


Figura 22 Fluxograma do algoritmo TLM-1D.

Inicialização

- Os contadores J (Nº. do nó) e K (Nº. da iteração) devem ser inicializados com valor igual a 1 e as tensões incidentes à esquerda ${}_1V_e^i$ e à direita ${}_1V_d^i$ de todos os nós na primeira iteração ($K = 1$) devem ser consideradas como nulas.

Cálculos Iniciais

- Cálculo dos parâmetros de linha por unidade de comprimento utilizando as equações 4.19 a 4.25.
- Determinação no número de nós N e cálculo do comprimento de cada segmento Δx utilizando a equação 4.33 com base na solução das equações complementares 4.30 a 4.32.
- Cálculo dos parâmetros do circuito R , L , C e G pela solução das equações 4.26 a 4.29.
- Determinação da impedância característica Z_0 e o passo de tempo Δt utilizando as equações 4.1 e 4.2 respectivamente.

Cálculos das Tensões e Correntes

- Para o nó junto à fonte ($N = 1$) as equações 4.3 e 4.4 são utilizadas para calcular a corrente e a tensão sobre o nó. Posteriormente, a tensão à direita do nó 1 pode ser determinada pela equação 4.5.
- Para os nós intermediários ($N = 2$ até $N = m-1$) as equações 4.8 a 4.11 determinam a tensão, corrente, tensão à esquerda e à direita do nó.
- Para o último nó ($N = m$) a tensão sobre o mesmo é determinada pela equação 4.16.

Dissipação: Cálculos das Tensões Refletidas

- Para o nó junto à fonte ($N = 1$) a tensão refletida à direita do nó é calculada pela equação 4.6.
- Para os nós intermediários ($N = 2$ até $N = m-1$) as tensões refletidas à esquerda e à direita do nó são calculadas pelas equações 4.12 e 4.13.
- Para o último nó ($N = m$) a tensão refletida à esquerda é determinada pela equação 4.17.

Conexão: Cálculos das Tensões Incidentes

- Para o nó junto à fonte ($N = 1$) a tensão incidente à direita do nó é calculada pela equação 4.7.
- Para os nós intermediários ($N = 2$ até $N = m-1$) as tensões incidentes à esquerda e à direita do nó são calculadas pelas equações 4.14 e 4.15.
- Para o último nó ($N = m$) a tensão incidente à esquerda é calculada pela equação 4.18.

4.5 Computação e Resultados

Tendo-se o fluxograma apresentado na Figura 22 é possível desenvolver um algoritmo computacional de modo a determinar tensões, correntes e demais grandezas sobre qualquer nó do eletrodo de aterramento.

Considerando um solo de resistividade $\rho_s = 130 \Omega\text{m}$, permissividade relativa $\epsilon_r = 13$ e permeabilidade relativa $\mu_r = 1$ em contato com ar representado pela permissividade ϵ_0 e permeabilidade μ_0 do vácuo. Seja um condutor de resistividade ρ_c excitado por um surto de corrente em uma de suas extremidades de valor de pico $A_0 = 1 \text{ kA}$, $T1 = 8 \mu\text{s}$ e $T2 = 20 \mu\text{s}$.

Com base na Figura 15a, para um eletrodo horizontal de comprimento $l = 10 \text{ m}$, dividido em 10 segmentos ($N = 11$), raio $a = 6.5 \text{ mm}$ e enterrado a uma profundidade $h = 0.5 \text{ m}$, a tensão e corrente em sua origem e a impedância impulsiva de aterramento podem ser vistas na Figura 23a.

A Figura 23b representa a resposta de um condutor vertical de comprimento $l = 3$ m dividido em 5 segmentos ($N = 6$) e raio $a = 7.5$ mm conforme ilustra a Figura 15b.

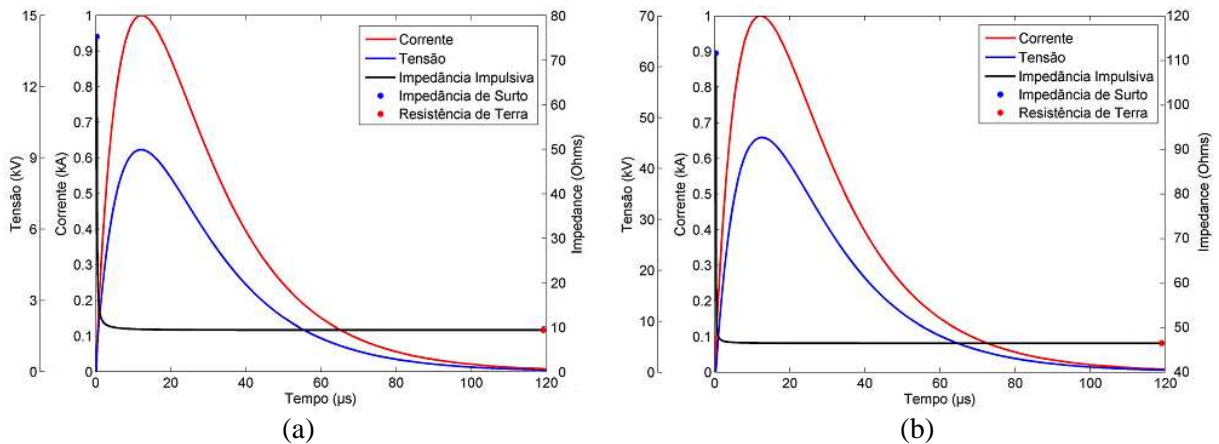


Figura 23 Resposta de um condutor de aterramento frente a um surto atmosférico: (a) contrapeso; (b) haste.

4.6 Validação

De modo a validar o algoritmo anteriormente apresentado, comparações foram feitas com dados de medição e resultados encontrados na literatura provenientes de diferentes métodos numéricos. A Figura 24 mostra resultados baseados em modelos do EMTP e TLM-1D obtidos por (LORENTZOU, 2003b; AHMAD, 2008a) em comparação com resultados procedentes do algoritmo desenvolvido considerando eletrodo horizontal.

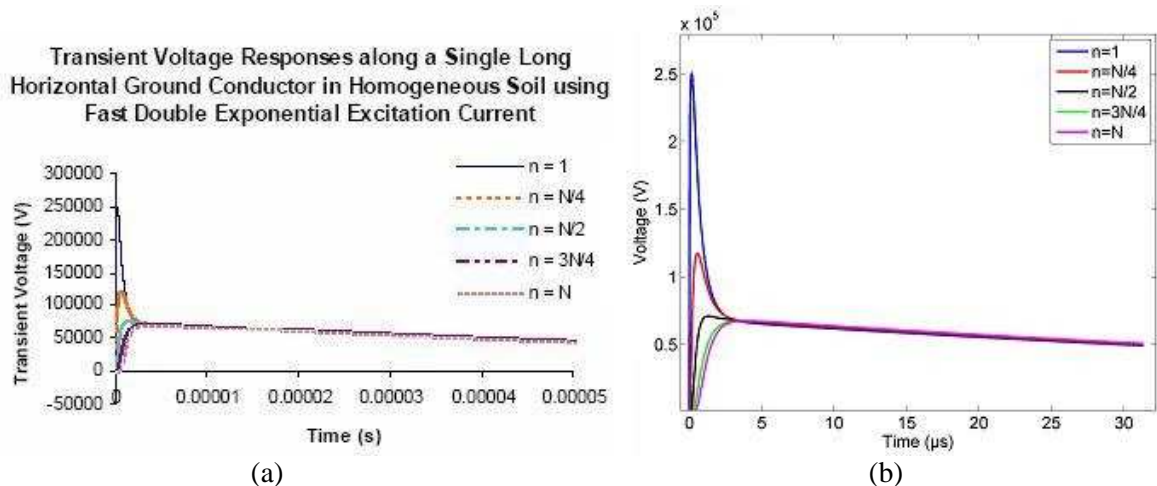


Figura 24 Tensão em diferentes pontos de um eletrodo horizontal: (a) resultados de (LORENTZOU, 2003b; AHMAD, 2008a); (b) resultados provenientes no algoritmo desenvolvido.

A tensão sobre a origem de um eletrodo vertical pode ser vista na Figura 25a, onde são apresentados resultados de medição e de modelo em EMTP desenvolvido por (MENTER, 1994) em comparação com os resultados calculados pelo algoritmo proposto. Novamente, na Figura 25b a tensão sobre a origem de um eletrodo é apresentada. Entretanto, neste caso a comparação de resultados é feita para um eletrodo horizontal e considerando o Modelo Eletromagnético (SES, 2006).

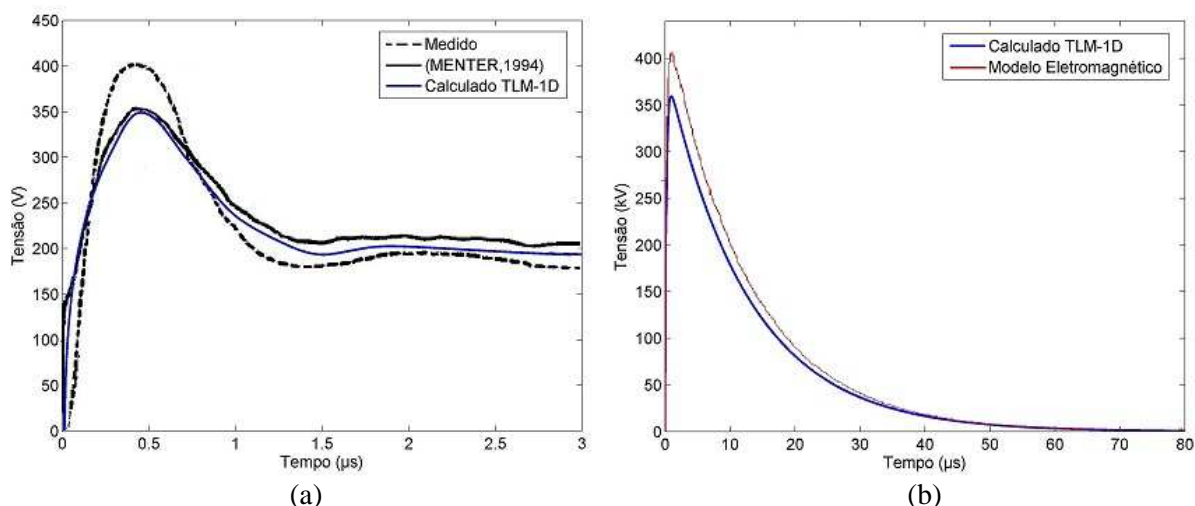


Figura 25 Tensão sobre a origem de um eletrodo: (a) eletrodo vertical considerando dados de (MENTER, 1994); (b) eletrodo horizontal considerando Modelo Eletromagnético (SES, 2006).

Analisando os resultados apresentados, verifica-se que o Método TLM-1D e o algoritmo desenvolvido apresentam uma boa precisão se comparado a resultados de medição e a outros métodos numéricos. Adicionalmente, aspectos práticos referentes à utilização do Método TLM-1D para a representação de problemas de aterramento podem ser encontrados em (GAZZANA, 2010a; GAZZANA, 2010b; GAZZANA, 2010c).

4.7 Considerações Sobre o Capítulo

Foram apresentados neste capítulo aspectos práticos referentes à implementação computacional do Método TLM-1D com foco na análise e modelagem de aterramento impulsivo, considerando eletrodo horizontal e vertical. Questões referentes à conceituação do problema, formulação analítica e implementação numérica foram discutidos, com consequente apresentação de resultados e validação do algoritmo proposto.

O procedimento de cálculo aqui apresentado será utilizado como base para a idealização de melhorias ao estudo de aterramento impulsivo e em altas frequências, bem como para a realização dos estudos de suportabilidade de seres humanos.

Dando continuidade ao assunto, o próximo capítulo dedica-se então a apresentar as principais contribuições desta tese. Destaca-se como foco o aprimoramento de método de cálculo e inclusão do fenômeno de ionização do solo ao Modelo TLM-1D, desenvolvimento de equacionamento de estimação de potenciais gerados na superfície do solo e estudo de suportabilidade vinculado à modelagem de seres humanos submetidos a surto atmosférico.

5. CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DE ATERRAMENTO IMPULSIVO E SUPORTABILIDADE DE SERES HUMANOS

Neste capítulo serão apresentadas as contribuições ao estado da arte desta Tese de Doutorado. Inicialmente, um modelo generalista para a inclusão do fenômeno de ionização do solo associado ao Método TLM-1D será descrito. Posteriormente, apresenta-se uma formulação analítica capaz de estimar os potenciais gerados na superfície do solo, proveniente da dissipação da corrente elétrica sobre um eletrodo de aterramento modelado com a técnica unidimensional. Finalizando, aspectos referentes ao estudo de suportabilidade e segurança pessoal, associados à utilização de modelo representativo do corpo humano em contato com surto atmosférico mediado pelo sistema de aterramento, serão apresentados e discutidos.

5.1 Introdução

Ao longo das últimas décadas, diversos vem sendo os esforços a fim de melhorar o desempenho dos sistemas de aterramento frente à dissipação da corrente elétrica para o solo. Embora seja verificada uma carência de estudos relacionados ao comportamento transiente, se comparado ao estado de regime permanente do aterramento elétrico, diversos métodos e técnicas vem sendo desenvolvidos e aprimorados com o intuito de conferir maior fidedignidade da representação dos fenômenos envolvidos e determinação de grandezas de interesse. Como já apresentado nos capítulos anteriores, a modelagem matemática e a simulação computacional mostram ser práticas importantes, conferindo um melhor conhecimento do comportamento do solo, sistema de aterramento e suas interações com os seres humanos, antes da implantação prática destes sistemas de proteção.

Com base em tais premissas pretende-se apresentar, nesta tese, contribuições no sentido de representar com maior fidelidade o fenômeno de dissipação da corrente elétrica para o solo, determinação de tensões gerado na sua superfície bem como a interação das grandezas elétricas estimadas com o ser humano.

Para obter tais propósitos, a primeira parte deste capítulo esta voltada ao aprimoramento e implementação de metodologia para a estimação do fenômeno de ionização do solo com base no Método da Modelagem por Linhas de Transmissão em uma dimensão (TLM-1D). Num segundo momento, um equacionamento para a determinação de potenciais gerados na superfície do solo, considerando a corrente dissipada ao longo de eletrodo de aterramento determinada por método numérico em uma dimensão é apresentado. Por fim, dando continuidade ao estudo, são descritos aspectos referentes à consideração de um modelo representativo do corpo humano para identificar a influência de diversos parâmetros envolvidos em termos de estudo de suportabilidade.

Deste modo, todas as contribuições ao estado da arte aqui apresentadas tem o intuito de conferir uma melhor representação dos fenômenos transientes decorrentes de surto

atmosférico em sistema de aterramento e suas inter-relações com o ser humano. Tais contribuições são provenientes fundamentalmente da interação dos fenômenos físicos através de simulação computacional.

5.2 Modelagem do Fenômeno de Ionização do Solo

Durante o processo da dissipação da corrente elétrica pelo sistema de aterramento para o solo, se a tensão desenvolvida nos eletrodos for suficientemente elevada com conseqüente geração de um campo elétrico superior a um dado limite, chamado de campo elétrico crítico, poderá ocorrer a ruptura do dielétrico do solo ao redor dos eletrodos até uma determinada distância radial. Esta região, dita ionizada, pode ser interpretada como uma espécie de envoltório irregular ao redor dos condutores de aterramento conforme ilustra a Figura 26 (MOUSA, 1994).

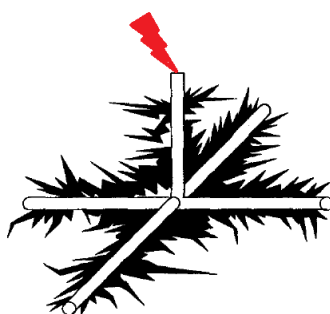


Figura 26 Processo irregular de disrupção do solo. Adaptação de (GERI, 1999).

É consenso na literatura que o crescimento da corrente sobre o eletrodo ocasiona um aumento na produção de cargas elétricas ao redor do mesmo, ocorrendo a evaporação da umidade do solo e o surgimento de arcos voltaicos. Este processo poderá culminar na redução da resistividade elétrica na região ionizada. Por outro lado, este fenômeno pode ser interpretado como se o eletrodo assumisse um diâmetro maior do que seu valor original (TELLÓ, 2007a).

Deste modo, o foco de diversas pesquisas vinculadas ao estado da arte está centrado no estudo do comportamento deste fenômeno com conseqüente desenvolvimento de modelos representativos, generalistas ou não com abordagens distintas para tal fim. Métodos como os desenvolvidos por (LIEW, 1974; WANG 2005; SEKIOKA, 2006) estão focados no conceito de variação da resistividade na região de ionização, (VELASQUEZ, 1984) em seu equacionamento adota o conceito de aumento do raio efetivo do eletrodo, (LIU, 2004) combina o Método de Velasquez com a determinação de um valor residual da resistividade do solo produzida na região ionizada. Por fim, de modo a superar algumas inconveniências presentes nas metodologias citadas, o conceito de resistência de aterramento não linear apresentado em (IMECE, 1996) será utilizado e aprimorado neste trabalho, a fim de conferir melhorias na representação de fenômeno de ionização do solo. Ainda, tal técnica é passível de ser incorporada a um algoritmo TLM-1D de forma generalizada.

5.2.1 Conceituação do Problema

Como já mencionado, a construção de um modelo matemático representativo do fenômeno de disrupção do solo, via de regra, pode ser idealizado mediante a consideração da variação da resistividade do solo e ou do aumento efetivo do diâmetro do eletrodo. Indo ao encontro destas premissas, estudos têm mostrado que de fato a única propriedade do solo que é afetada no processo de ionização é a resistividade, sendo verificado que a permissividade elétrica e a permeabilidade magnética não são significativamente alteradas durante a ocorrência deste fenômeno (LIU, 2004).

Considerando, então, a abordagem da variação da resistividade ρ_s do solo na região ionizada em torno do eletrodo, (LIEW, 1974; WANG 2005) desenvolveram seu modelo com base em dados experimentais de medição. No estudo, tal propriedade varia exponencialmente durante a ocorrência do fenômeno, segundo um conjunto de equações as quais estabelecem as variações de ρ_s durante um período de tempo relacionado a uma zona de ionização e deionização. A Figura 27 ilustra o perfil da variação da resistividade utilizando o referido modelo.

Os resultados obtidos pelos autores com base na formulação apresentada possuem um bom grau de exatidão se comparado aos dados experimentais utilizados. Entretanto, a principal limitação deste modelo está na determinação de diversas constantes necessárias em sua formulação matemática, as quais foram determinadas em ensaios de medição para um estudo de caso específico. Desta forma, a utilização de tal metodologia em um algoritmo de cálculo generalista não mostra ser adequada.

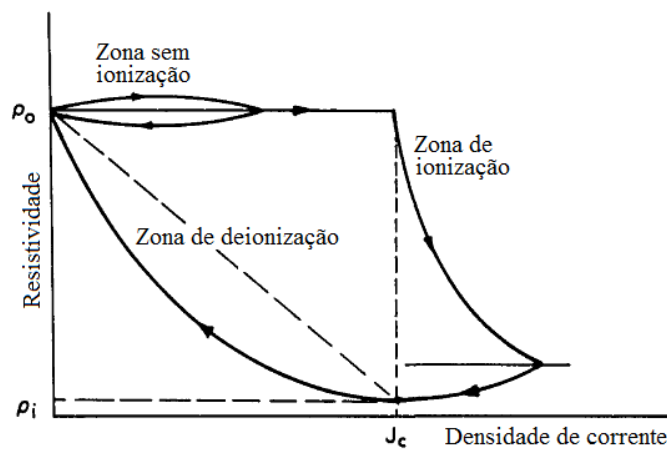


Figura 27 Perfil da variação da resistividade do solo segundo o Modelo de Liew. Adaptação de (LIEW, 1974).

No modelo analítico apresentado por (VELASQUEZ, 1984) o processo de ionização do solo pode ser representado computacionalmente pelo cálculo do aumento efetivo do raio do eletrodo de aterramento. Caso o campo elétrico crítico seja excedido, um incremento no raio do condutor, ao redor da região ionizada, é determinado. Este aumento no raio implica na necessidade de novos cálculos para os parâmetros de linha por unidade de comprimento (equação 4.19 a 4.25) com conseqüente alteração dos elementos do circuito (equação 4.26 a 4.29) para a representação do referido fenômeno. Neste método, a disrupção do solo é considerada como sendo uniforme ao redor da região ionizada, representada pela área correspondente ao aumento do raio do eletrodo conforme ilustra a Figura 28.

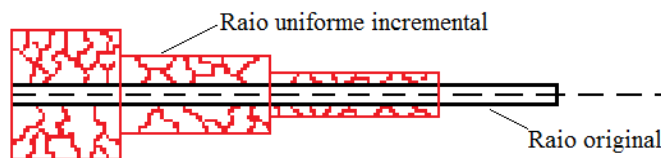


Figura 28 Perfil do incremento do raio de eletrodo na região ionizada segundo Modelo de Velasquez.

A equação 5.1 é utilizada para o cálculo no novo raio de um eletrodo de aterramento ao longo da região ionizada (VELASQUEZ, 1984)

$$a_{ion} = \frac{\rho_s \cdot I_{Ax}}{2 \cdot \pi \cdot \Delta x \cdot E_{cr}} \quad (5.1)$$

Onde:

a_{ion} raio do eletrodo durante a processo de ionização (m);

ρ_s resistividade do solo (Ωm);

$I_{\Delta x}$ corrente sobre um segmento do eletrodo de comprimento Δx (A);

Δx comprimento de um segmento do eletrodo submetido à corrente $I_{\Delta x}$ (m);

E_{cr} campo elétrico crítico (V/m).

A metodologia apresentada por Velasquez possui facilidade para sua construção computacional, podendo ser utilizada para representar o fenômeno de ionização do solo em um algoritmo generalista sem a necessidade da determinação de constantes, as quais precisam ser determinadas experimentalmente como no Método de Liew. Ainda, se trata de um método analítico não vinculado à solução de integrais, que em alguns casos podem ser divergentes, como no Método de Sekioka, a seguir discutido. Entretanto, tal metodologia possui um grau de instabilidade numérica no que diz respeito aos elevados valores de raio calculados pela equação 5.1 para dadas condições das variáveis envolvidas.

Para exemplificar, considera-se um eletrodo de raio 7.5 mm enterrado a 0.6 m de profundidade em solo com resistividade de 1000 Ωm . Dada uma corrente de 10 kA passando por um segmento de eletrodo de comprimento 1 m, sendo $E_{cr} = 1062$ kV/m determinado pela equação 2.4, o novo raio do eletrodo calculado pela equação 5.1 será de 1.5 m. Verifica-se que este valor é matematicamente correto, mas fisicamente inconsistente, considerando que a profundidade de enterramento do eletrodo é de 0.6 m. Ainda, tal limitação é mais evidente com o aumento do número de segmentações do eletrodo de aterramento. Desta forma, na representação computacional, o raio do eletrodo associado à região de ionização necessita, em muitas vezes, ser truncado para evitar instabilidade numérica do método. Este motivo salienta uma vulnerabilidade na representação do fenômeno de ionização do solo por meio do aumento efetivo do raio de condutores de aterramento de forma direta.

No estudo desenvolvido por (LIU, 2004) o fenômeno da ionização do solo é representado numericamente com base no modelo analítico de (VELASQUEZ, 1984) sendo incorporado o cálculo de uma resistividade residual presente na região ionizada ao redor do eletrodo, valor este determinado experimentalmente com base em medições de laboratório.

O efeito prático da consideração da disrupção no solo é a redução dos potenciais de terra gerados (MOUSA, 1994). Segundo Liu, a consideração implícita utilizada no Modelo de Velasquez de que a região ionizada possui a mesma condutividade que o eletrodo de aterramento, superestima os efeitos benéficos da ionização, limitando os potenciais gerados, especialmente para solos de alta resistividade e na ocorrência de grandes regiões ionizadas.

Para contornar tal problema, Liu realizou uma série de medições e com base em um valor médio, determinou que a resistividade do solo ao redor da região ionizada possui uma redução de aproximadamente 7% de seu valor original. Deste modo, seu modelo baseia-se no Método Analítico de Velasquez com a consideração de redução constante da resistividade do solo ao longo de toda a região ionizada.

Embora a metodologia desenvolvida por Liu tenha conferido melhorias na estimação do potencial gerado sobre um eletrodo de aterramento, se comparado ao método originalmente apresentado por Velasquez, o cálculo do valor do raio efetivo do eletrodo ainda apresenta o mesmo problema referente à superestimação de seu valor. Ainda, a determinação do valor médio para a redução da resistividade do solo é proveniente de uma série de medições de alta variabilidade na ordem de 1.7 % a 47 % do valor da resistividade pré-ionização, necessitando

a realização de mais experimentos, especialmente para o caso de solos com altas resistividades.

Novamente, no modelo desenvolvido por (SEKIOKA, 2006), o conceito de variação da zona de resistividade ao redor do eletrodo também é empregado. No modelo, a ionização do solo é interpretada como uma espécie de descarga, tendo a zona de ionização um comportamento similar a de descargas ocorridas no ar. Neste estudo, a variação da resistividade do solo é determinada com base no balanço de energia da região ionizada, onde a relação corrente x resistividade possui um perfil similar ao obtido pelo Modelo de Liew, conforme ilustrado na Figura 29.

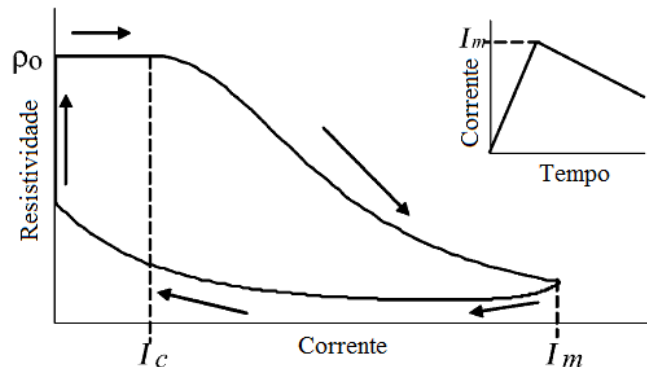


Figura 29 Perfil da variação da resistividade do solo segundo o Modelo de Sekioka. Adaptação de (SEKIOKA, 2006).

Embora os resultados apresentados por Sekioka demonstrem um bom grau de precisão para os casos analisados, a necessidade da determinação de uma constante, a qual é dependente das características do solo e do aterramento obtida experimentalmente, não torna o método muito atrativo para uma construção de enfoque generalista. Ainda, segundo estudos de (COELHO, 2010), a resolução de integrais com funções exponenciais presentes no modelo podem conduzir a soluções divergentes.

Com base nas limitações apresentadas pelas metodologias acima descritas e tomando proveito das grandes contribuições decorrentes de tais pesquisas, é apresentada nesta tese uma nova contribuição para a representação do fenômeno da ruptura do solo. Baseado no conceito de resistência de aterramento não linear descrito em (IMECE, 1996), originalmente utilizado para cálculo do aterramento de linhas de transmissão aéreas, o fenômeno de ionização do solo será representado por meio da variação dos componentes resistivos presentes do Modelo TLM-1D. Diferentemente do modelo baseado em circuitos apresentado por (GRCEV, 2009b; GRCEV, 2009d), a metodologia proposta idealiza além da variação da resistência R do modelo, a variação da condutância G do aterramento.

Tendo-se como referência uma representação por parâmetros concentrados, a corrente injetada em um eletrodo é dissipada em parte para o solo (corrente transversal ou de condução) sendo a parcela restante transferida para o condutor (corrente de deslocamento ou longitudinal). Enquanto a corrente longitudinal está associada às perdas internas do eletrodo, determinando o campo magnético circulante no mesmo, a corrente transversal está vinculada diretamente ao campo elétrico gerado no meio, determinando o fluxo de corrente condutiva e capacitiva no solo (LIMA, 2008).

A Figura 30a ilustra o circuito equivalente para um segmento de linha do algoritmo TLM-1D. A consideração da corrente de deslocamento é feita com base na influência da associação série do componente resistivo e indutivo, enquanto a corrente de condução é vinculada à condutância e a capacitância em paralelo no circuito equivalente (VISACRO, 2007). A Figura 30b representa o condutor de aterramento com as correntes mencionadas.

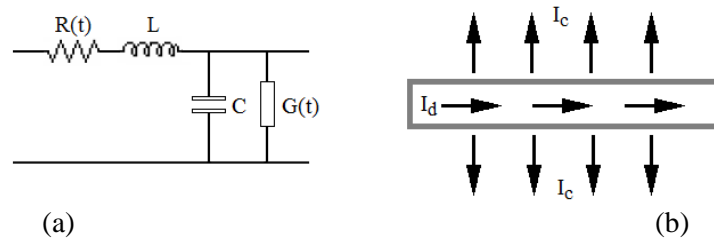


Figura 30 Representação de segmento de linha do Modelo TLM-1D com resistência e condutância variantes no tempo: (a) circuito equivalente; (b) correntes de deslocamento e condução.

No modelo proposto, a ionização do solo é representada numericamente pela redução do valor da resistência $R(t)$ e consequente aumento da condutância $G(t)$ dos segmentos de linha junto ao algoritmo TLM-1D. Com base no conceito de variação não linear da resistência e da condutância presentes no modelo de linha, a diminuição dos potenciais de terra calculados pelo método, atribuídas a ionização do solo, pode ser estimada.

5.2.2 Formulação Analítica

No estudo apresentado em (BELLASCHI, 1942) os autores constataram que a relação entre a corrente injetada em um eletrodo de aterramento e a sua resistência é não linear. Foi concluído que esta relação era decorrente da ionização do solo mediante correntes de altas magnitudes. Ainda, este fenômeno aumentaria efetivamente as dimensões do eletrodo com consequente redução na sua resistência. Tomando como base tal premissa, a disrupção do solo poderia ser considerada uniforme ao redor do eletrodo e a resistividade desta região decairia quase que instantaneamente para o valor da resistividade do condutor, muito próximo de zero (LIU, 2004). Tal constatação conduz a representação do eletrodo de aterramento durante o processo de ionização conforme apresentado na Figura 28.

Em (IMECE, 1996) é apresentada uma formulação para cálculo da resistência de pé de torre de linhas de transmissão de forma não linear conforme as equações 5.2 e 5.3.

$$R_T = \frac{R_e}{\sqrt{1 + \frac{I}{I_{cr}}}} \quad (5.2)$$

$$I_{cr} = \frac{E_{cr} \cdot \rho_s}{2 \cdot \pi \cdot R_e^2} \quad (5.3)$$

Onde:

R_T resistência não linear de pé de torre (Ω);

R_e resistência estática de aterramento (Ω);

I corrente do surto atmosférico (A);

I_{cr} corrente crítica de ionização (A);

E_{cr} campo elétrico crítico (V/m);

ρ_s resistividade do solo (Ωm);

Na equação 5.3, I_{cr} pode ser entendida como a corrente limite a partir do qual o processo de ionização é iniciado. Verifica-se então que com a variação da corrente de surto atmosférico, considerando um valor constante determinado para I_{cr} , a resistência de pé de torre passa a ter menor magnitude se comparada ao seu valor inicial de resistência estática de aterramento.

Como já definido anteriormente, a resistência estática de aterramento ou resistência à frequência industrial de terra é o valor para o qual a impedância de aterramento converge após a passagem do período transitório provocado por um surto. Esta resistência pode ser calculada com base nas equações 5.4 e 5.5 para um eletrodo horizontal (SUNDE, 1968) e vertical (DWIGHT, 1936) respectivamente.

$$R_e = \frac{\rho_s}{\pi \cdot l} \cdot \left[\ln \left(\frac{2 \cdot l}{\sqrt{2 \cdot a \cdot h}} \right) - 1 \right] \quad (5.4)$$

$$R_e = \frac{\rho_s}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \left[\ln \left(\frac{4 \cdot l}{a} \right) - 1 \right] \quad (5.5)$$

Onde:

a raio do eletrodo (m);

l comprimento do eletrodo (m);

h profundidade do enterramento do eletrodo (m).

Considerando este conceito, o cálculo da resistência variando no tempo pode ser utilizado para estimar o comportamento não linear do componente R de um modelo baseado em circuitos segundo a equação 5.6, como apresentado em (GRCEV, 2009b)

$$R(t) = \frac{R_e}{\sqrt{1 + \frac{I(t)}{I_{cr}}}} \quad (5.6)$$

Entretanto, na modelagem de Grcev a variação de R é feita em função de seu valor estático ou de regime permanente. Deste modo, a fim de levar em consideração a alteração do componente resistivo presente nos segmentos do modelo de linha apresentado na Figura 30a para o período transitório, a redução de $R(t)$ deve ser feita em função do referido componente no Modelo TLM. Utilizando as equações 4.19 e 4.26, o componente resistivo de um segmento de linha é dado pela equação 5.7.

$$R = \frac{\rho_c \cdot \Delta x}{\pi \cdot a^2} \quad (5.7)$$

Onde:

R resistência de um segmento de linha (Ω);

ρ_c resistividade do condutor (Ωm).

Substituindo a equação 5.7 em 5.6, a variação da resistência não linear de aterramento pode ser reescrita conforme a equação 5.8.

$$R(t) = \frac{\rho_c \cdot \Delta x}{\pi \cdot a^2} \cdot \frac{I}{\sqrt{1 + \frac{I(t)}{I_{cr}}}} \quad (5.8)$$

Tendo em mente o conceito de que a ionização do solo provoca uma espécie de aumento do raio efetivo do eletrodo, a consequência natural é a diminuição da resistência à passagem da corrente elétrica pelo condutor, já que a área para o fluxo da corrente passa a ser maior.

Partindo das equações 4.22, 4.25 e 4.29, a condutância G de um segmento de linha é dada pela equação 5.9 considerando um eletrodo enterrado horizontalmente no solo e pela equação 5.10, no caso de enterramento vertical.

$$G = \frac{2 \cdot \pi \cdot \Delta x}{\rho_s \cdot \left[\ln \left(\frac{2 \cdot l}{\sqrt{2 \cdot h \cdot a}} \right) - 1 \right]} \quad (5.9)$$

$$G = \frac{2 \cdot \pi \cdot \Delta x}{\rho_s \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot l}{a} \right)} \quad (5.10)$$

Diferentemente da modelagem por circuitos utilizada em (GRCEV, 2009b), o algoritmo TLM-1D baseia-se em um modelo de linha com parâmetros distribuídos, composto pela associação de células básicas como a apresentado na Figura 30a. Considerando então a condutância G e atendendo as equações 5.9 e 5.10, o incremento do raio do condutor conduz a um aumento do valor de G dos segmentos de linha se comparado ao seu valor original.

Conclui-se, então, que a representação da disrupção do solo pode ser mais bem representada se além da redução não linear dos componentes resistivos do circuito TLM, o aumento da condutância no tempo for incluído ao modelo. Deste modo, com o pressuposto apresentado e tomando como referência a equação 5.2, a condutância não linear de aterramento variante no tempo $G(t)$ pode ser estimada utilizando a equação 5.11.

$$G(t) = G \cdot \sqrt{1 + \frac{I(t)}{I_{cr}}} \quad (5.11)$$

Desta forma, com base nas equações 5.9 e 5.10 a expressão 5.11 pode ser reescrita pelas equações 5.12 e 5.13 para eletrodos horizontais e verticais respectivamente, representando então a variação não linear de G no tempo associado ao fenômeno de ionização do solo.

$$G(t) = \frac{2 \cdot \pi \cdot \Delta x}{\rho_s \cdot \left[\ln \left(\frac{2 \cdot l}{\sqrt{2 \cdot h \cdot a}} \right) - 1 \right]} \cdot \sqrt{1 + \frac{I(t)}{I_{cr}}} \quad (5.12)$$

$$G(t) = \frac{2 \cdot \pi \cdot \Delta x}{\rho_s \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot l}{a} \right)} \cdot \sqrt{1 + \frac{I(t)}{I_{cr}}} \quad (5.13)$$

A título de contextualização, o raio efetivo do eletrodo na região ionizada a_{ef} pode ser então calculado com base na variação não linear da resistência. Desta forma, manipulando a equação 5.7 pode-se inferir o novo valor de raio atribuído ao processo de disrupção do solo conforme apresentado na equação 5.14.

$$a_{ef} = \sqrt{\frac{\rho_c \cdot \Delta x}{R(t) \cdot \pi}} \quad (5.14)$$

Finalmente, baseado na formulação analítica sumarizada pelas equações 5.8, 5.12, 5.13 e 5.14, o fenômeno de ionização do solo pode ser representado numericamente em um algoritmo TLM-1D, o qual será discutido a seguir.

5.2.3 Implementação Numérica

Considerando o equacionamento proposto, o fenômeno de ruptura do solo pode ser inserido no algoritmo TLM-1D discutido no capítulo 4 conforme ilustra o fluxograma apresentado na Figura 31.

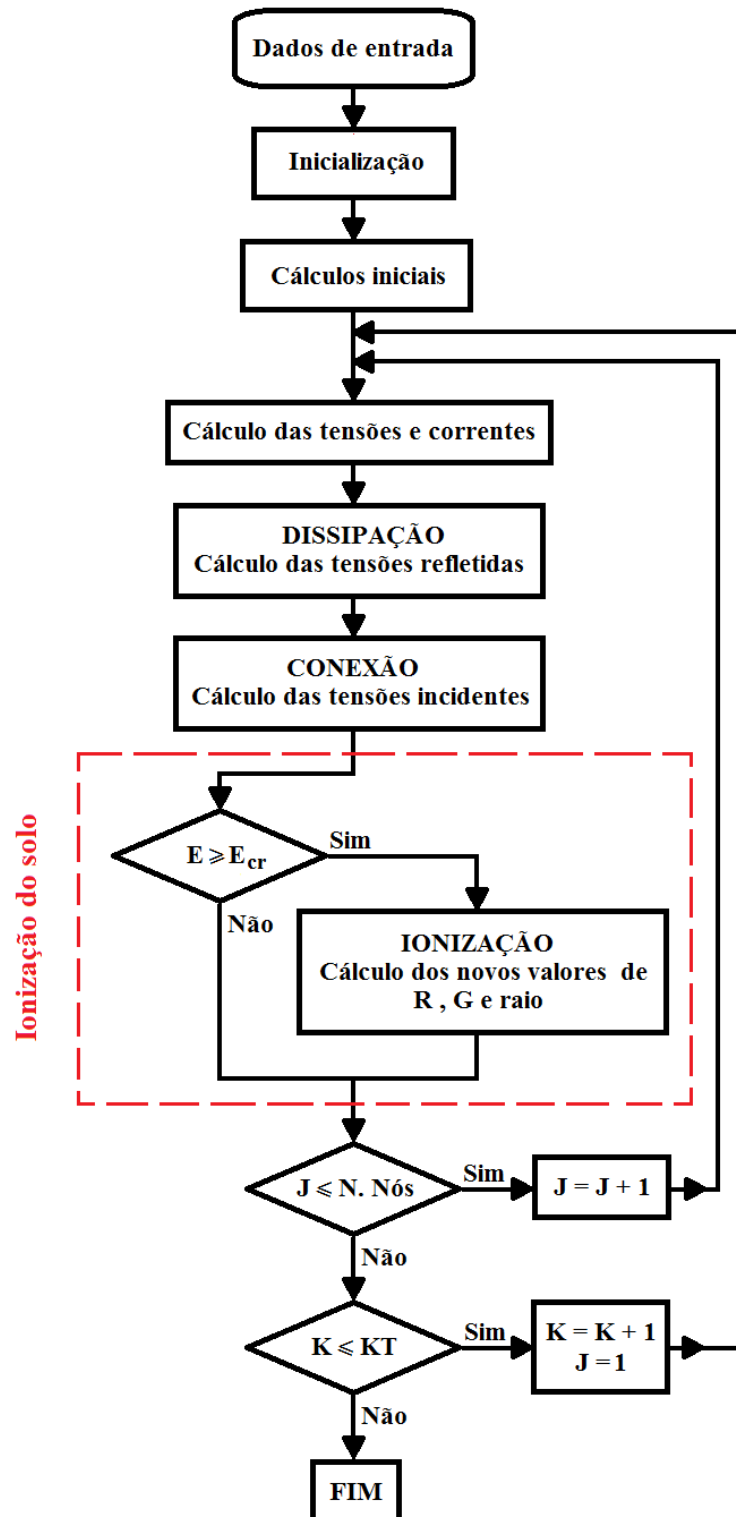


Figura 31 Fluxograma do algoritmo TLM-1D considerando a ionização do solo.

Neste, se o campo elétrico E sobre um nó J em um dado instante de tempo de uma iteração K for superior ao campo elétrico crítico E_{cr} , novos valores de R , G e raio do segmento associado

ao nó J serão calculados no próximo instante de tempo ou iteração $K + 1$. A verificação do campo elétrico se repete para todos os nós J de uma mesma iteração K conforme o processo iterativo do algoritmo. Para o caso dos nós onde o campo elétrico gerado E não tenha excedido o limite de E_{cr} , os valores de R e G permanecem inalterados, como determinado nos cálculos iniciais do algoritmo e o raio do eletrodo mantêm seu valor original.

O fenômeno de ionização do solo pode ser inserido ao algoritmo TLM-1D considerando duas etapas. Inicialmente, o campo elétrico sobre cada nó J precisa ser determinado. Para tanto, define-se a densidade de corrente como sendo a corrente I que flui pela área de um segmento associado ao nó J em um dado instante de tempo t . A equação 5.15 pode ser utilizada para o cálculo da densidade de corrente (VELASQUEZ, 1984).

$$J_c(J, t) = \frac{I(J, t)}{2 \cdot \pi \cdot \Delta x \cdot a} \quad (5.15)$$

O campo elétrico sobre um segmento de linha representado por um nó J pode ser então determinado pela equação 5.16.

$$E(J, t) = \rho_s \cdot J_c(J, t) \quad (5.16)$$

Onde:

$J_c(J, t)$ densidade de corrente (A/m^2);

E campo elétrico (V/m).

Verifica-se, então, para cada nó J se o campo elétrico E excedeu o valor de campo elétrico crítico E_{cr} . Caso positivo, os novos valores de R , G e raio do segmento associado a um nó J são recalculados representando a disrupção do solo ao longo do referido segmento de linha. Caso negativo, condição de não existência de ionização, o algoritmo procede normalmente.

Para a condição de campo elétrico crítico excedido, as equações 5.8, 5.12 e 5.13 podem ser reescritas como segue:

$$R(J, t) = \frac{\rho_c \cdot \Delta x}{\pi \cdot a^2} \cdot \frac{I}{\sqrt{\left| I + \frac{I(J, t)}{I_{cr}} \right|}} \quad (5.17)$$

Considerando um eletrodo horizontal tem-se:

$$G(J, t) = \frac{2 \cdot \pi \cdot \Delta x}{\rho_s \cdot \left[\ln \left(\frac{2 \cdot l}{\sqrt{2 \cdot h \cdot a}} \right) - l \right]} \cdot \sqrt{\left| I + \frac{I(J, t)}{I_{cr}} \right|} \quad (5.18)$$

Considerando um eletrodo vertical tem-se:

$$G(J, t) = \frac{2 \cdot \pi \cdot \Delta x}{\rho_s \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot l}{a} \right)} \cdot \sqrt{\left| I + \frac{I(J, t)}{I_{cr}} \right|} \quad (5.19)$$

Por fim, com base na equação 5.14 o raio efetivo do condutor na região ionizada pode ser determinado pela equação 5.20.

$$a_{ef}(J, t) = \sqrt{\frac{\rho_c \cdot \Delta x}{R(J, t) \cdot \pi}} \quad (5.20)$$

5.2.4 Computação e Resultados

Tendo-se como referência o equacionamento anteriormente apresentado e tomando como base o fluxograma da Figura 31, é possível analisar o comportamento do sistema de aterramento submetido a surto atmosférico frente à ocorrência da ionização do solo.

A fim de proporcionar um melhor entendimento do comportamento de tal fenômeno, um surto de magnitude relativamente baixa, inferior aos valores usualmente atribuídos a descargas atmosféricas 4 kA a 250 kA, será considerado (IEC/TR 60479-4, 2004). Deste modo, torna-se possível visualizar o início e fim do processo de disrupção do solo.

Seja um condutor de resistividade ρ_c excitado por um surto de corrente em uma de suas extremidades com 500 A (8×20) μs enterrado horizontalmente em solo homogêneo de resistividade $\rho_s = 100 \Omega\text{m}$, permissividade relativa $\epsilon_r = 10$, permeabilidade relativa μ_r em contato com ar representado pela sua permissividade ϵ_0 e permeabilidade μ_0 . O referido eletrodo possui um comprimento $l = 12$ m, raio $a = 7.5$ mm e está enterrado a 0.6 m da superfície do solo. Ainda, nas simulações realizadas o condutor de aterramento foi dividido em 17 segmentos (18 nós). Na Figura 32 pode ser visto o comportamento do eletrodo de aterramento frente a um surto atmosférico considerando o fenômeno de ionização do solo.

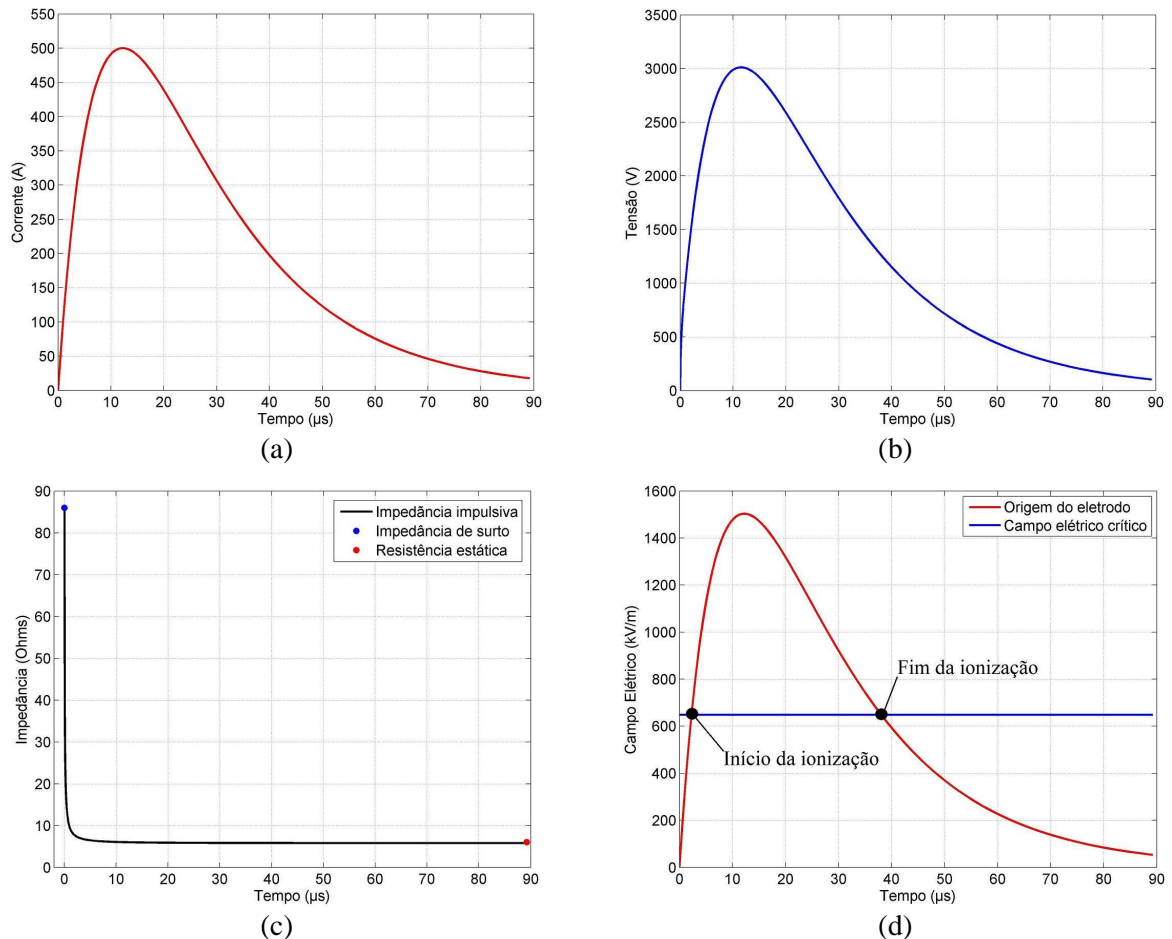


Figura 32 Resposta do aterramento frente a um surto atmosférico considerando o fenômeno de ionização do solo: (a) surto injetado; (b) potencial gerado na origem; (c) impedância de aterramento; (d) campo elétrico na origem.

A Figura 32a apresenta o surto de corrente injetado no eletrodo e a Figura 32b mostra o potencial gerado em sua origem. Pode-se verificar que a corrente e a tensão estão aproximadamente em fase. Em aproximadamente $12.2 \mu\text{s}$ a corrente atinge seu valor máximo

de 500 A gerando um potencial de 3,07 kV. Verifica-se também que nesse instante de tempo a impedância de surto já atingiu seu valor de regime conforme ilustra a Figura 32c.

Utilizando a equação 2.4 o campo elétrico crítico E_{cr} pode ser determinado, assumindo para o estudo em questão o valor de 648.7 kV/m. Na Figura 32d pode ser observado o campo elétrico no ponto de injeção do surto (nó 1) bem como o valor de E_{cr} . Verifica-se que após 2.3 μ s o campo elétrico excede seu valor crítico, permanecendo nesta condição até 38 μ s aproximadamente.

Deste modo, durante este período de tempo a região do solo ao redor do condutor é ionizada. Com base no algoritmo representado pelo fluxograma da Figura 31, os novos valores de R e G do Modelo TLM-1D são recalculados, sendo estabelecido então o aumento do raio efetivo do eletrodo e conseqüente diminuição da tensão gerada sobre o mesmo nesta região. A Figura 33 mostra o comportamento dos componentes R e G presentes no modelo.

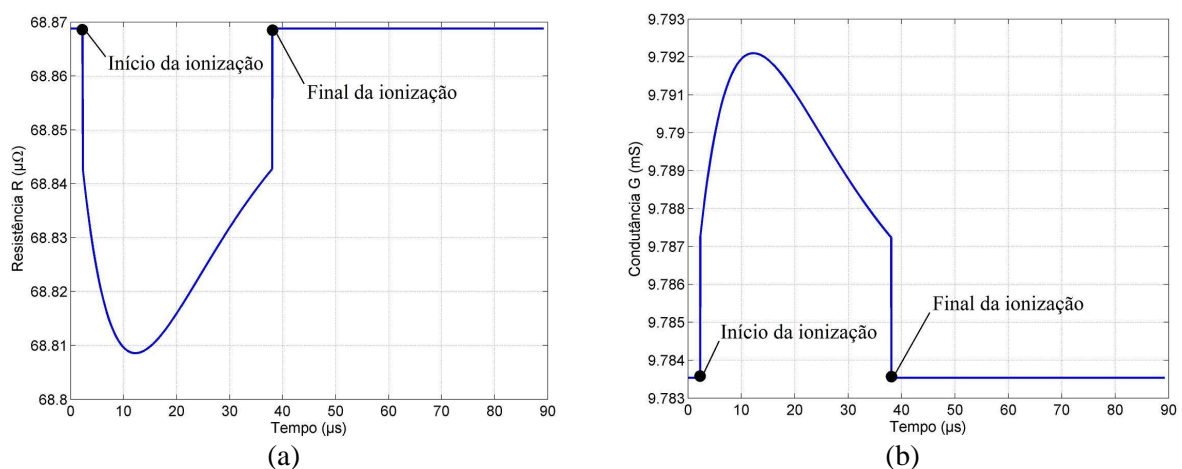


Figura 33 Comportamento dos componentes R e G presentes no Modelo TLM mediante o fenômeno de ionização do solo: (a) variação de R no tempo (nó 1); (b) variação de G no tempo (nó 1).

Analisando a Figura 33a, verifica-se que com o início da ionização, o componente R do circuito passa a ter uma diminuição de seu valor original (68.869 $\mu\Omega$) até o instante de tempo onde a corrente atinge seu valor máximo (12.2 μ s). A partir deste ponto, o valor de R cresce até o final da ionização. Neste momento, R assume novamente seu valor original.

O componente G possui comportamento inverso ao de R como pode ser visto na Figura 33b. Com o início da ionização, observa-se um crescimento da condutância G partindo de seu valor original (9.7835 mS) até o instante de tempo onde a corrente atinge seu valor máximo. Neste momento, G passa a decrescer até o final da ionização, retornando a sua magnitude pré-ionização.

Por fim, a Figura 34 ilustra a variação do raio do eletrodo durante o processo de ruptura do solo. Na Figura 34a pode-se verificar o aumento do raio efetivo do eletrodo correspondente ao 1º segmento (nó 1) do eletrodo. O comportamento do raio é inversamente proporcional a variação de R . Partindo do início da ionização, o raio do eletrodo tem um acréscimo de seu valor original, *aumento fictício do raio*, assumindo um valor dito efetivo. Tal crescimento ocorre até o instante de tempo onde a corrente assume a magnitude de pico, ocorrendo então um decaimento de seu valor até retornar aos 7.5 mm ao final da ionização.

A Figura 34b contextualizada o conceito de variação uniforme conforme apresentado na Figura 28. A Figura 34b apresenta o raio efetivo ao longo de todo o eletrodo de comprimento 12 m para o instante de tempo onde a corrente assume seu valor máximo. Verifica-se que neste instante de tempo parte do eletrodo, a partir dos 7 m de comprimento, não apresentou um acréscimo no raio efetivo, ou seja, o solo ao redor desta porção do condutor de

aterramento não foi ionizado. Deste modo, as variações de R e G conduzem ao aumento do raio do aterramento e consequentemente diminuição do potencial gerado no eletrodo, se comparado a condição de não ocorrência de ionização.

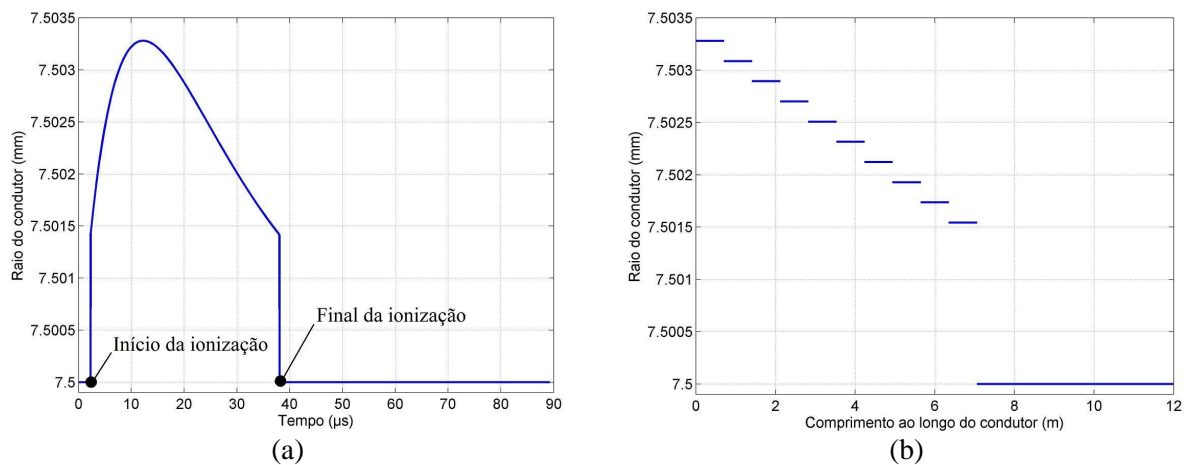


Figura 34 Variação do raio mediante o processo de ionização do solo: (a) aumento do raio efetivo do eletrodo (nó 1); (b) variação uniforme do raio ao longo do comprimento do eletrodo.

A fim de melhor exemplificar a diminuição do potencial gerado sobre um eletrodo, uma segunda simulação será apresentada. Nesta simulação foi considerado um surto atmosférico com valor de pico de maior magnitude, representando um surto dito mais próximo da realidade. Dois algoritmos foram executados: o algoritmo TLM-1D clássico sem a consideração da ionização do solo representado pelo fluxograma da Figura 22 e o algoritmo apresentado neste capítulo, considerando a representação do referido fenômeno.

Para este estudo, o mesmo condutor de aterramento anteriormente apresentado foi considerado. Entretanto, um surto de 100 kA (8×20) μ s foi aplicado em uma das extremidades do eletrodo enterrado em solo homogêneo de resistividade $\rho_s = 1000 \Omega\text{m}$ e permissividade relativa $\epsilon_r = 6$. A Figura 35 mostra o surto de corrente aplicado, o campo elétrico, o potencial gerado na origem e a impedância de aterramento.

Considerando um surto de magnitude de 100 kA apresentado na Figura 35a, pode-se verificar que o campo elétrico crítico é excedido a partir dos primeiros instantes de tempo e que mesmo com a redução do valor da corrente, o campo elétrico apresenta elevada magnitude, muito superior ao E_{cr} como pode ser visto na Figura 35b. Sendo assim, para a configuração em análise, pode-se dizer que a ionização do solo ocorre durante todo o período transiente da dissipação do surto pelo sistema de aterramento.

Analisando a Figura 35c, é claramente identificada uma diferença na tensão gerada sobre a origem do eletrodo com e sem a consideração do fenômeno de ionização do solo. No que diz respeito à curva de impedância de aterramento, conforme ilustrado na Figura 35d, pode ser constatado que o tempo transitório decorrente para atingir o valor de resistência estática, considerando a ionização do solo, é muito maior se comparado a não ocorrência deste fenômeno.

A análise aqui realizada pode ser feita para os outros nós do eletrodo de aterramento, apresentando comportamento similar aos resultados obtidos, bem como para o caso de eletrodos enterrados verticalmente no solo.

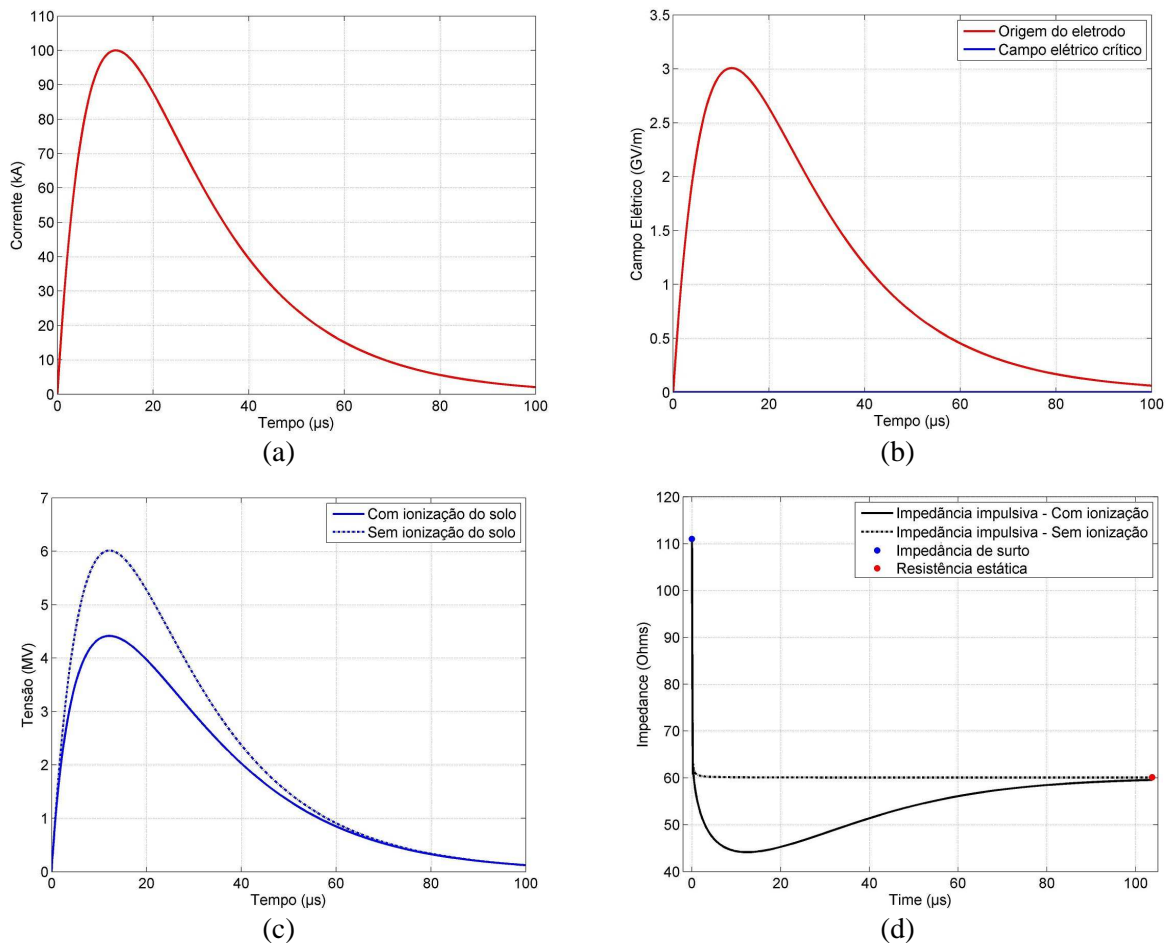


Figura 35 Comparação da resposta do aterramento com e sem a presença do fenômeno de ionização do solo: (a) corrente injetada no eletrodo; (b) campo elétrico na origem; (c) potencial gerado na origem; (d) impedância de aterramento.

5.2.5 Validação

A fim de validar o Modelo TLM-1D proposto considerando a inclusão do fenômeno de ionização do solo, comparações foram feitas tomando-se como referência o resultado proveniente de outros modelos, bem como com resultados experimentais encontrados na literatura.

A Figura 36 mostra a corrente injetada e a tensão gerada em uma haste vertical de aterramento submetido a surto atmosférico. Para este caso a comparação do método proposto foi feita com o Modelo Dinâmico de Liew (LIEW, 1974) e com medição realizada pelo autor. Adicionalmente, os resultados da implementação do Modelo Analítico de Velasquez (VELASQUEZ, 1984) e do Modelo da Resistividade Residual de Liu (LIU, 2004) também foram utilizados para comparação.

Para tanto, tomou-se como base as características do solo e eletrodo apresentadas em (LIEW, 1974). Vale ressaltar que o surto de corrente da Figura 36a é uma aproximação do sinal originalmente utilizado por Liew. Considerou-se então na simulação uma haste de 0.61 m de comprimento com raio de 6.35 mm, enterrada em solo com resistividade de 50 Ωm e permissividade relativa = 8. O surto foi aproximado por uma onda dupla exponencial 3.5 kA (3.5 x 9.2) μs. A Figura 36b mostra o resultado comparativo para a tensão na origem do eletrodo considerando os diferentes modelos.

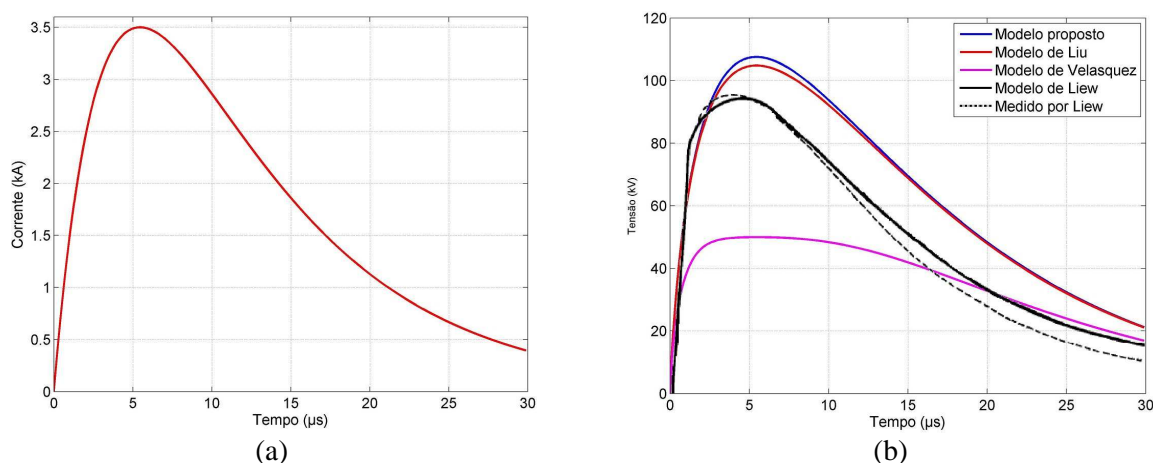


Figura 36 Comparação entre modelos: (a) surto de corrente; (b) tensão gerada no eletrodo (nó 1).

Analisando a Figura 36b, verifica-se que o modelo proposto fornece uma estimativa da tensão sobre o eletrodo em torno de 16 % maior do que os valores medidos e estimados por Liew. Se comparado ao Modelo de Liu os resultados obtidos são bem próximos. Por fim, é claramente visível que o Modelo de Velasquez subestima a determinação da tensão gerada.

O modelo proposto parte do pressuposto que o solo é homogêneo em toda a sua extensão e profundidade, o que pode não condizer com a real situação do local de medição, podendo ser este um dos motivos para a diferença de tensão entre valor medido e calculado. Com base na comparação entre modelos, pode-se constatar que o método proposto apresentou bons resultados na determinação numérica da grandeza de interesse.

È importante salientar que a diferença encontrada, neste caso com os resultados de medição, pode ser confrontada com o fato de que o modelo proposto possui uma abordagem a favor da segurança, ou seja, os valores estimados foram maiores do que os efetivamente medidos. Deste modo, a consideração do método apresentado para uma análise no ponto de vista de segurança pessoal possui pouca margem para erros de subestimação de tensões, as quais um ser humano poderia ser submetido.

5.2.6 Considerações Sobre o Estudo

Nesta seção do trabalho, foram apresentados aspectos referentes à contribuição ao estudo de aterramento impulsivo vinculada ao desenvolvimento de metodologia para a representação numérica do fenômeno de ionização do solo.

Tendo-se como referência os principais modelos desenvolvidos até então, buscou-se um aprimoramento para a solução do problema, de modo a contornar as limitações dos métodos existentes.

O modelo proposto pode ser visto como uma aplicação dos conceitos apresentados em (IMECE, 1996) e um aprimoramento dos Modelos de Velasquez, Liu e Grcev. A representação numérica da disrupção do solo foi idealizada com base no conceito de variação dos componentes R e G do Modelo TLM. Resultados mostraram que a metodologia é capaz de simular tal fenômeno com uma boa precisão.

Deste modo, as principais vantagens desta técnica se comparada as anteriormente citadas podem ser resumidas por:

- não necessidade da utilização de constantes obtidas experimentalmente, sendo específicas para um dado tipo de solo e condutor, como as requeridas em (LIEW, 1974; WANG 2005; SEKIOKA, 2006);

- o raio efetivo do eletrodo na região de ionização é obtido como consequência da variação dos elementos resistivos presentes no modelo, onde os valores obtidos são fisicamente aceitáveis o que nem sempre ocorre na metodologia apresentada em (VELASQUEZ, 1984; LIU, 2004);
- devido ao fato de ser um método analítico, não está sujeito a solução de integrais divergentes como pode ocorrer na implementação da metodologia desenvolvida por (SEKIOKA, 2006), sendo um método numericamente estável;
- a metodologia pode ser incorporada a um algoritmo generalista independente das propriedades do solo ou características do eletrodo de aterramento e parâmetros do surto atmosférico.

5.3 Estimação de Potencial na Superfície do Solo

O primeiro passo para o estudo e análise do comportamento do sistema de aterramento frente à dissipação de correntes provenientes de surto atmosférico ou de curto-circuito do sistema elétrico de potência, é a determinação das grandezas de interesse sobre os condutores. Consequentemente, tais grandezas como tensões, correntes, campos e impedâncias servirão como ponto de referência para distintas abordagens e necessidades de diversas áreas do conhecimento técnico.

O aterramento elétrico é um dos focos de estudo dentro da compatibilidade eletromagnética (CEM) juntamente com a análise transitória, qualidade de energia e sistemas de proteção.

Dentro do contexto da CEM, o aterramento é um dos componentes que deve assegurar que sinais interferentes não perturbem as características nominais de operação do sistema elétrico envolvido. Para exemplificar, em uma visão sob a análise de sistemas de potência, o aterramento está vinculado à necessidade de um caminho de baixa impedância para o solo. Em telecomunicações, o aterramento elétrico está associado à obtenção de valores reduzidos de impedância entre equipamentos, assim como entre tais dispositivos e a terra. Com relação à área de rádio frequência, novamente o sistema de aterramento pode ser visto como um caminho de baixa impedância para as altas frequências (TELLÓ, 2007a).

Para as visões anteriormente apresentadas, verifica-se que a determinação das grandezas elétricas sobre o condutor com consequente identificação da impedância de aterramento mostra ser satisfatória, atendendo em parte a quesitos da compatibilidade eletromagnética. Entretanto, sobre a ótica de que além de garantir a correta operação do sistema elétrico, o aterramento deve promover a segurança de pessoas, um estudo mais abrangente precisa ser realizado. Sendo assim, torna-se necessário a análise das grandezas elétricas produzidas na superfície do solo, dentre elas o potencial gerado.

Deste modo, a fim de contribuir para o estudo de aterramento impulsivo associado à avaliação de suportabilidade e segurança pessoal, tomando como base os trabalhos de (HEPPE, 1978a; HEPPE, 1978b; MIRANDA, 2003; PORTELA, 1997d; PORTELA, 1998) será apresentado o desenvolvimento de equacionamento matemático e implementação computacional para a estimação de potenciais produzidos na superfície do solo provenientes da dissipação da corrente elétrica sob um eletrodo de aterramento horizontal. O referido estudo tem sua contribuição e originalidade em conjunto com a utilização de métodos numéricos unidimensionais, o que é o caso do TLM-1D, para a determinação de grandezas elétricas sob e na superfície do solo.

5.3.1 Conceituação do Problema

Como já apresentado no capítulo 2, diversos métodos numéricos podem ser utilizados para a representação e análise de sistemas de aterramento. Boa parte de tais metodologias podem ser

implementadas em uma duas ou três dimensões, como é o caso do Método TLM (CRISTOPOULOS, 1995).

Uma abordagem em uma dimensão possibilita a análise do sistema de interesse sobre uma única coordenada no espaço, seja ela x , y ou z . Por sua vez, uma implementação bi-dimensional pode estimar as grandezas de interesse sobre um plano e por fim, métodos tridimensionais possibilitam uma análise espacial.

A escolha de um método numérico, bem como de sua dimensão para a solução de problemas de eletromagnetismo de uma maneira geral, deve ser feita como base nas necessidades da representação do sistema a ser analisado levando em conta sua precisão, procedimento de implementação e desempenho computacional.

Metodologias tridimensionais são mais versáteis e adequadas para a representação de estruturas mais elaboradas, materiais com diferentes propriedades, meios não homogêneos e geometrias irregulares. Entretanto, o grau de complexidade de implementação e a grande necessidade de processamento computacional, tornam esta abordagem menos atrativa, se comparado a um método em uma dimensão para a representação e análise de estruturas simples, como é o caso de eletrodos horizontais ou verticais de aterramento em solo homogêneo.

Adicionalmente, sabe-se que o erro em um modelo é algo intrínseco ao seu processo de representação, o qual está diretamente relacionado à distância do mesmo ao real, vinculado também a idealização de um comportamento contínuo de forma discreta. Tratando-se de um processo dinâmico, que é o caso da dissipação da corrente elétrica no tempo em um sistema de aterramento, este erro tem a tendência de se propagar e se acumular. O surgimento de um erro quantitativo está diretamente associado ao número de iterações presentes na etapa de processamento computacional, vinculado também a um erro qualitativo. Este depende das dimensões do espaço de modelagem e da discretização. Consequentemente, o acúmulo de tais erros conduz a diminuição da precisão conferida ao modelo se comparado ao real (CHRISTOPOULOS, 1995). Deste modo, tais argumentos reforçam a utilização de método unidimensional para a representação de sistemas simples, o qual pode conferir maior precisão ao modelo.

Por outro lado, um método tridimensional tem a capacidade de determinar as grandezas de interesse em qualquer ponto P de um domínio de estudo S conforme ilustra a Figura 37. Deste modo, o potencial gerado em um ponto na superfície do solo pode ser determinado de forma direta.

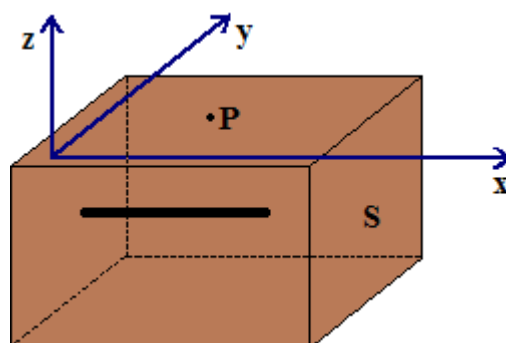


Figura 37 Domínio de estudo em um espaço tridimensional.

Para contornar este problema mediante a utilização de um método unidimensional, o qual tem sua computação restrita a uma única coordenada e sobre o eletrodo de aterramento, torna-se necessário estimar as grandezas de interesse no espaço S de maneira indireta.

No estudo desenvolvido por Robert J. Heppe (HEPPE, 1978a; HEPPE, 1978b) um método para cálculo dos potenciais produzidos na superfície do solo é apresentado considerando a corrente elétrica dissipada pelo aterramento proveniente de curto-circuito do sistema elétrico de potência. Tal abordagem tem seu foco em baixa frequência e regime estacionário, levando em consideração apenas a resistividade ρ_s do solo para a representação do meio em sua formulação. Entretanto, para altas frequências, além da resistividade, a permissividade elétrica ε e a permeabilidade magnética μ do solo devem ser levadas em consideração (TELLÓ, 2007a). Ainda, para o caso de fenômenos muito rápidos, como um surto atmosférico, a condutividade σ e a permissividade relativa do solo ε_r são dependentes da frequência (TELLÓ, 2007b).

A formulação analítica apresentada a seguir, possibilita a estimação dos potenciais na superfície do solo considerando uma frequência específica, dita característica, dentro do espectro do surto de corrente aplicado no eletrodo.

5.3.2 Formulação Analítica

Antes de iniciar a apresentação do equacionamento para a estimação dos potenciais gerados na superfície do solo, torna-se necessário estabelecer algumas definições em termos de localização no espaço $S(x,y,z)$ com origem em $(0,0,0)$. Seja um condutor de aterramento C enterrado a uma profundidade h cuja sua localização no espaço S é definida por $C(x',y',z')$ e um ponto P localizado na superfície do solo definido por $P(x'',y'',z'')$.

Restringindo-se inicialmente a uma análise considerando um condutor enterrado horizontalmente no solo, alinhado ao eixo x , com origem em $y = 0$, todo e qualquer ponto sobre este condutor é representado em um plano xz de coordenadas $C(x',0,h)$. Ainda, para o caso de um ponto na superfície do solo, com profundidade nula $z = 0$, todo e qualquer ponto nesta superfície pode ser representado no plano xy de coordenadas $P(x'',y'',0)$ conforme ilustra a Figura 38.

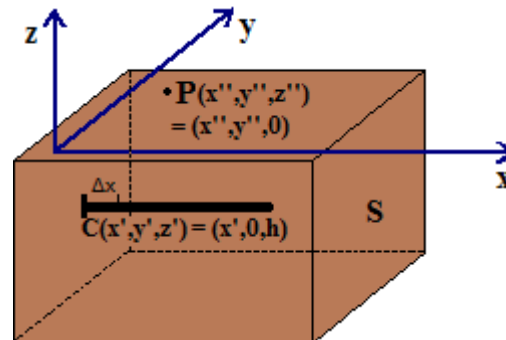


Figura 38 Representação de um ponto P e um condutor C em um espaço tridimensional S .

Deste modo, define-se como x , y , e z (m) a distância entre um ponto de análise na superfície do solo e a origem do eletrodo de aterramento.

$$x = x'' - x' \quad (5.21)$$

$$y = y'' - y' = y'' \quad (5.22)$$

$$z = z'' - z' = -h \quad (5.23)$$

Conhecendo-se a corrente I (A) dissipada ao longo de um eletrodo de aterramento de comprimento l (m), enterrado em solo homogêneo de resistividade ρ_s (Ωm) e considerando um fator f_c , o qual será definido posteriormente, o potencial na superfície do solo V (V) para uma análise estacionária em baixa frequência (60 Hz) pode ser determinado com base na equação 5.24 (HEPPE, 1979b).

$$V = \frac{I \cdot \rho_s}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot f_c \quad (5.24)$$

Entretanto, para fenômenos ditos rápidos, como o caso de surto atmosférico, a aproximação em regime estacionário é considerada incorreta, sendo importante neste caso considerar o comportamento do meio em função da frequência, além da sua permissividade [TELLÓ, 2007a]. Considerando então a equação 2.3, um meio pode ser descrito pelo comportamento conjunto da sua condutividade $\sigma_s = 1/\rho_s$ e permissividade $\varepsilon = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_s$ de forma complexa em função da frequência ω .

$$\sigma^* = \sigma_s + j\omega \cdot \varepsilon_r \cdot \varepsilon_s \quad (5.25)$$

Na equação 5.25, $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ é a frequência em rad/s para a frequência f (Hz) de interesse. Desta forma, o potencial em um ponto $P(x'', y'', z'')$ pode ser escrito como segue:

$$V(x'', y'', z'') = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot l \cdot (\sigma_s + j\omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r)} \cdot f_c \quad (5.26)$$

Para a análise de grandezas eletromagnéticas que variam lentamente com o tempo e tomando-se como referência as equações 2.6a, 2.6d e 2.6e a equação de Maxwell representada na sua forma diferencial pode ser avaliada.

$$\nabla \times H = (\sigma_s + j\omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r) \cdot E \quad (5.27)$$

Onde:

- H vetor campo magnético (A/m);
- E vetor campo elétrico (V/m);
- ε_r permissividade relativa do solo;
- σ_s condutividade do solo ($[\Omega\text{m}]^{-1}$);
- ε_0 permissividade do vácuo (F/m);
- ω frequência angular (rad/s).

Pode ser dito que um campo eletromagnético varia lentamente com o tempo quando a corrente de deslocamento é de magnitude desprezível em relação à corrente de condução (MIRANDA, 2003). Deste modo, a seguinte relação precisa ser atendida para que a formulação analítica seja aplicada:

$$\sigma_s \gg \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \quad (5.28)$$

Sabe-se que com o aumento de ω a relação da equação 5.28 passa a não ser verdadeira, especialmente para o caso de altas frequências presentes em surtos atmosféricos, a qual é da ordem de centenas de kHz. Tal condição é uma restrição presente na utilização de tal abordagem, para a representação de fenômenos rápidos. Deste modo, torna-se necessário a utilização de um fator f_c o qual traduz a relação entre o potencial estimado e o potencial verdadeiro em uma formulação analítica aplicável (MIRANDA, 2003). Para o estudo proposto este fator f_c foi adotado conforme apresenta a equação 5.29 (HEPPE, 1979b):

$$f_c = \ln \left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} + x}{\sqrt{(x-l)^2 + y^2 + z^2} + x-l} \right) \quad (5.29)$$

Baseado na modelagem de ondas planas e assumindo que a propagação se dará em uma direção e considerando um campo eletromagnético associado a uma injeção pontual de corrente, a constante de propagação γ apresentada em 4.31 pode ser reescrita conforme apresentado em 5.30.

$$\gamma = \sqrt{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \omega^2 + j\mu_0 \cdot \mu_r \cdot \sigma_s \cdot \omega} \quad (5.30)$$

Para a utilização de 5.30 assumindo grandezas de pulsação $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$, considera-se um meio linear, homogêneo e isotrópico em representação complexa, onde o fator γ é representado associado ao fator $e^{j\gamma r}$, sendo r é a distância entre o ponto médio do condutor C e o ponto P na superfície do solo (PORTELA, 1997b; PORTELA, 1998).

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (5.31)$$

Ressalta-se que a propagação de ondas eletromagnéticas será corretamente modelada onde a distância r for consideravelmente menor do que o comprimento de onda λ associado. Ou seja, $r \ll \lambda$ sendo desejável a relação $r < \lambda/10$ para a obtenção de uma boa precisão (GRCEV, 2009e).

Assumindo-se que a corrente elétrica I no tempo t injetada em um condutor de aterramento pode ser representada também na sua forma complexa, sendo a mesma uniformemente distribuída ao longo do eixo de simetria deste condutor, adotando o fator f_c e a constante de propagação γ associado ao fator $e^{j\gamma r}$ apresentados em 5.29 e 5.30, pode-se estimar o potencial em um ponto P na superfície do solo considerando agora a dependência dos parâmetros do solo com a frequência com base na equação 5.32.

$$V(x'', y'', z'') = \frac{I \cdot e^{-j\omega t}}{2 \cdot \pi \cdot l \cdot (\sigma_s + j\omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r)} \cdot e^{j\gamma r} \cdot \ln \left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} + x}{\sqrt{(x-l)^2 + y^2 + z^2} + x-l} \right) \quad (5.32)$$

Onde:

$V(x'', y'', z'')$	potencial no ponto de coordenadas $P(x'', y'', z'')$ (V);
t	instante de tempo (s);
ω	frequência angular (rad/s);
$Ie^{j\omega t}$	corrente complexa (A);
l	comprimento do eletrodo (m);
ε_r	permissividade relativa do solo;
ε_0	permissividade do vácuo (F/m);
σ_s	condutividade do solo ($[\Omega\text{m}]^{-1}$);
γ	constante de propagação;
r	distância entre o ponto médio do condutor C e o ponto P na superfície do solo (m);
x	coordenada relativa definida por 5.21;
y	coordenada relativa definida por 5.22;
z	coordenada relativa definida por 5.23.

Finalmente, com tal equacionamento pode-se utilizar a corrente I sobre o eletrodo de aterramento, determinada através de um método em uma dimensão, para estimar os potenciais gerados no solo por meio de uma implementação numérica.

5.3.3 Implementação Numérica

Com base no equacionamento anteriormente apresentado, e considerando agora uma segmentação do eletrodo de aterramento, o potencial em um ponto P na superfície do solo pode ser estimado. Após o processo de computação, torna-se possível estabelecer a evolução da tensão no solo de maneira pontual com variação no tempo, bem como o estabelecimento de superfícies e curvas equipotenciais no plano xy .

O referido equacionamento pode ser utilizado em conjunto com um algoritmo generalista, no estudo em questão baseado no Método TLM-1D, com ou sem a consideração do fenômeno de ionização do solo.

Para cada instante de tempo t associado a uma iteração K , o potencial em um ponto P na superfície do solo pode ser estabelecido com base no princípio da superposição. Sendo assim, a contribuição das correntes I para um nó J representando cada um dos $N-1$ segmento de linha presentes no Modelo TLM-1D deve ser computada. O fluxograma apresentado na Figura 39 ilustra a inserção do cálculo dos potenciais gerados na superfície do solo, para o caso de algoritmo considerando o fenômeno de ionização.

Considerando então um eletrodo enterrado horizontalmente no solo, alinhando ao eixo x e dividido em $N-1$ segmentos, a equação 5.21 a qual estabelece a relação entre um ponto P de análise na superfície do solo e a origem do eletrodo de aterramento, deve considerar agora a relação entre o mesmo ponto P e a origem de um dado segmento J de comprimento Δx , como ilustrado na Figura 38. Com a segmentação do eletrodo, a relação entre o ponto P e as coordenadas y e z apresentadas em 5.22 e 5.23 respectivamente permanecem inalteradas.

O fator f_c apresentado em 5.29 pode ser reescrito então por 5.33.

$$f_c = \ln \left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} + x}{\sqrt{(x - \Delta x)^2 + y^2 + z^2} + x - \Delta x} \right) \quad (5.33)$$

Pelo princípio da superposição, o potencial em um dado ponto P na superfície do solo em um instante de tempo t pode então ser estimado partindo da equação 5.32. Tem-se então:

$$V(x'', y'', z'', t) = \sum_{J=1}^N \left(\frac{I(J, t) \cdot e^{-j\omega t}}{2 \cdot \pi \cdot l \cdot (\sigma_s + j\omega \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r)} \cdot e^{j\gamma \cdot r} \cdot \ln \left[\frac{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} + x}{\sqrt{(x - \Delta x)^2 + y^2 + z^2} + x - \Delta x} \right] \right) \quad (5.34)$$

Onde:

$V(x'', y'', z'')$	potencial no ponto de coordenadas $P(x'', y'', z'')$ (V);
N	número máximo de nós do eletrodo;
J	nó no eletrodo;
$I(J, t)e^{-j\omega t}$	corrente complexa sobre o nó J no instante de tempo t (A);
ω	frequência angular (rad/s);
t	Instante de tempo (s);
Δx	comprimento do segmento representado pelo nó J (m);
ϵ_r	permissividade relativa do solo;

ϵ_0	permissividade do vácuo (F/m);
σ_s	condutividade do solo ($[\Omega\text{m}]^{-1}$);
γ	constante de propagação;
r	distância entre o ponto médio do condutor C e o ponto P na superfície do solo (m);
x	coordenada relativa definida por 5.21;
y	coordenada relativa definida por 5.22;
z	coordenada relativa definida por 5.23.

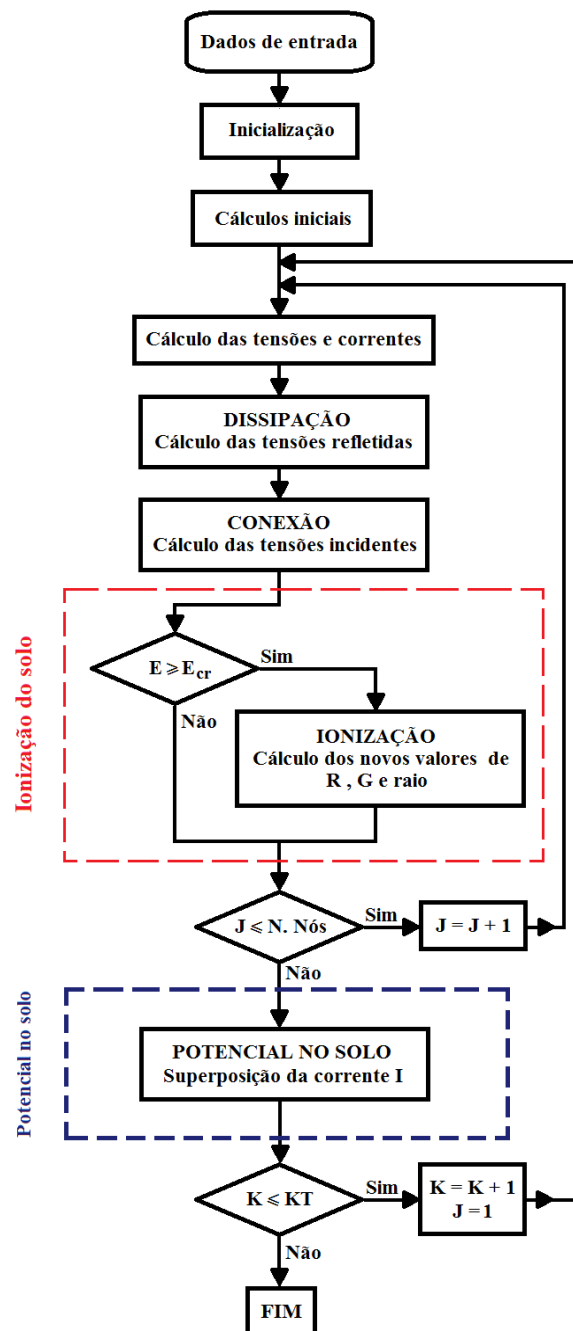


Figura 39 Fluxograma do algoritmo TLM-1D considerando a ionização e estimação de potencial na superfície do solo.

5.3.4 Computação e Resultados

Tomando-se como base o fluxograma apresentado na Figura 39 o potencial em um ponto na superfície do solo pode ser estimado. Adicionalmente, considerando a discretização do plano xy , superfícies de potenciais em um dado instante de tempo t bem como curvas equipotenciais podem ser determinadas. Entretanto, torna-se necessário estabelecer inicialmente a frequência a qual o potencial será calculado.

5.3.4.1 Identificação da Frequência de Cálculo

Analisando a equação 5.34 verifica-se que sua utilização está vinculada a determinação de uma frequência $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ para o cálculo do potencial no ponto P . Deste modo, atribui-se a metodologia apresentada a característica de dependência de uma única frequência, a qual pode ser entendida como o componente espectral presente no sinal de corrente aplicado ao eletrodo, dito mais representativo.

A Figura 40 ilustra um surto atmosférico de magnitude 10 kA (1×10) μ s, podendo ser interpretado como uma onda rápida⁴, no domínio tempo e frequência. Assim como constatado por (POLJAK, 2007), um surto atmosférico representado por uma onda tipo dupla exponencial como a da Figura 40a, possui um espectro de frequência relativamente constante para frequências na ordem dos kHz como pode ser visto na Figura 40b. Conseqüentemente, no domínio da frequência, pode-se assumir que um eletrodo de aterramento seja excitado por um sinal de corrente representado por uma única frequência.

De forma a complementar a constatação acima, considerou-se uma abordagem quantitativa apresentada em (VELASCO, 2010) onde o espectro de frequências para estudos de transitórios em sistemas elétricos de potência, para o caso especial de sobretensões provocadas por descargas atmosféricas, gira em torno de 10 kHz a 3 MHz. Assumiu-se então nas simulações aqui apresentadas como sendo 500 kHz a frequência de cálculo para a estimação dos potenciais gerados na superfície do solo. Esta frequência também é recomendada pelo grupo de trabalho do IEEE para modelagem e análise de transientes com rápidas frentes de onda (IMECE, 1996).

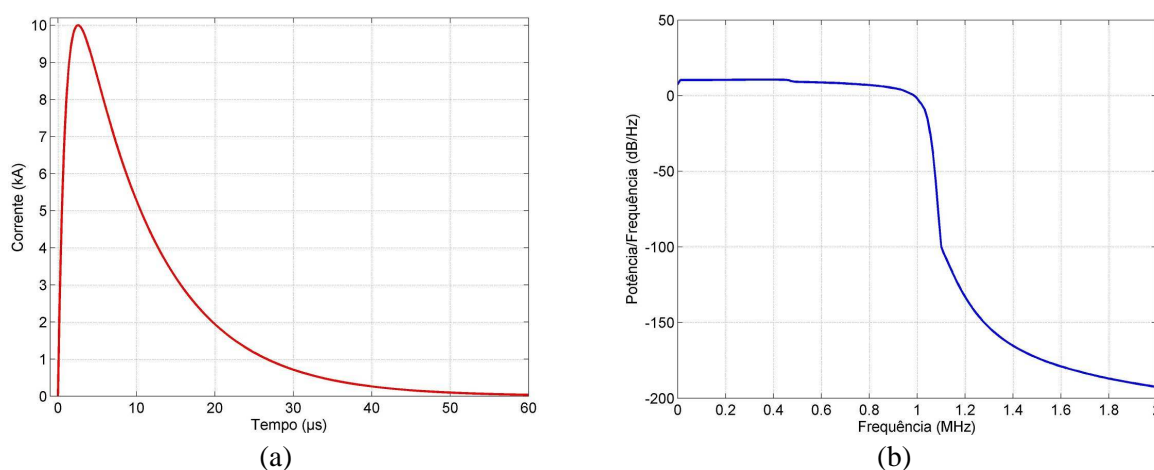


Figura 40 Surto de corrente: (a) domínio tempo; (b) domínio frequência.

5.3.4.2 Potencial em um Ponto e no Plano xy na Superfície do Solo

A fim de ilustrar a elevação de potencial na superfície do solo, considera-se um eletrodo horizontalmente enterrado em solo homogêneo paralelo ao eixo x , de comprimento $l = 10$ m,

⁴ Onda rápida é interpretada como um surto de corrente com tempo de subida aproximadamente igual a 1 μ s.

raio $a = 6.5$ mm e dividido em 10 segmentos ($\Delta x = 1$ m). No estudo em questão o solo é caracterizado pela sua resistividade $\rho_s = 100 \Omega\text{m}$ e permissividade relativa $\epsilon_r = 10$. Considera-se também um surto de corrente de 10 kA (8×20) μs aplicado na origem do eletrodo no ponto $C(x',y',z') = (0,0,-h)$ com uma frequência representativa $f = 500$ kHz. Vale ressaltar que todos os resultados estimados com base na equação 5.34 aqui apresentados, consideram o valor absoluto do potencial na superfície do solo.

A Figura 41 apresenta o potencial calculado no ponto $P(x'',y'',z'') = (0,0,0)$ localizado na superfície do solo sobre o ponto de inserção do surto no eletrodo considerando diferentes profundidades h de enterramento do condutor de aterramento.

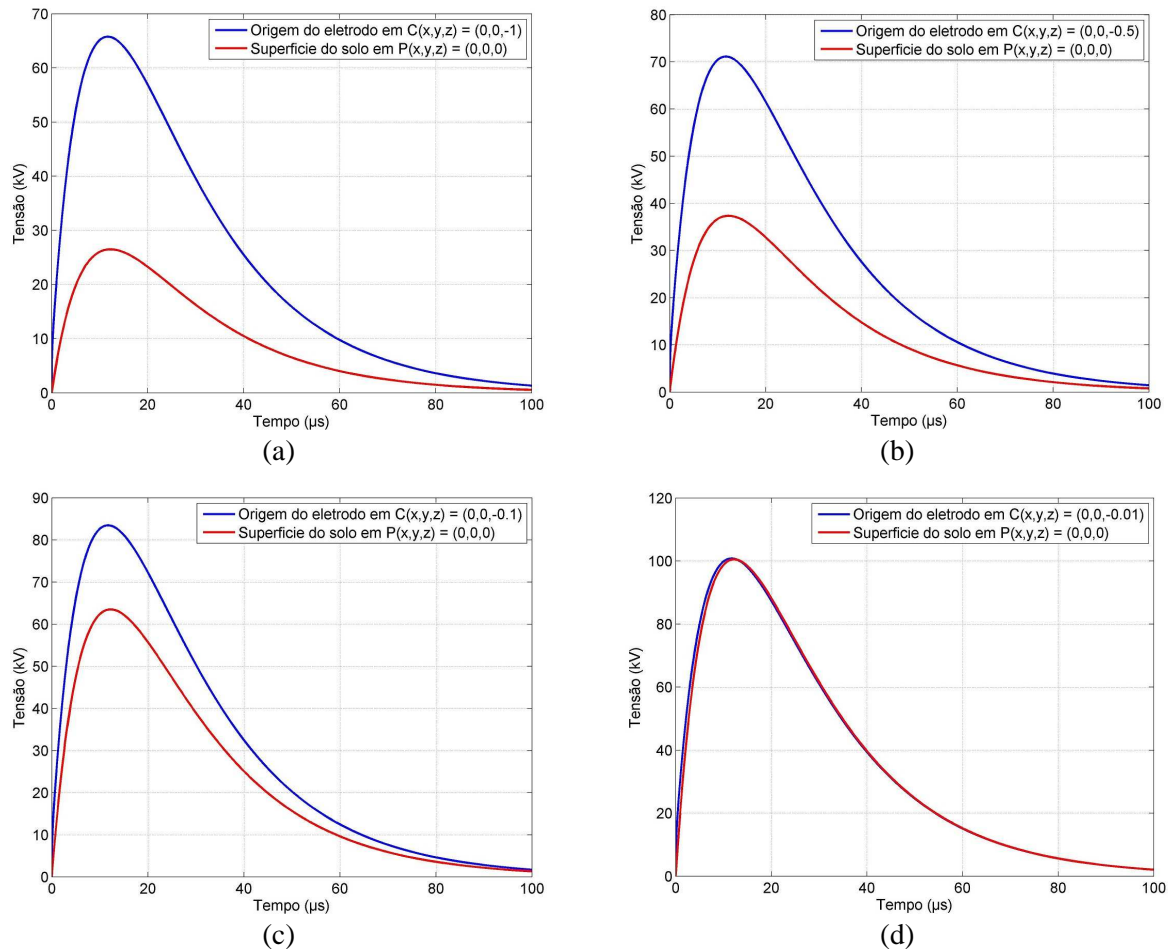


Figura 41 Potencial calculado em um ponto P na superfície do solo considerando diferentes profundidades do eletrodo de aterramento: (a) $h = 1$ m; (b) $h = 0.5$ m; (c) $h = 0.1$ m; (d) $h = 0.01$ m.

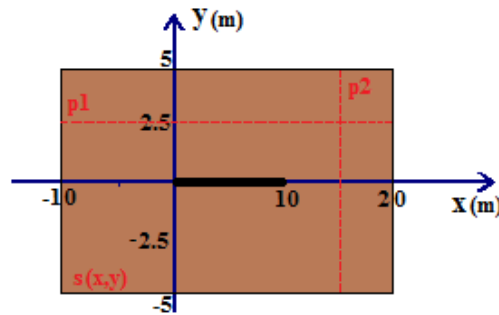
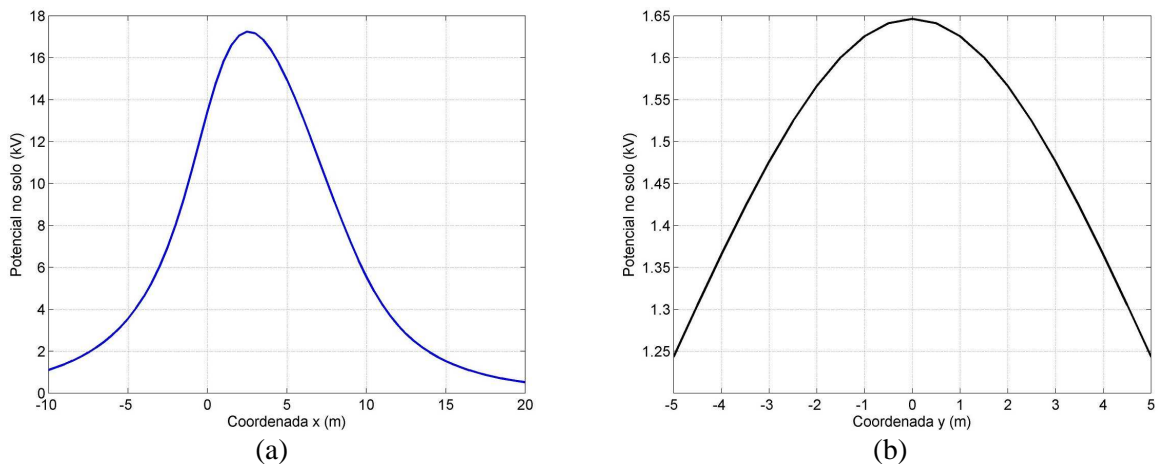
Analisando a Figura 41 verifica-se que com a diminuição da profundidade do enterramento do eletrodo, a tensão gerada no ponto de análise na superfície do solo aumenta. O mesmo comportamento pode ser observado com a tensão produzida sobre o eletrodo. Entretanto, a diferença de potencial entre a tensão produzida sobre o condutor e a tensão gerada no solo diminui com a profundidade. Ou seja, à medida que a disposição física de colocação de um condutor horizontal no solo se aproxima da superfície, a diferença de tensão entre eletrodo e a camada superficial do solo tende a ser nula. A Figura 41d, a qual considera uma profundidade de enterramento do eletrodo de 1 cm, contextualiza tal afirmação

A Tabela 4 quantifica os máximos potenciais produzidos no eletrodo e gerados na superfície do solo ilustrados na Figura 41, reforçando os argumentos acima apresentados.

Tabela 4 Máximos potenciais gerados sobre o eletrodo e na superfície do solo.

Profundidade do enterramento do eletrodo (m)	Tensão máxima sobre o eletrodo (kV)	Tensão máxima na superfície do solo (kV)	Diferença de tensão máxima (kV)
1	65.77	26.5	39.27
0.5	71.12	37.36	33.76
0.1	83.45	63.49	19.97
0.01	100.81	100.52	0.29

Dado um plano $s(x,y)$ localizado na superfície do solo, conforme ilustra a Figura 42, pode-se estimar a evolução do potencial sobre um segmento de reta presente neste plano para um dado instante de tempo t . Considerando então as mesmas características de surto, meio e eletrodo apresentados no exemplo anterior, para uma profundidade $h = 0.5$ m, o potencial sobre os perfis $p1$ e $p2$ para o instante de tempo $t = 12.3 \mu\text{s}$ pode ser visto na Figura 43. Utilizou-se neste exemplo uma discretização (passo em x para o perfil $p1$ e passo em y para o perfil $p2$) de 0.5 m.

**Figura 42** Domínio de estudo na superfície do solo.**Figura 43** Potencial calculado em um perfil na superfície do solo: (a) perfil $p1$; (b) perfil $p2$.

A computação de diversos pontos presentes no plano $s(x,y)$ conduz ao estabelecimento de superfícies de potencial sobre o solo, as quais podem ser compreendidas como a evolução do potencial produzido ao longo do tempo sobre a região de análise. Deste modo, a Figura 44 apresenta a evolução do potencial sobre o plano em estudo para diferentes instantes de tempo do período transitório.

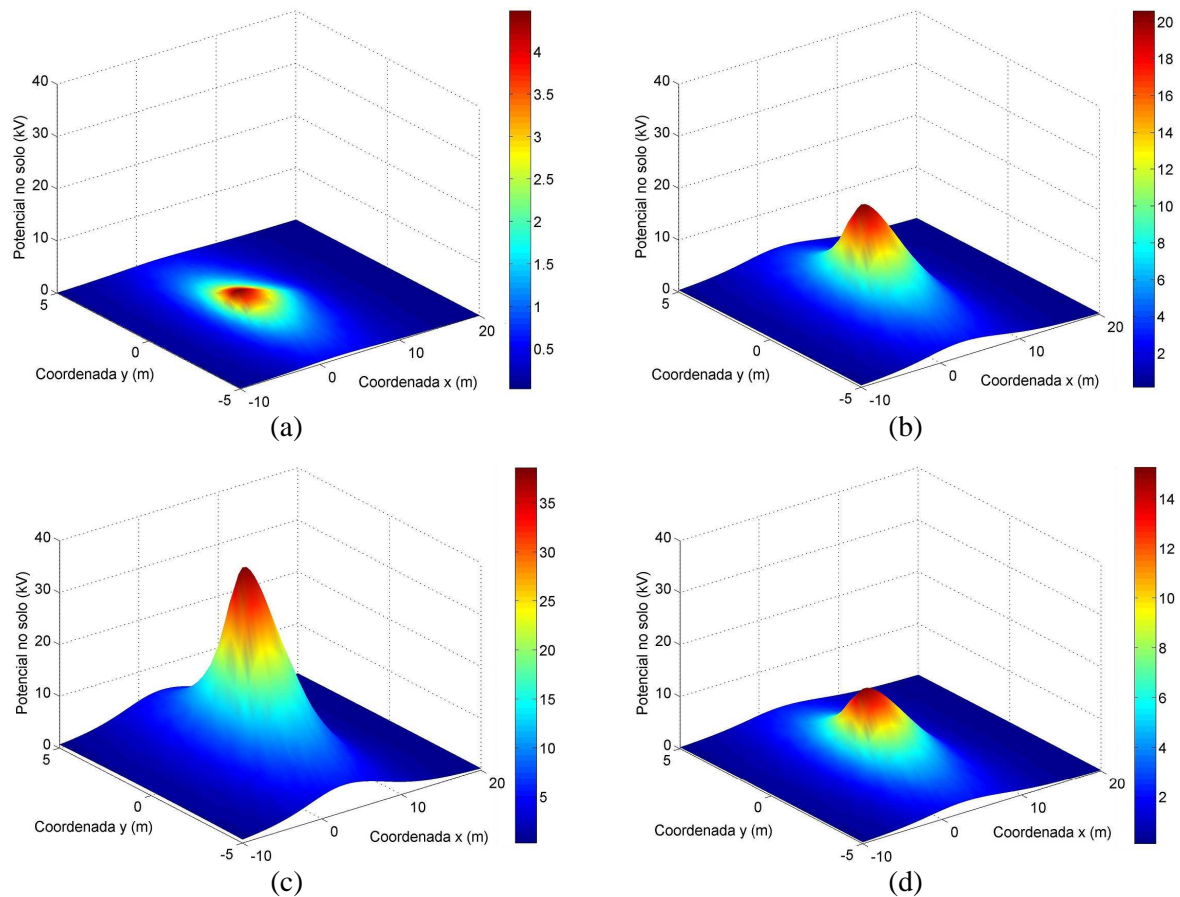


Figura 44 Superfícies de potencial geradas no solo para diferentes instantes de tempo: (a) primeiros instantes do transitório $t = 0.42 \mu\text{s}$; (b) $t = 2 \mu\text{s}$; (c) $t = 4.63 \mu\text{s}$; (d) $t = 47.3 \mu\text{s}$.

Por fim, com base na determinação de superfícies de potencial, podem ser estabelecidas curvas equipotenciais ao longo do tempo conforme mostra a Figura 45

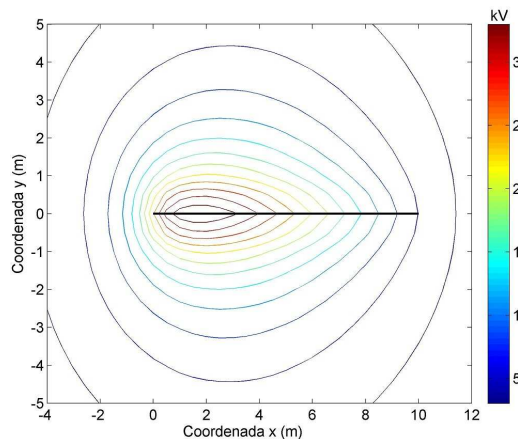


Figura 45 Curvas equipotenciais produzidas na superfície do solo em $t = 4.1 \mu\text{s}$.

5.3.5 Validação

De forma a validar o equacionamento proposto para, comparações foram realizadas com resultados provenientes de simulações realizadas em ferramenta computacional, a qual apresenta sua solução baseado no Modelo Eletromagnético (SES, 2006). Um condutor horizontalmente enterrado no solo de comprimento $l = 10 \text{ m}$ a uma profundidade $h = 0.5 \text{ m}$ e

raio $a = 6.5$ mm foi utilizado. A Figura 46 ilustra o comportamento da tensão produzida sobre a origem do condutor de aterramento para dois tipos de solo. Nesta simulação foi injetado um surto de corrente na origem do condutor, surto este caracterizado como sendo uma onda lenta⁵ representada pela função dupla exponencial $I(t) = 30412.19 \cdot (e^{-75949.24 \cdot t} - e^{-191649.8 \cdot t})$.

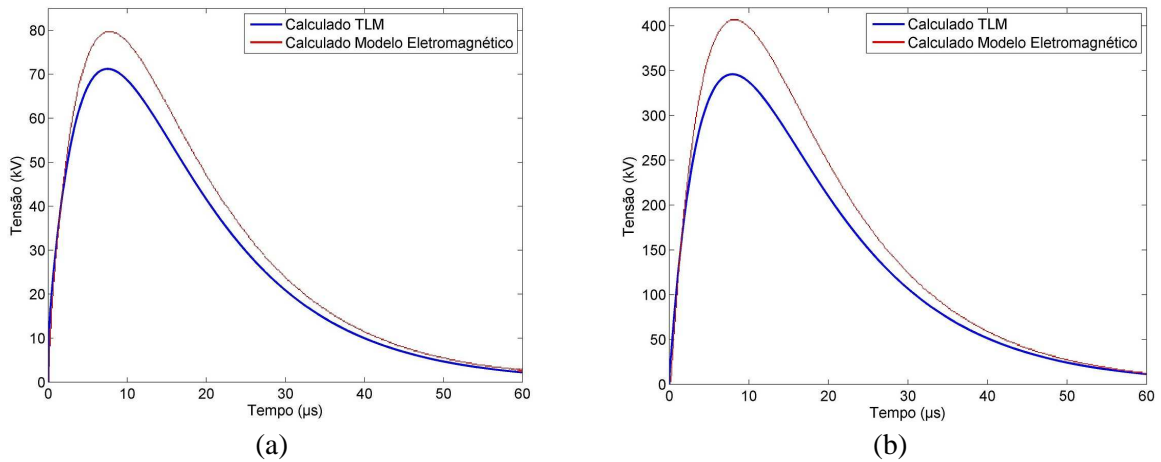


Figura 46 Comparação entre métodos: (a) potencial na origem do condutor para solo com $\rho_s = 100$ Ω m e $\epsilon_r = 10$; (b) potencial na origem do condutor para solo com $\rho_s = 500$ Ω m e $\epsilon_r = 10$.

Analisando os resultados apresentados na Figura 46, os quais comparam aproximações determinadas por dois métodos numéricos distintos, verifica-se que existe uma pequena diferença entre as aproximações fornecidas pelas duas metodologias. O Modelo Eletromagnético, mesmo sendo considerado o mais preciso, não considera em sua computação a ionização do solo, fenômeno este que tem como consequência a redução dos potenciais gerados sobre o eletrodo. Desta forma, as diferenças encontradas em magnitude, em parte são provenientes da inclusão deste fenômeno real ao cálculo baseado no Método TLM. Complementarmente, métodos de cálculo distintos, sempre irão fornecer soluções com um determinado grau de exatidão e consequente erro para a representação do real, fator este intrínseco aos seus próprios métodos de estimação. Na Figura 47 é apresentada uma comparação entre o potencial estimado na superfície do solo com base no equacionamento proposto, tendo-se como referência resultados provenientes do Modelo Eletromagnético.

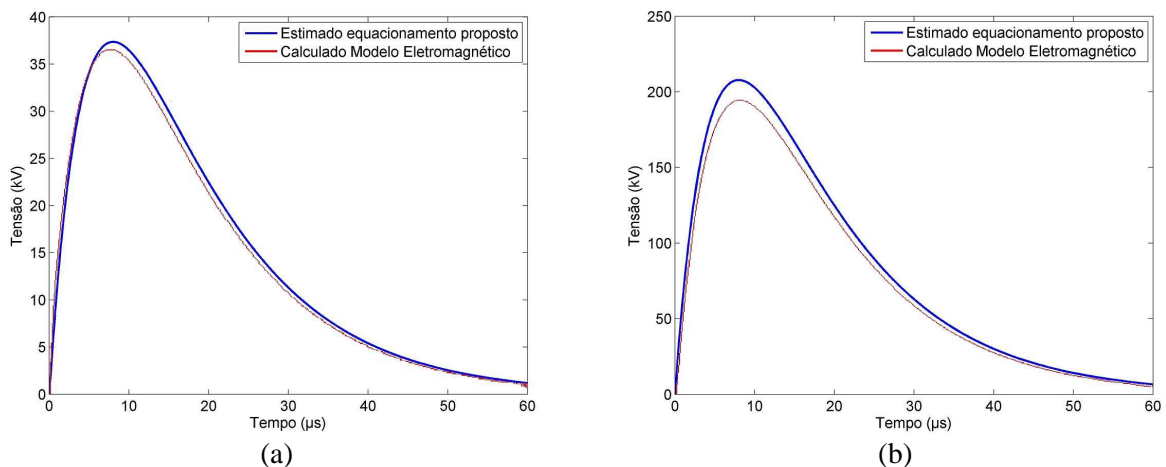


Figura 47 Comparação entre método numérico e formulação analítica proposta: (a) potencial gerado sobre a superfície do solo considerando $\rho_s = 100$ Ω m e $\epsilon_r = 10$; (b) potencial gerado sobre a superfície do solo considerando $\rho_s = 500$ Ω m e $\epsilon_r = 10$.

⁵ Onda lenta é interpretada como um surto de corrente com tempo de subida aproximadamente igual a 8 μ s.

Observando tais resultados, constata-se que a formulação analítica proposta apresenta um bom grau de precisão para a estimativa do potencial gerado no solo, tomando-se como referência o Modelo Eletromagnético, o qual se supõe representar de fato o processo físico real. Verifica-se uma boa resposta da aplicação do equacionamento para ambos os solos analisados, sendo que os potenciais determinados superestimam ligeiramente os estabelecidos pelo modelo de referência, fator este que em determinada ótica pode ser entendido com a favor da segurança.

Por fim, a Figura 48 reforça a validação do equacionamento proposto considerando a aplicação de um surto de corrente caracterizado como sendo uma onda rápida, representada pela função dupla exponencial $I(t) = 11043.33 \cdot (e^{-79238.91t} - e^{-4001095t})$. Nesta simulação, um eletrodo com as mesmas características apresentadas anteriormente considerando um solo de $\rho_s = 500 \Omega\text{m}$ e $\epsilon_r = 10$ foi utilizado.

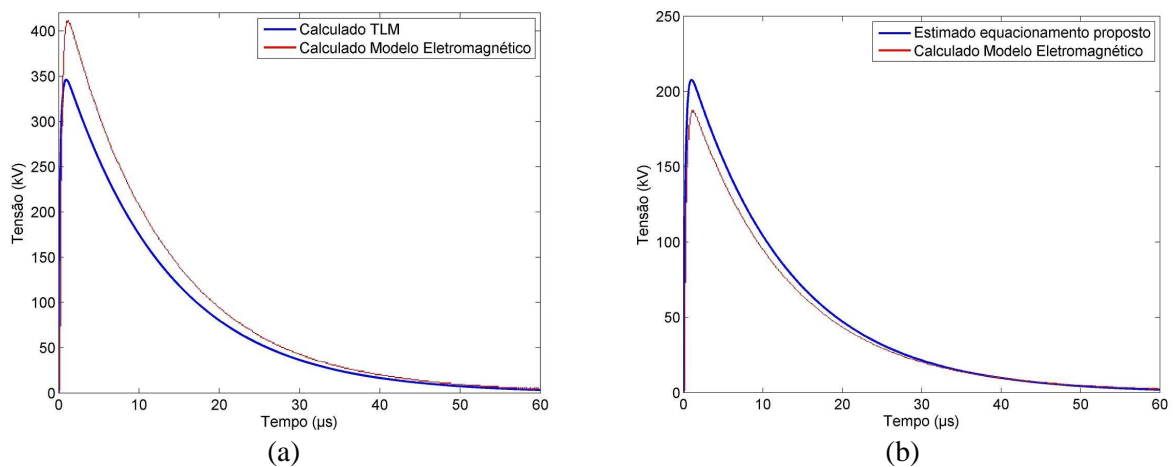


Figura 48 Comparação entre métodos e equacionamento para um surto de corrente rápido: (a) comparação entre métodos para determinação do potencial na origem do condutor; (b) potencial gerado sobre a superfície do solo.

Assim como para ondas mais lentas, para o caso de ondas rápidas a formulação desenvolvida apresentou bons resultados. Adicionalmente, solos com resistividade variando de $80 \Omega\text{m}$ até $1000 \Omega\text{m}$ e permissividade na escala de 15 a 6 foram considerados apresentando convergência satisfatória.

5.3.6 Considerações Sobre o Estudo

Nesta seção do trabalho, foi apresentada uma contribuição ao estudo de aterramento impulsivo baseado na determinação de formulação analítica para estimar o potencial gerado na superfície do solo, podendo ser utilizada em conjunto com método numérico de uma dimensão.

Tal equacionamento não está restrito a ser utilizado em conjunto com o Método TLM-1D apenas, tendo caráter generalista com aplicabilidade a demais metodologias que sejam capazes de estimar a corrente elétrica sobre o eletrodo.

Dentre as aproximações conferidas ao referido equacionamento, considerou-se que a estimativa do potencial é feita com base em uma única frequência, podendo ser interpretada como a frequência característica ou mais representativa, dentro de um espectro de múltiplas frequências presente em um surto atmosférico. Com base nas simulações realizadas e tendo-se como referência recomendações presentes no o estado da arte, determinou-se um componente espectral como sendo o mais expressivo, 500 kHz . Entretanto tal determinação não é definitiva, dando margem para uma investigação mais aprofundada. Ainda, a garantia de

maiores precisões da aplicação do equacionamento está condicionada a relação entre o comprimento de onda λ e o ponto de cálculo na superfície do solo. Deste modo, a medida que a distância entre o ponto médio do condutor e o ponto na superfície do solo, definido como r , se aproxima do valor do comprimento de onda λ , o erro de estimação tende a aumentar.

Finalmente, o equacionamento proposto mostrou ser uma solução robusta para a estimação de potenciais no solo, gerando subsídios para o desenvolvimento de estudos associados à suportabilidade e segurança de seres humanos.

5.4 Estudo de Suportabilidade em Seres Humanos

Via de regra, no projeto de sistemas de aterramento, tanto para sistemas de distribuição e transmissão de energia elétrica bem como para proteção de instalações de uma maneira geral, o principal critério de desempenho esta relacionado com a obtenção de baixos valores de resistência estática de aterramento. Este quesito de projeto confere apenas garantias de que elevadas correntes provenientes de um dado distúrbio seguirão o caminho de menor impedância. Entretanto, este procedimento não garante segurança pessoal (TELLÓ, 2007a).

Não é usual avaliar a corrente elétrica tolerável pelo ser humano oriunda de descargas atmosféricas, bem como para frequências superiores a frequência industrial (60 Hz), visto que atualmente não se têm critérios fundamentalmente definidos para tal fim. A normalização em vigor que apresenta procedimentos de cálculo para determinação de potenciais de passo e toque além de correntes toleráveis pelo ser humano é a (IEEE Std 80, 2000) sendo a mesma baseada em diversas pesquisas realizadas até então, como foco em corrente alternada para baixas frequências.

Diferentemente dos estudos relacionados ao efeito da corrente alternada para baixas frequências e magnitudes não elevadas, pesquisas vinculadas a toda e qualquer análise referente aos efeitos de descargas atmosféricas em seres humanos são de difícil realização. Deste modo, a utilização de modelos computacionais representativos do corpo humano é uma alternativa viável para o desenvolvimento de novas pesquisas, servindo como base para a compreensão e identificação dos efeitos e possíveis danos provocados por um surto atmosférico.

Neste contexto, serão apresentadas as contribuições deste trabalho referentes à interação do ser humano em contato com um surto atmosférico mediado pelo sistema de aterramento. Tomando-se como referência o modelo apresentado em (ANDREWS, 2003) propõe-se um estudo para a determinação e análise da corrente elétrica circulante pelo coração considerando as tensões geradas no eletrodo de aterramento e solo. A fim de limitar o escopo do trabalho, o estudo fundamenta-se na análise dos mecanismos referentes ao potencial de passo, potencial de toque e transferido.

Vale ressaltar que a contribuição deste trabalho não tem foco na determinação de potenciais ou correntes toleráveis vinculadas a estudos de suportabilidade de seres humanos contra descargas atmosféricas, mas sim apresentar metodologia e modelo que possa ser utilizada em pesquisas futuras para tal fim.

5.4.1 Conceituação do Problema

Para o desenvolvimento de modelo computacional com o intuito de avaliar o comportamento do corpo humano submetido a um surto atmosférico, torna-se necessário estabelecer parâmetros de referência para tal fim além da identificação da mecânica do contato com este fenômeno natural.

Pode-se dizer em linhas gerais que os danos provocados em seres humanos, no caso especial de contato direto ou indireto com um surto atmosférico, estão associados aos campos

eletromagnéticos e correntes geradas, as quais podem provocar parada cardíaca além de efeitos indesejáveis de longa e curta duração. Segundo (BIER, 2005), devido ao rápido período de tempo associado à corrente de um surto atmosférico, o aquecimento não é responsável pelos danos internos provocados ao corpo humano, sendo este dano atribuído a fenômenos elétricos.

Um dos possíveis efeitos da exposição à corrente elétrica ao corpo humano é a fibrilação ventricular do coração. Este distúrbio é provocado pela excitação caótica do miocárdio, resultando em perda da coordenação das contrações características dos batimentos do coração. A fibrilação ventricular pode conduzir a uma parada cardíaca, podendo ser fatal (BRONZINO, 2000). Diversos trabalhos realizados por Dalziel estiveram focados na análise dos efeitos da corrente elétrica ao passar pelo corpo humano, dentre eles em (DALZIEL, 1960) apresenta-se um estudo referente à determinação de limites para a fibrilação ventricular do coração, entretanto para a frequência de 60 Hz.

Sabe-se que além da frequência, a corrente elétrica ao passar pelo corpo tem seus efeitos associados a sua magnitude e tempo de duração. Deste modo, uma abordagem em termos de energia gerada pode ser utilizada como um parâmetro de referência para estudos de suportabilidade e segurança pessoal. A energia E (J) associada a um dado fenômeno pode ser compreendida como o produto entre a tensão V (V), a corrente I (A) e tempo t (s) de exposição conforme apresentado na equação 5.35.

$$E = V \cdot I \cdot t \quad (5.35)$$

Ainda, segundo (IEC 62305-4, 2006), a energia específica E_e dissipada por um surto atmosférico pode ser definida como a integral do quadrado da corrente I durante o período de tempo t do surto atmosférico. Logo, a equação 5.35 pode ser reescrita como segue, onde E_e é a energia por unidade de resistência (J/ Ω).

$$E_e = \int_0^t I^2 dt \quad (5.36)$$

Tal definição apresentada em 5.36 pode ser utilizada para determinar a energia específica de fibrilação ventricular do coração, considerando então a corrente elétrica que passa pelo mesmo, provocada por um transitório eletromagnético.

Tendo-se estabelecido a corrente elétrica e conseqüentemente a energia específica para a fibrilação ventricular como parâmetros de referências, torna-se necessário definir os mecanismos de contato com o fenômeno transitório. Dentre tais mecanismos apresentados no capítulo 3 optou-se por avaliar o potencial de passo, potencial de contato ou toque e um caso particular deste, o potencial transferido.

Diferentemente, dos estudos realizados por (ANDREWS, 2003; MISBAH, 2011) os quais também utilizam modelos baseados em circuitos para estudos relacionados a mecanismos de contato, no presente trabalho tal análise é feita com base na consideração da presença do sistema de aterramento como elemento mediador entre o surto e ser humano.

Considerando então o potencial de passo, as correntes geradas no corpo humano são provenientes da diferença de potencial no solo. Neste mecanismo, um surto atinge o sistema de aterramento, a corrente é propagada pelo mesmo e dissipada para o solo. Conseqüentemente, uma pessoa em sua superfície será submetida a distintos potenciais em cada um de seus pés, representados na Figura 49 por V_{1solo} e V_{2solo} . Pode-se dizer que esta é uma forma de contato dita indireta, onde a corrente elétrica gerada sobre o coração é proveniente de um potencial de passo variante no tempo.

O segundo mecanismo em foco neste estudo refere-se ao contato direto com um ponto energizado por um surto atmosférico, no caso o sistema de aterramento. Neste caso a corrente

elétrica também atinge tal sistema, porém o caminho da mesma é dividido, parte sendo propagada pelo aterramento e dissipada para o solo e parte percorrendo o corpo partindo do ponto de contato. Para este caso, considera-se então que a corrente a qual um ser humano será submetido é procedente da diferença de potencial entre o ponto de toque no eletrodo de aterramento e a superfície do solo. Estes potenciais são ilustrados na Figura 50a por $V_{eletrodo}$ e V_{solo} respectivamente.

Na Figura 50b, um caso particular do mecanismo de contato chamado de potencial transferido é ilustrado. Nesta circunstância, a diferença de potencial dá-se entre o local de contato sobre o eletrodo e a superfície do solo a uma grande distância do ponto de injeção do surto, vinculado a existência de um terra remoto com potencial igual a zero V. Para ambos os casos do mecanismo de contato (potencial de toque e transferido), considera-se que a corrente que irá fluir sobre o coração é proveniente de um potencial variante no tempo.

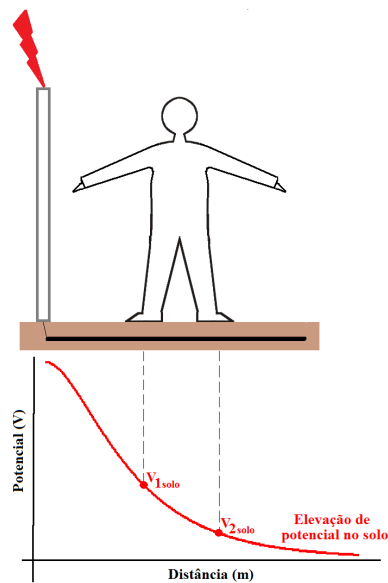


Figura 49 Mecanismo de potencial de passo mediado pelo sistema de aterramento.

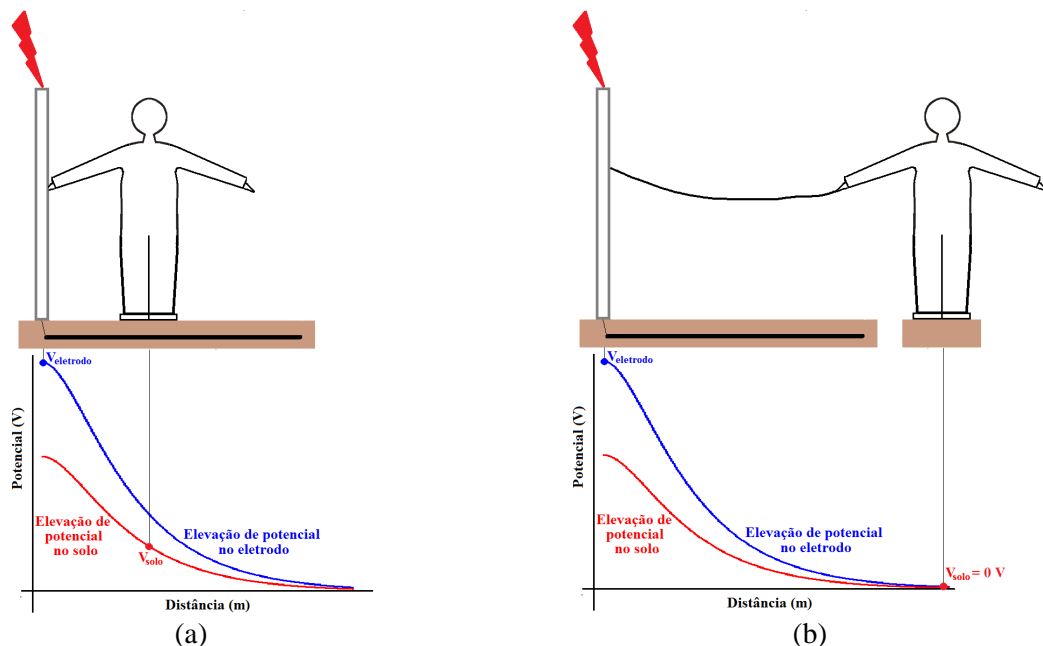


Figura 50 Mecanismo de potencial de contato mediado pelo sistema de aterramento: (a) potencial de toque; (b) potencial transferido.

Vale ressaltar que a consideração do potencial gerado na superfície do solo na implementação do modelo apresenta relevância, especialmente para o caso de potencial de toque, onde a diferença de potencial entre ponto de contato no eletrodo e solo é maior se comparada a uma aproximação menos conservadora, onde tal diferença poderia ser estimada apenas com base em potenciais produzidos sobre o eletrodo.

Por fim, tendo-se estabelecido a corrente elétrica e conseqüentemente a energia gerada sobre o coração como parâmetros de referência e determinado os mecanismo de contato com surto atmosférico, pode-se proceder com o desenvolvimento de modelo computacional tendo o intuito de promover estudo sobre suportabilidade e segurança pessoal.

5.4.2 Caracterização e Parametrização do Modelo

Tomando-se como referência o modelo representativo do corpo humano proposto por (ANDREWS, 2003) reapresentado na Figura 51, pode-se realizar algumas adaptações a fim de avaliar o comportamento da corrente elétrica ao passar pelo coração. Para tanto, adota-se os mecanismos de contato acima apresentados, considerando contato direto ou indireto com um surto atmosférico mediado pelo sistema de aterramento.

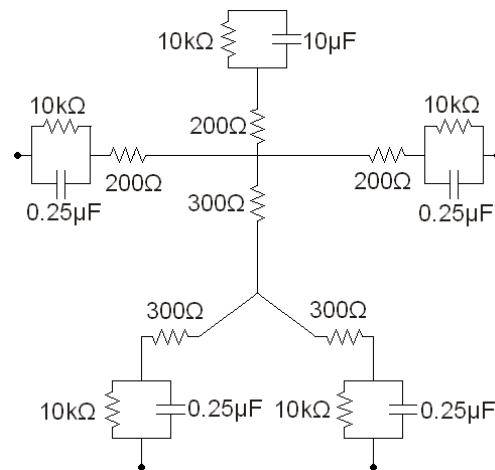


Figura 51 Modelo base do corpo humano utilizado nas simulações.

Para ambos os mecanismos, inclui-se ao modelo um resistência de contato com o solo $R_{contato}$. Segundo (MELIOPOULOS, 1988) a seguinte expressão pode ser utilizada no caso de uma pessoa sobre a superfície do solo com resistividade ρ_s (Ωm), onde $a_{contato}$ (m) é o raio do círculo equivalente associado ao ponto de contato.

$$R_{contato} = \frac{\rho_s}{8 \cdot a_{contato}} \quad (5.37)$$

Ainda, Meliopoulos argumenta que a expressão 5.37 pode ser aproximada por 5.38.

$$R_{contato} \cong 3 \cdot \rho_s \quad (5.38)$$

No modelo do corpo humano apresentado em (MISBAH, 2011), para a realização das simulações dos mecanismos de contato com surto atmosférico, os autores consideraram que as extremidades do circuito equivalente estariam conectadas a um componente de alta resistência, 1 G Ω , conectados por sua vez ao terra remoto. Esta suposição justifica-se pela necessidade de um caminho para a corrente elétrica passando pelo peito, especialmente para o caso de submissão ao potencial de passo. Caso contrário, a corrente elétrica fluiria apenas entre as pernas indo em direção ao terra. Entretanto, este componente definido empiricamente, é passível de uma maior investigação.

A Figura 52 ilustra o circuito equivalente do modelo proposto, o qual será utilizado para a análise do comportamento da corrente sobre o coração $I_{\text{coração}}$ para o mecanismo de potencial de passo. Tal corrente é gerada a partir da diferença de potencial no solo entre dois pontos na sua superfície, conforme apresentado na Figura 49.

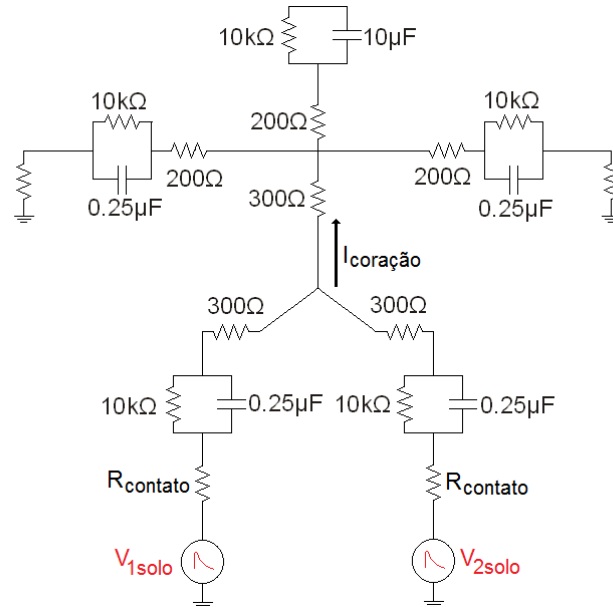


Figura 52 Circuito equivalente do corpo humano considerando potencial de passo.

A corrente sobre o coração, para o caso do mecanismo de potencial de toque, pode ser estimada com base no circuito equivalente apresentado na Figura 53. Verifica-se que para este caso $I_{\text{coração}}$ é resultante da diferença de potencial entre eletrodo e superfície do solo como ilustra a Figura 50a.

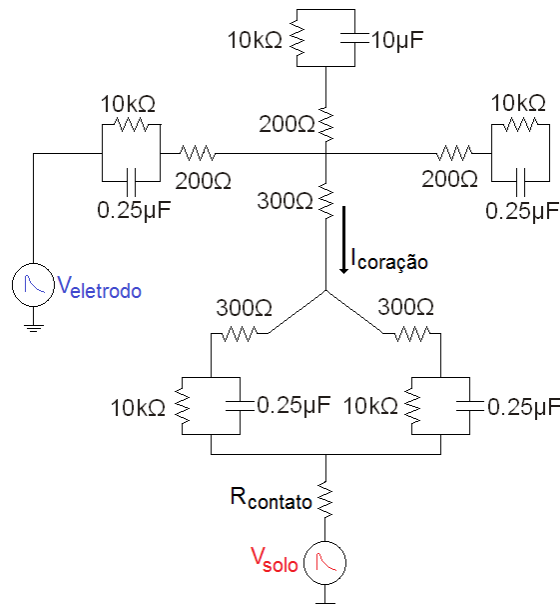


Figura 53 Circuito equivalente do corpo humano considerando potencial de toque.

Na Figura 54 apresenta-se o modelo representativo baseado em circuitos para a determinação da corrente $I_{\text{coração}}$ proveniente de um potencial transferido. Para este caso, a diferença de potencial dá-se entre o ponto de contato e o terra remoto, como pode ser visto na Figura 50b.

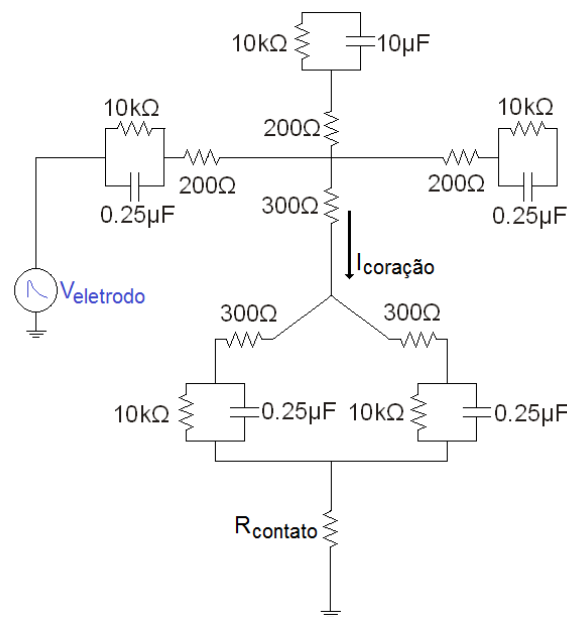


Figura 54 Circuito equivalente do corpo humano considerando potencial transferido.

Verifica-se que para os três mecanismos de contato com surto atmosférico mediado pela presença do sistema de aterramento, os modelos acima apresentados são dependentes da resistividade do solo ρ_s para a determinação da resistência de contato $R_{contato}$.

5.4.3 Implementação Computacional

Diferentemente dos estudos anteriormente apresentados, o desenvolvimento de modelo do corpo humano submetido a contato com surto atmosférico mediado pelo sistema de aterramento não necessita de desenvolvimento vinculado a implementação numérica. Entretanto, para determinar as grandezas elétricas de interesse sobre tal modelo, torna-se necessário a utilização de ferramenta computacional que permita a simulação de circuitos elétricos, como é o caso da plataforma MATLAB/Simulink (MATHWORKS, 2012) ou outro software que possibilite tal modelagem, bem como análise transitória. Para tanto, torna-se necessário determinar anteriormente os potenciais sobre o eletrodo e superfície do solo, podendo os mesmos ser estimados com base nos métodos propostos neste trabalho.

Procede-se então com a implementação dos modelos apresentados na Figura 52 a Figura 54. Como mencionado anteriormente, adotou-se a corrente e a energia específica de fibrilação ventricular do coração como parâmetros de referência para os estudos de suportabilidade e segurança pessoal.

Deste modo, considerando a corrente $I_{coração}$ e baseando-se numa aproximação discreta da equação 5.36, a energia $E_{coração}$ pode ser estimada pela equação 5.39.

$$E_{coração} \equiv \sum_{t=1}^{KT} I_{coração}^2(t) \cdot \Delta t \quad (5.39)$$

Na referida equação, $E_{coração}$ (J/Ω) pode ser estimada como a área sob a curva de corrente $I_{coração}^2(t)$ (A), onde Δt (s) é o passo de tempo utilizado e KT o número máximo de iterações.

Por fim, sabendo-se que a resistência elétrica do coração dos seres humanos esta dentro da faixa de 25Ω a 150Ω (BRONZINO, 2000), pode-se estimar a energia em J sobre o mesmo, resultante do contato com os mecanismos já apresentados.

5.4.4 Computação e Resultados

A fim de ilustrar o comportamento do modelo representativo do corpo humano baseado em circuitos, bem como quantificar os parâmetros de referência para estudos de suportabilidade alguns exemplos serão apresentado.

Considerou-se então nas simulações, o contato com um surto atmosférico mediado pelo sistema de aterramento composto por um eletrodo horizontal de comprimento $l = 9$ m e raio $a = 75$ mm enterrado a uma profundidade $h = 0.5$ m. Para tanto, em todos os mecanismos em análise, adotou-se solo homogêneo com resistividade $\rho_s = 500 \Omega\text{m}$ e permissividade relativa $\epsilon_r = 10$. Como fonte de excitação, um surto atmosférico de 10 kA (8×20) μs foi utilizado. Nas referidas simulações o fenômeno de ionização do solo foi considerado e os potenciais gerados na superfície do mesmo foram determinados para a frequência de 500 kHz.

A Figura 55 apresenta de forma qualitativa as grandezas de interesse envolvidas no estudo de suportabilidade considerando o mecanismo de potencial de passo. Tal estudo foi realizado com base na utilização do modelo ilustrado na Figura 52, onde $R_{contato} = 1500 \Omega$. Para tanto, considerou-se uma distância de 1 m entre os pés de uma pessoa exatamente sobre o ponto de injeção do surto.

A elevação de potencial sobre os dois pontos de contato na superfície do solo representado pelas curvas V_{1solo} e V_{2solo} é apresentada na Figura 55a. Nesta figura, também pode ser verificado a diferença de potencial entre os dois pontos de contato, ou o potencial de passo, tensão esta que será responsável pelas correntes circulantes no modelo.

Por sua vez, a Figura 55b mostra a corrente $I_{coração}$ que flui através de coração, de valor máximo igual a 0.245 A, proveniente da diferença de potencial gerada no solo. Utilizando então a equação 5.39 pode-se estimar a energia sobre o coração, a qual assume o valor de $7.43 \cdot 10^{-6} \text{ J}/\Omega$.

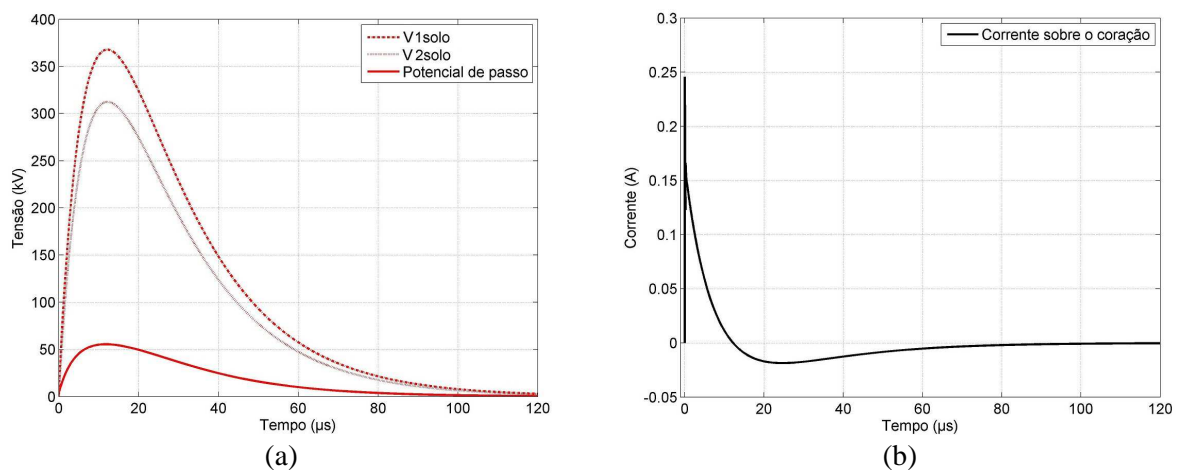


Figura 55 Estudo de suportabilidade para mecanismo de potencial de passo: (a) potenciais gerados; (b) corrente sobre o coração.

As grandezas sobre análise relacionadas ao mecanismo de potencial de toque podem ser visualizadas nos gráficos da Figura 56. Para este estudo, o modelo apresentado na Figura 53 foi utilizado, sendo determinado o valor de $R_{contato} = 750 \Omega$, correspondendo ao paralelo da resistência de contato dos dois pés com o solo. Esta simulação representa o contato direto de uma das mãos com o ponto de incidência do surto no sistema de aterramento, sendo que os pés estão juntos sobre o solo, afastados 1 m do ponto de contato.

Na Figura 56a pode-se visualizar os dois potenciais a qual o modelo é submetido, $V_{eletrodo}$ e V_{solo} resultando em uma corrente elétrica fluindo pelo coração atingindo o valor de 38.15 A

conforme ilustra a Figura 56b. Associada a esta corrente, com base na equação 5.39, estima-se uma energia de $3.47 \text{ J}/\Omega$ sobre o coração.

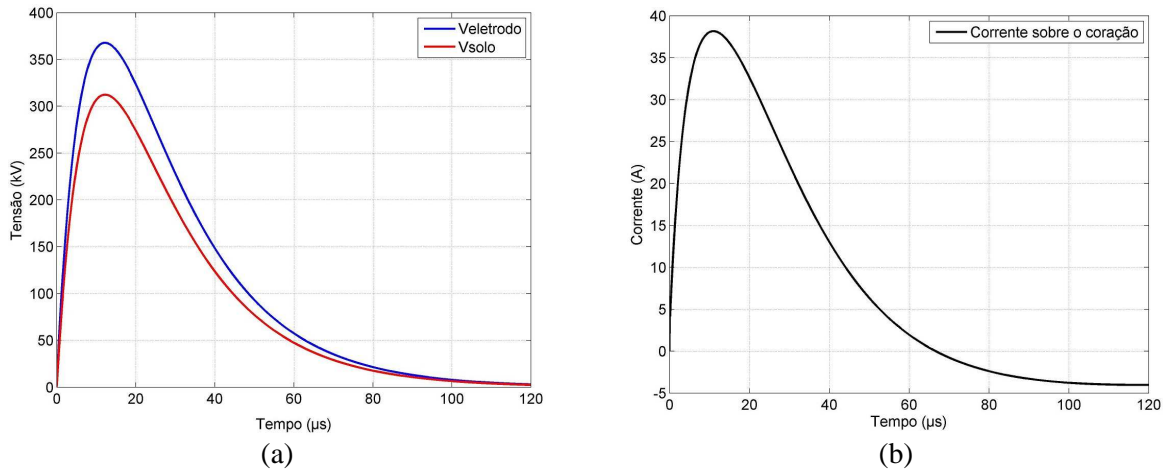


Figura 56 Estudo de suportabilidade para mecanismo de potencial de toque: (a) potenciais gerados; (b) corrente sobre o coração.

Por fim, a Figura 57 apresenta o comportamento das grandezas de interesse considerando o mecanismo de potencial transferido. Nesta simulação, o modelo apresentado na Figura 54 foi utilizado. Sendo este caso uma particularidade do mecanismo de potencial de contato, a tensão submetida ao modelo é proveniente apenas do ponto de contato no eletrodo, no caso a origem do mesmo, onde os pés encontram-se juntos sobre o solo em um local afastado da injeção do surto com potencial igual a zero V. A Figura 57a reapresenta o potencial sobre o condutor utilizado no estudo, tendo como consequência a geração de uma corrente sobre o coração, com magnitude máxima de 253.24 A , como ilustrado na Figura 57b. Vinculada a esta corrente, determina-se uma energia de $142.34 \text{ J}/\Omega$ no coração.

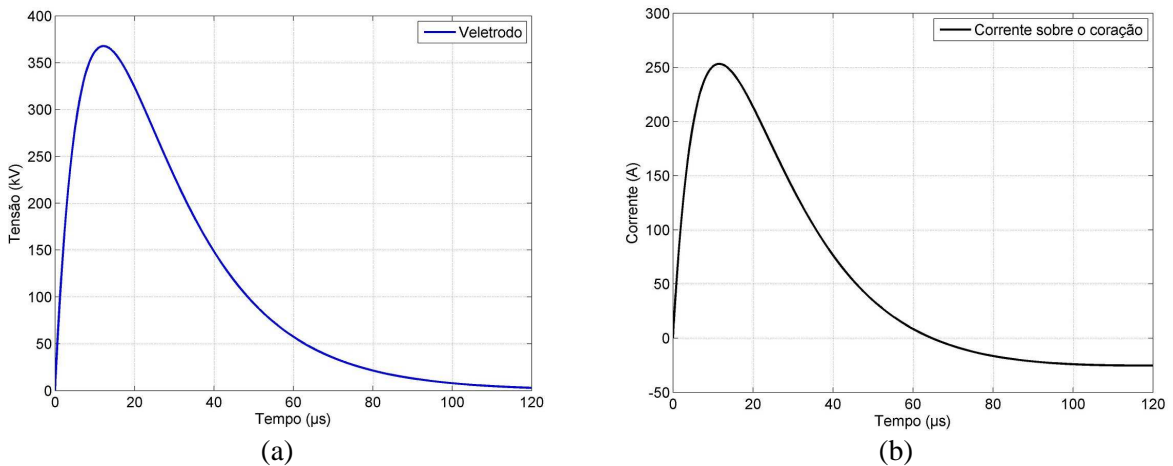


Figura 57 Estudo de suportabilidade para o mecanismo de potencial transferido: (a) potencial gerado; (b) corrente sobre o coração.

A Tabela 5 quantifica os parâmetros de referência apresentados nas figuras anteriores para os três mecanismos em estudo.

Analisando tais resultados, verifica-se que para o caso do mecanismo de potencial de passo, tanto a magnitude da corrente sobre o coração como a energia gerada não apresentam valores expressivos. Por outro lado, tais parâmetros de referência passam a ter valores mais significativos considerando os potenciais de contato, especialmente para o caso de potencial transferido.

Tabela 5 Quantificação de parâmetros de referência para estudo de suportabilidade.

Mecanismo de contato	Corrente máxima sobre o coração (A)	Energia gerada no coração (J/Ω)
Potencial de passo	0.245	$7.43 \cdot 10^{-6}$
Potencial de toque	38.15	3.47
Potencial transferido	253.24	142.34

Destaca-se que no caso do estudo em questão, a magnitude do surto aplicado 10 kA é relativamente baixa se comparada aos valores usualmente atribuídos a descargas atmosféricas 4 kA a 250 kA (IEC/TR 60479-4, 2004). Consequentemente, a corrente bem como a energia gerada depende de tais magnitudes. Ainda, a resistividade do solo exerce papel relevante na quantificação dos parâmetros de referência, visto que solos mais resistivos conduzem a geração de maiores níveis de energia. Parâmetros relacionados às dimensões do eletrodo também influenciam de maneira significativa na geração de potenciais associados aos mecanismos de contato com surto atmosférico, em especial seu comprimento.

Considerando então valores típicos de resistência do coração de seres humanos (ZOLL, 2012) pode-se estimar a energia relacionada à fibrilação ventricular do coração em J para os casos em estudo, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 Energia associada à fibrilação ventricular do coração.

Mecanismo de contato	$E_{\text{coração}}$ (J/Ω)	Resistência do coração (Ω)			
		75 Ω	100 Ω	125 Ω	150 Ω
Potencial de passo	$7.43 \cdot 10^{-6}$	$5.57 \cdot 10^{-4}$	$7.43 \cdot 10^{-4}$	$9.29 \cdot 10^{-4}$	$1.1 \cdot 10^{-3}$
Potencial de toque	3.47	260.25	347	433.75	520.5
Potencial transferido	142.34	10676	14234	17793	21351

A título de contextualização, a energia derivada de choque elétrico na maioria dos equipamentos para a desfibrilação ventricular gira em torno de 50 a 360 J (BRONZINO, 2000).

Finalmente, algumas das tentativas reportadas na literatura referente à determinação de limites de referência para a fibrilação ventricular do coração dentre outros danos associados, são obtidos com base em tempos de exposição da ordem de milissegundos, considerando corrente alternada, baixas frequências e probabilidade de risco (IEC/TS 60479-2, 2007). Entretanto, algumas extrapolações têm sido feitas com base nos critérios de (DALZIEL, 1972). Como por exemplo, segundo (ANDREWS, 2003) uma corrente de 199 A durante 340 ns pode ser considerada fatal. Tomando-se como base tal parâmetro de referência, no caso das simulações realizadas, o mecanismo de potencial transferido sinaliza para uma condição de letalidade e o potencial de toque indica uma condição no mínimo potencialmente perigosa.

5.4.5 Validação

O processo de validação de um modelo representativo do corpo humano pode ser considerado uma tarefa não trivial, principalmente pelo fato na inexistência de dados reais de medição. Motivo este reforçado pela impossibilidade da submissão de seres humanos a contato com choque elétrico com as características desejadas, ato este inaceitável. Ainda, os modelos

existentes na literatura consideram apenas o contato com os diferentes mecanismos sem a consideração do sistema de aterramento como elemento mediador entre surto e ser humano. Entretanto, algumas considerações podem ser feitas com base nos estudos previamente reportados.

No que diz respeito aos mecanismos estudados, é evidenciado na literatura que para o caso de potencial de passo os efeitos associados a tal exposição são interpretados como sendo de curta duração, longa duração e térmicos não levando a morte pela fibrilação ventricular do coração (ANDREWS, 2003; COOPER, 2008; MISBAH, 2011). Adicionalmente, a norma (IEC/TR 60479-4, 2004) comenta que uma eventual letalidade seria causada por parada respiratória ao invés de fibrilação ventricular.

Analisando o comportamento dos parâmetros de referência para os cenários estudados, conclui-se que a quantificação de tais grandezas converge para uma condição não letal para o caso de potencial de passo e potencialmente danosa para o potencial de toque, visto que as mesmas vinculam-se a baixos e médios valores de corrente e energia respectivamente. Tal constatação reafirma os pressupostos descritos na literatura. Salvo a esta observação, o mecanismo de potencial transferido sinaliza a uma condição dita de alto risco.

Uma comparação quantitativa também pode ser feita com base nas constatações de (ANDREWS, 2003) referente ao potencial de passo. Segundo o Modelo de Andrews, considerando uma pessoa afastada 10 m do local do surto com separação entre pernas de 1 m, o potencial de passo gerado teria magnitude de 1 kV, estimando-se uma corrente circulante sobre o coração menor do que 300 mA em amplitude. Para esta simulação adotou-se um surto de 5 kA (8×20) μ s injetado em solo com resistividade $\rho_s = 500 \Omega\text{m}$.

A título de comparação, na Figura 58 pode ser visto o potencial de passo e a corrente sobre o coração, obtidos a partir do modelo apresentado na Figura 52.

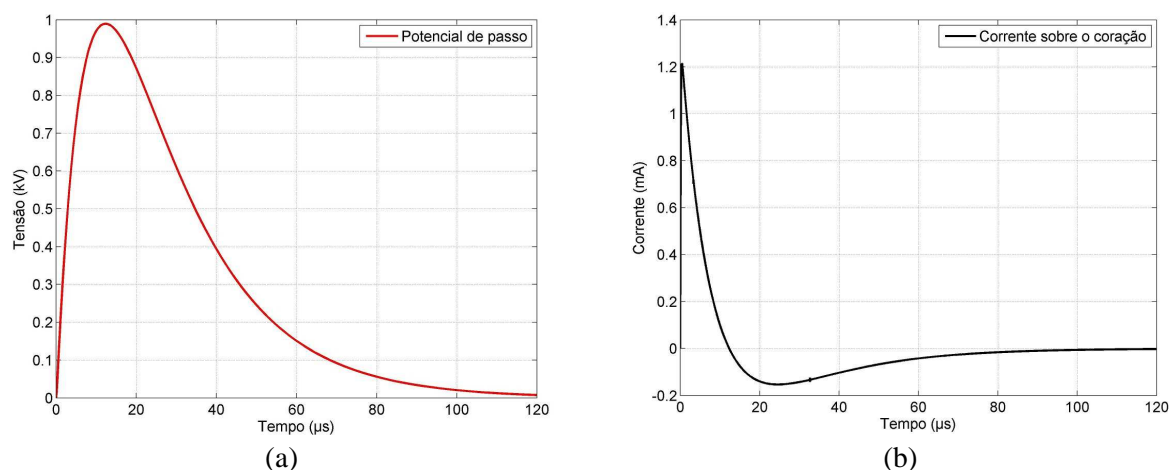


Figura 58 Estudo de suportabilidade para o mecanismo de potencial de passo: (a) potencial de passo; (b) corrente sobre o coração.

Com base na Figura 58a constata-se que o potencial de passo retrata fielmente o potencial obtido por Andrews em termos de amplitude. Ainda, conforme ilustrado na Figura 58b, a corrente sobre o coração com valor máximo de 1.2 mA encontra-se dentro dos limites estimados pelo referido autor, menor do que 300 mA.

Por fim, verifica-se que o estudo apresentado nesta seção, sendo uma das contribuições deste trabalho, pode ser utilizado como base para pesquisas futuras relacionadas à avaliação de suportabilidade e segurança de seres humanos submetidos a contato com surto atmosférico.

5.4.6 Considerações Sobre o Estudo

Nesta seção do trabalho foi apresentado um estudo para a avaliação de suportabilidade e segurança de seres humanos submetidos a contato com surto atmosférico mediado pelo sistema de aterramento. Para tanto, baseado em modelo representativo composto por circuitos elétricos (ANDREWS, 2003), alguns dos principais mecanismos de contato foram mitigados (COOPER, 2008).

Tomando-se como referência os mecanismos de potencial de passo, potencial de toque e potencial transferido, a corrente produzida sobre o coração e conseqüentemente a energia para fibrilação ventricular foram estimadas. Tais grandezas podem ser utilizadas como parâmetros de referência para estudos de suportabilidade.

A metodologia aqui discutida pode então servir como base para pesquisas referentes à interação do ser humano com surto atmosférico e sistemas de aterramento, contribuindo para o desenvolvimento de conhecimento nesta área, atualmente carente de estudos especificamente relacionados.

5.5 Considerações Sobre o Capítulo

Neste capítulo foram apresentadas as contribuições desta tese referente ao estudo de aterramento impulsivo associado à avaliação de suportabilidade e segurança pessoas de seres humanos submetidos a contato com surto atmosférico.

Inicialmente, o desenvolvimento de modelo computacional para a inclusão do fenômeno de ionização do solo com base no Método da Modelagem por Linhas de Transmissão em uma dimensão TLM-1D foi apresentado. Tal metodologia tem sua inovação associada à variação dos parâmetros resistivos e condutivos do circuito TLM para a representação do referido fenômeno, suprimindo limitações e algumas inconsistências dos métodos utilizados até então. Ainda, o método proposto tem a desejável característica de generalização do problema, tendo sua aplicabilidade para solos com diferentes propriedades, sendo uma técnica robusta e estável para a representação computacional do mecanismo de disrupção do solo.

Como segunda contribuição do estudo, apresentou-se uma formulação analítica para a estimação de potenciais gerados na superfície do solo, provenientes da dissipação da corrente elétrica em eletrodo de aterramento. Tal equacionamento tem sua grande contribuição e originalidade no estabelecimento dos referidos potenciais baseado em grandezas determinadas em métodos numéricos unidimensionais, o que é o caso do TLM-1D. Na formulação apresentada, além da resistividade do solo, a sua permeabilidade e permissividade são levadas em consideração, além da dependência da frequência. Tais características conferem ao modelo uma maior precisão e realismo na representação de fenômenos transitórios e em altas frequências, atribuídos a um surto atmosférico. Ainda, a estimação de potenciais na superfície do solo tem notável relevância para a avaliação de diversos mecanismos de contato com um surto, vinculados a estudos de suportabilidade.

A terceira contribuição deste trabalho diz respeito à realização de estudos de suportabilidade e segurança de seres humanos submetidos a contato com surto atmosférico. Destaca-se como relevância e originalidade do estudo a inclusão do sistema de aterramento como elemento mediador entre surto atmosférico e ser humano. Para tal fim, com base na utilização de modelo baseados em circuitos elétricos, três dos principais mecanismos de contato com surto atmosférico foram estudados, de modo a avaliar a corrente elétrica e conseqüente energia gerada sobre o coração. Tais parâmetros ditos de referência qualificam-se como grandezas básicas para estudos de suportabilidade. Salienta-se também como importante contribuição, o estabelecimento de modelo representativo, o qual pode ser utilizado em estudos futuros para o melhor conhecimento da interação de um surto atmosféricos com seres humanos.

Por fim, de modo a elucidar as contribuições ao estado da arte aqui apresentados, bem como sua aplicabilidade, no próximo capítulo serão apresentados alguns estudos de caso enfatizando as potencialidades dos métodos propostos.

6. ESTUDOS DE CASO

A fim de contextualizar as potencialidades das metodologias desenvolvidas e aprimoradas, neste capítulo serão apresentados alguns estudos de caso. Inicialmente, a variação da tensão e impedância do eletrodo de aterramento com e sem a consideração do fenômeno de ionização do solo serão exemplificadas. Num segundo momento, com base no equacionamento para a estimação de potenciais na superfície do solo, curvas de tensão serão discutidas. Por fim, serão apresentados alguns exemplos relacionados ao estudo de suportabilidade e segurança pessoal.

6.1 Introdução

O desempenho de um sistema de aterramento está diretamente associado às inúmeras variáveis envolvidas em seu processo de interação com o meio. Pode-se dizer que os parâmetros do solo (resistividade e permissividade), a geometria do eletrodo (comprimento e raio), as características aleatórias e imprevisíveis do surto (magnitude e forma de onda) e da profundidade do enterramento são as variáveis de maior relevância dentro do processo de dissipação da corrente elétrica para o solo (TELLÓ, 2007a). Deste modo, a variação de tais grandezas conduz a diferentes respostas do sistema de aterramento.

Com o objetivo de limitar o escopo da discussão aqui apresentada, optou-se por avaliar o comportamento de um contrapeso horizontal comumente utilizado em linhas de transmissão do sistema elétrico, considerando solos com diferentes propriedades.

Deste modo, nos estudos de caso apresentados a seguir considerou-se um eletrodo horizontal de 12 m de comprimento e diâmetro 13 mm o qual foi submetido a um surto de corrente, onda dupla exponencial, de 50 kA (8 x 20) μ s em uma de suas extremidades. A Figura 59 ilustra o surto de corrente utilizado. As simulações realizadas consideraram tal eletrodo enterrado a uma profundidade de 0.5 m em solos homogêneos de uma camada com diferentes propriedades, conforme apresentado na Tabela 7.

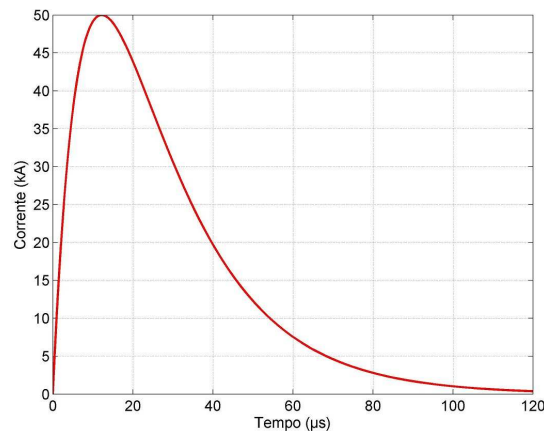


Figura 59 Surto de corrente utilizado nos estudos de caso.

Tabela 7 Tipos de solo utilizados nos estudos de caso.

Tipo de solo	Resistividade (Ωm)	Permissividade relativa
Planícies agrícolas	30	20
Solos parcialmente arborizados	130	13
Colinas médias com florestamento	270	12
Solos rochosos	500	10
Áreas urbanas	1000	6
Áreas industriais	3000	4

6.2 Ionização do Solo

Da Figura 60 até a Figura 65 é ilustrado o comportamento da tensão sobre a origem do eletrodo e da impedância do aterramento, para simulações numéricas utilizando o Método TLM-1D clássico (sem a consideração da ionização do solo) em comparação ao método proposto, levando em conta tal fenômeno. A Figura 60 apresenta a tensão e a impedância do eletrodo enterrado em solo considerado como sendo de baixa resistividade e alta permissividade relativa, $\rho_s = 30 \Omega\text{m}$, $\epsilon_r = 20$.

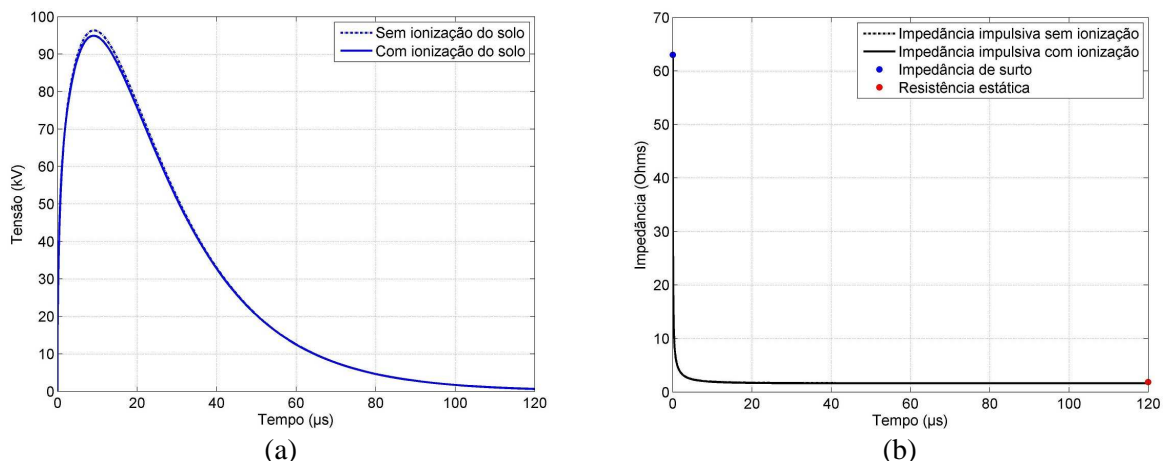


Figura 60 Curvas de tensão e impedância sobre eletrodo de aterramento enterrado em planícies agrícolas ($\rho_s = 30 \Omega\text{m}$, $\epsilon_r = 20$): (a) tensão sobre a origem do eletrodo; (b) impedância do aterramento.

Analisando a Figura 60a verifica-se que a tensão sobre o eletrodo não apresenta grandes alterações com e sem a presença do fenômeno de ionização, onde a redução no ponto de tensão máxima é de apenas 1.49% e 0.49 % de valor médio durante todo o período de tempo. A mesma observação se aplica a impedância de aterramento, como ilustrado na Figura 60b, onde as duas curvas são praticamente coincidentes.

A Figura 61 apresenta o comportamento da tensão e impedância para o referido eletrodo enterrado em um solo tipicamente encontrado em locais parcialmente arborizados, com resistividade = $130 \Omega\text{m}$ e permissividade relativa = 13.

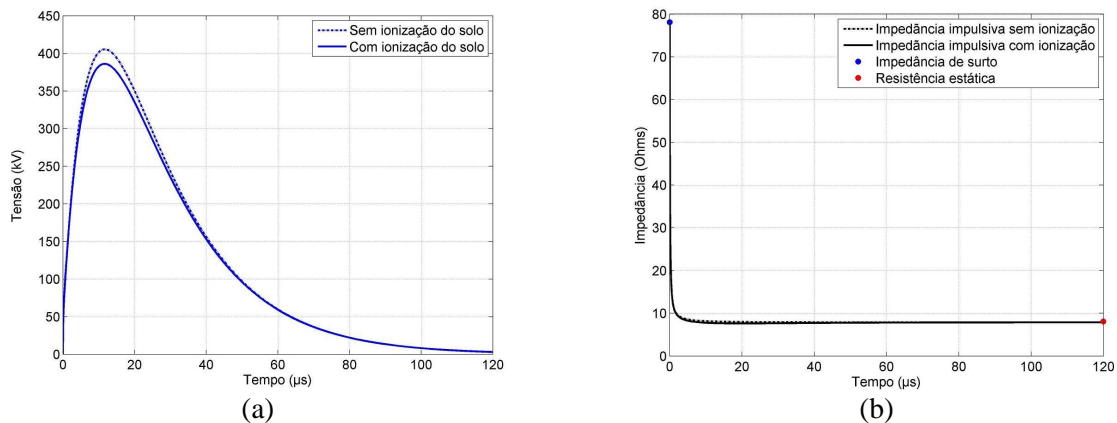


Figura 61 Curvas de tensão e impedância sobre eletrodo de aterramento enterrado em solo parcialmente arborizado ($\rho_s = 130 \Omega\text{m}$, $\epsilon_r = 13$): (a) tensão sobre a origem do eletrodo; (b) impedância do aterramento.

Baseando-se no resultado apresentado na Figura 61a observa-se que a diferença da tensão produzida na origem do eletrodo, com e sem o fenômeno de ionização, já passa a ter uma pequena alteração comparando as duas simulações realizadas. Uma redução de aproximadamente 4.76 % no instante de tempo onde a tensão é máxima e uma redução média de 1.50 % ao longo dos $120 \mu\text{s}$ do período transitório podem ser verificadas. Entretanto, a impedância de aterramento praticamente apresenta a mesma conformação e tendência em suas curvas, comparando a simulação com e sem a ocorrência da disrupção do solo, como pode ser visto na Figura 61b.

As grandezas de interesse no terceiro tipo de solo avaliado são apresentadas na Figura 62. Para este caso, um solo com características representativas de regiões montanhosas ou colinas de média altitude com florestamento foi considerado. A resistividade e permissividade do solo assumiram os valores de $270 \Omega\text{m}$ e 12 respectivamente.

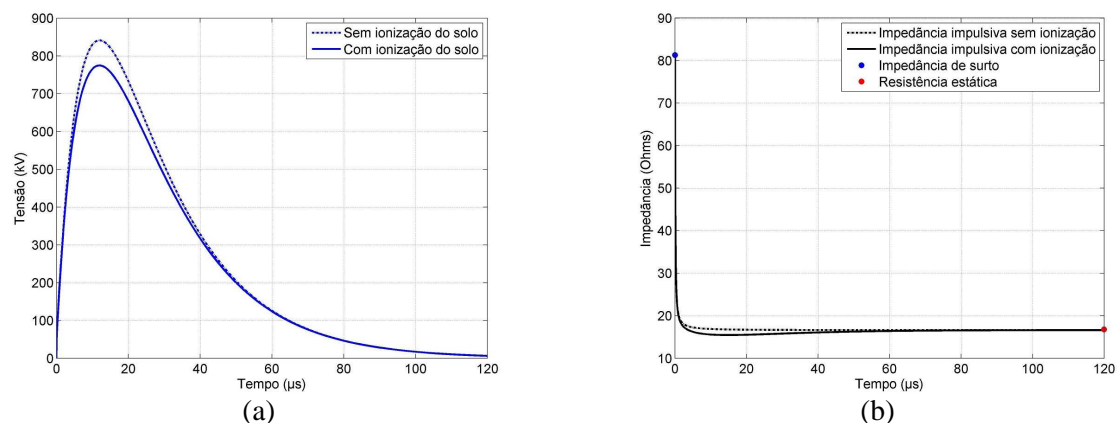


Figura 62 Curvas de tensão e impedância sobre eletrodo enterrado em colinas com florestamento ($\rho_s = 270 \Omega\text{m}$, $\epsilon_r = 12$): (a) tensão sobre a origem do eletrodo; (b) impedância do aterramento.

Avaliando a Figura 62, a diminuição no potencial gerado sobre a origem do eletrodo torna-se mais visível. De forma quantitativa, tal diferença atinge o valor de 7.9 % na máxima magnitude da tensão, e redução média de 2.55 %. Neste cenário, a Figura 62b permite identificar uma pequena variação na curva de impedância durante os primeiros 60 μs , resultando em maior tempo necessário para atingir seu valor de regime (resistência estática).

O comportamento do eletrodo de aterramento enterrado em solo rochoso pode ser analisado na Figura 63. Neste caso, o solo foi representado pela sua resistividade de valor 500 Ωm e permissividade relativa igual a 10.

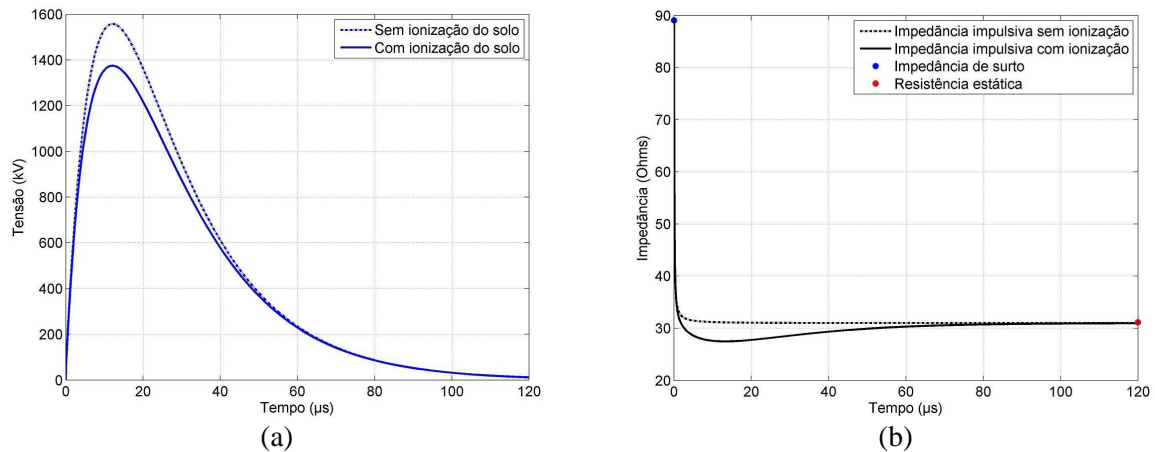


Figura 63 Curvas de tensão e impedância sobre eletrodo de aterramento enterrado em solo rochoso ($\rho_s = 500 \Omega\text{m}$, $\epsilon_r = 10$): (a) tensão sobre a origem do eletrodo; (b) impedância do aterramento.

Constata-se que para um solo com as referidas características, o fenômeno de ruptura do solo passa a ter um papel relevante no que diz respeito à redução da elevação de potencial sobre o eletrodo, conforme ilustra a Figura 63a. Uma diminuição de 11.73 % na magnitude máxima é visivelmente identificada, ressaltando a importância da consideração deste fenômeno na representação computacional. Adicionalmente, uma diminuição média de 3.9 % pode ser estimada durante o período transiente. No que diz respeito a impedância de aterramento, uma variação mais acentuada na sua curva pode ser visualizada na Figura 63b. O tempo necessário para a impedância atingir seu valor de regime gira em torno de 80 μs .

A Figura 64 mostra as variações da tensão e impedância de aterramento para um eletrodo enterrado em solo de alta resistividade $\rho_s = 1000 \Omega\text{m}$ e baixa permissividade relativa $\epsilon_r = 6$, tipicamente encontrado em áreas urbanas.

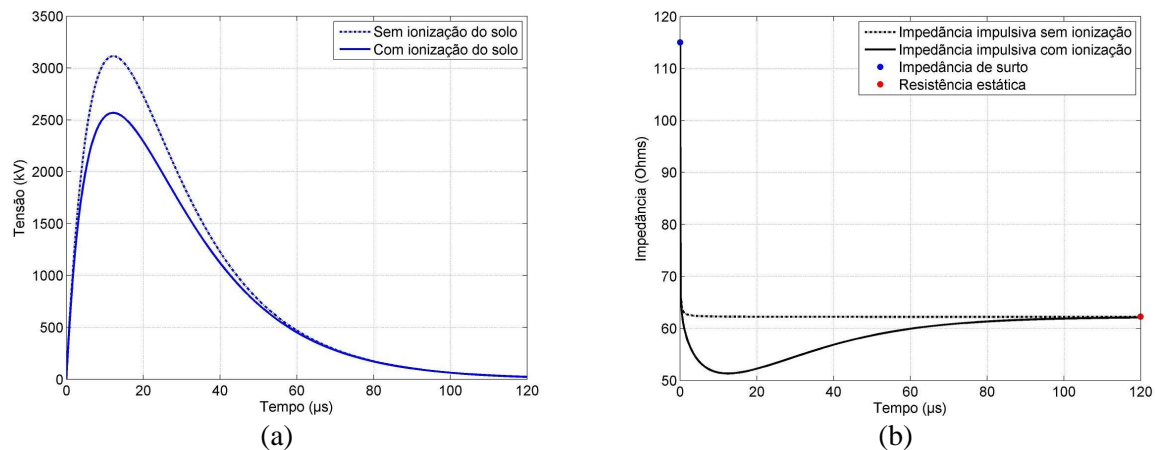


Figura 64 Curvas de tensão e impedância sobre eletrodo de aterramento enterrado em áreas urbanas ($\rho_s = 1000 \Omega\text{m}$, $\epsilon_r = 6$): (a) tensão sobre a origem do eletrodo; (b) impedância do aterramento.

Uma redução de 17.54 % pode ser determinada com base nos potenciais máximos sobre a origem do eletrodo, com e sem a presença da ionização do solo como pode ser visto na Figura 64a. Consta-se que para solos de alta resistividade, a ionização do solo exerce um papel relevante durante o período transitório da dissipação do surto. Seguindo a tendência observada nas simulações anteriormente apresentadas, a impedância de surto necessita de aproximadamente 100 μs para atingir seu valor de regime.

Por fim, a Figura 65 representa a variação das grandezas em estudo para o caso de um solo com resistividade igual a 3000 Ωm e permissividade relativa 4.

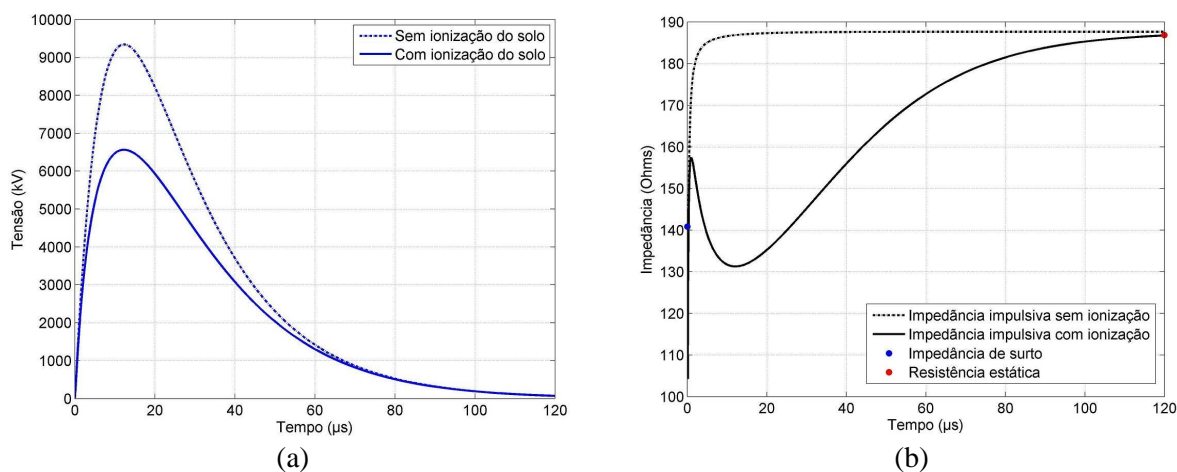


Figura 65 Curvas de tensão e impedância sobre eletrodo de aterramento enterrado em áreas industriais ($\rho_s = 3000 \Omega\text{m}$, $\epsilon_r = 4$): (a) tensão sobre a origem do eletrodo; (b) impedância do aterramento.

Notadamente, a tensão produzida sobre o eletrodo assume uma grande variação comparando as simulações com e sem a presença de ionização, como pode ser observado na Figura 65a. Uma diminuição de 29.75 % na tensão máxima e 11.38 % na tensão média pode ser estimada. O tempo transitório da impedância de aterramento para atingir o valor estático neste tipo de solo chega a 120 μs , como mostra a Figura 65b. Diferentemente dos outros cenários simulados, para este tipo de solo dito de resistividade muito elevada, a curva de impedância partindo do valor de surto (menor magnitude) converge para seu valor estático com maior magnitude.

Para quantificar algumas das observações acima apresentadas, a Tabela 8 sumariza o campo elétrico crítico (E_{cr}), os máximos potenciais (V_{max}) nas curvas com e sem o fenômeno de ionização e a redução de tensão, considerando os tipos de solo avaliados.

Com base nos exemplos apresentados, reforça-se o argumento de que o fenômeno de ionização do solo exerce papel relevante na representação numérica de sistemas de aterramento. Os estudos de caso mostraram que a redução da elevação de potencial sobre o eletrodo pode assumir valores expressivos, especialmente para o caso de solos com alta resistividade.

Adicionalmente, a curva de impedância de aterramento é sensivelmente afetada com a presença deste mecanismo, ocasionando aumento no tempo transiente para o estabelecimento do valor de resistência estática ou de regime permanente.

Deste modo, se por um lado a ionização do solo confere melhorias no ponto de vista de redução de potencial sobre o eletrodo, por outro este fenômeno provoca um aumento no tempo transiente associado à impedância de aterramento.

Tabela 8 Quantificação de variáveis envolvidas no estudo comparativo entre simulação com e sem a presença do fenômeno de ionização do solo.

Tipo de solo	E_{cr} (kV/m)	V_{max} sem ionização (kV)	V_{max} com ionização (kV)	Redução máxima (%)	Redução média (%)
Planícies agrícolas	500.72	96.33	94.89	1.49	0.49
Solos parcialmente arborizados	686.3	405.34	386.03	4.76	1.5
Colinas médias com florestamento	803.08	841.04	774.59	7.9	2.55
Solos rochosos	916.84	1557	1374	11.73	3.9
Áreas urbanas	1064	3114	2568	17.54	6.09
Áreas industriais	1347	9320	6563	29.75	11.38

De modo a contextualizar a convergência do método proposto para a representação da ionização do solo em termos de impedância de aterramento, a Tabela 9 mostra os resultados comparativos entre o valor de regime determinado pela metodologia desenvolvida com os calculados analiticamente pela equação 5.4, resistência estática de aterramento (SUNDE, 1968).

Tabela 9 Comparação do valor de regime da impedância de aterramento.

Tipo de solo	Determinado método proposto (Ω)	Calculado analiticamente (Ω)	Erro (%)
Planícies agrícolas	1.65	1.86	11.48
Solos parcialmente arborizados	7.88	8.09	2.57
Colinas médias com florestamento	16.62	16.82	1.18
Solos rochosos	30.96	31.14	0.57
Áreas urbanas	62.11	62.28	0.27
Áreas industriais	186.74	186.84	0.06

Por fim, tendo-se como referência o estudo realizado e os argumentos apresentados, conclui-se que este mecanismo natural do solo não deve ser negligenciado no desenvolvimento de modelos computacionais, contribuindo para uma melhor representação de sistemas de aterramento e sua interação com o meio.

6.3 Potencial na Superfície do Solo

A fim de avaliar os potenciais gerados no solo, considera-se o plano xy sobre a sua superfície conforme ilustra a Figura 66. Nesta figura também pode ser visto o eletrodo de aterramento com as características anteriormente citadas, cuja origem coincide com o ponto de inserção do surto. Com base no equacionamento desenvolvido, os potenciais foram estimados considerando os diferentes tipos de solo apresentados na Tabela 7.

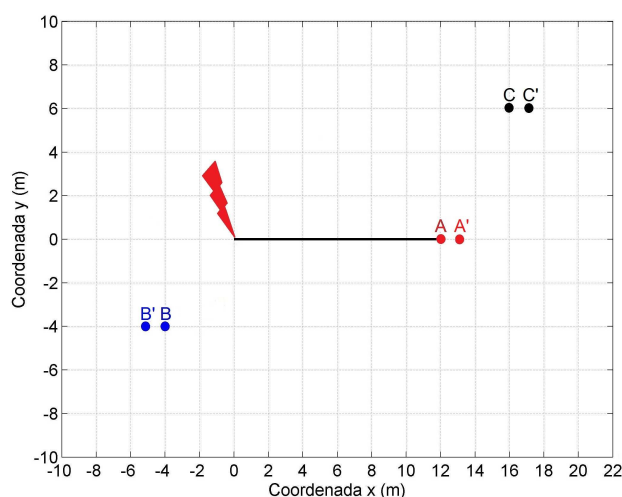


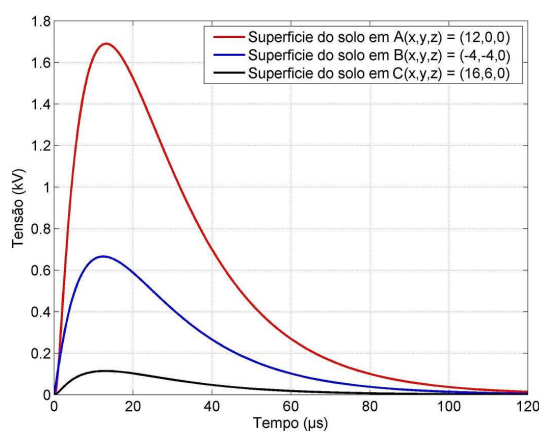
Figura 66 Plano xy sobre a superfície do solo utilizado nos estudos de caso.

A Figura 67 mostra a tensão gerada na superfície do solo sobre os pontos A, B e C ilustrados na Figura 66 para os diferentes tipos de solos analisados. O ponto $A(x,y,z) = (12,0,0)$ encontra-se na superfície do solo sobre o final do eletrodo de aterramento, o ponto $B(x,y,z) = (-4,4,0)$ localiza-se afastado do eletrodo, porém mais próximo da inserção do surto ao passo que o ponto $C(x,y,z) = (16,6,0)$ encontra-se em local mais remoto.

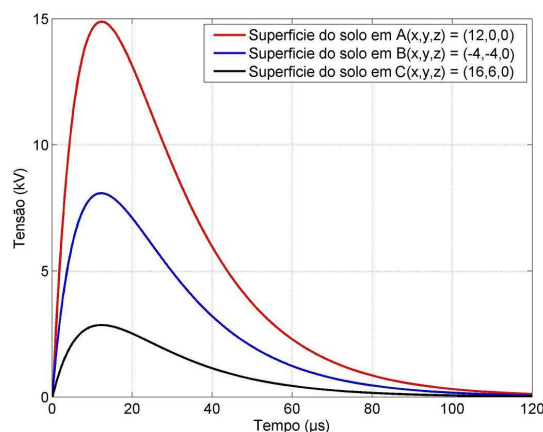
Ressalta-se que os pontos selecionados para análise foram escolhidos de forma a proporcionar uma melhor contextualização da diferença de potencial sobre o solo. Outros pontos sobre o plano xy poderiam servir como base para os estudos de caso.

Analisando a Figura 67 verifica-se um aumento na magnitude dos potenciais gerados para os três pontos conforme o aumento da resistividade do solo. O ponto A mesmo estando mais afastado da origem do surto se comparado a B, apresenta tensões mais elevadas. Isto é justificado pelo fato de estar localizado na superfície do solo exatamente sobre o condutor de aterramento. Como já esperado, o ponto C devido ao seu maior afastamento da inserção do surto, bem como do eletrodo está submetido a menores potenciais.

A Figura 67 também ressalta a influência predominante da resistividade do solo no estabelecimento de potenciais sobre o mesmo. Tomando o ponto A como exemplo, a tensão sobre o mesmo varia desde 1.690 kV em solos tipicamente encontrados em planícies agrícolas (baixa resistividade) até 558.59 kV em solos altamente resistivos, como os encontrados em áreas industriais. A Tabela 10 quantifica os potenciais máximos sobre os pontos em análise considerando os diferentes tipos de solos.



(a)



(b)

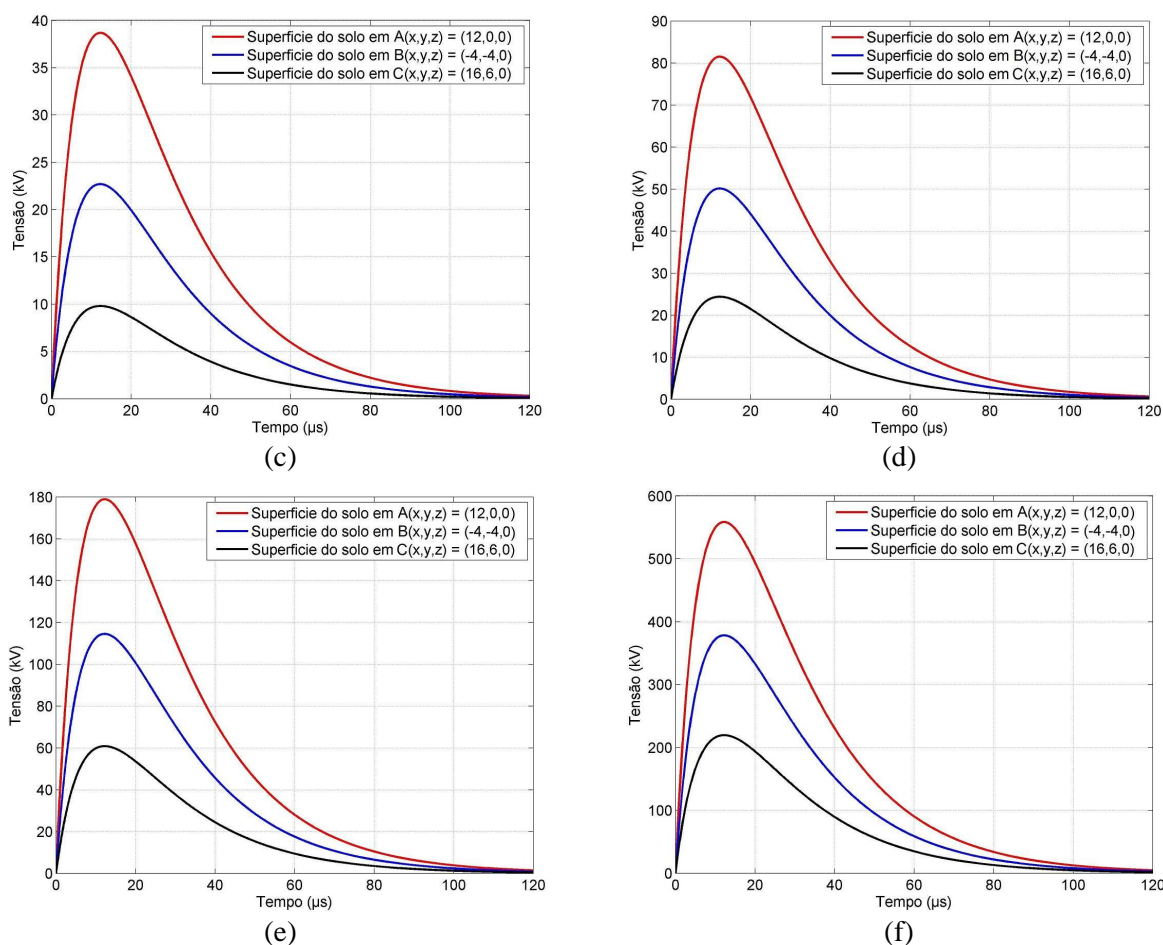


Figura 67 Potencial sobre os pontos A, B e C considerando diferentes tipos de solo: (a) planícies agrícolas $\rho_s = 30 \Omega\text{m}$, $\epsilon_r = 20$; (b) solos parcialmente arborizados $\rho_s = 130 \Omega\text{m}$, $\epsilon_r = 13$; (c) colinas médias com florestamento $\rho_s = 270 \Omega\text{m}$, $\epsilon_r = 12$; (d) solos rochosos $\rho_s = 500 \Omega\text{m}$, $\epsilon_r = 10$; (e) áreas urbanas $\rho_s = 1000 \Omega\text{m}$, $\epsilon_r = 6$; (f) áreas industriais $\rho_s = 3000 \Omega\text{m}$, $\epsilon_r = 4$.

Tabela 10 Máximos potenciais estimados na superfície do solo

Tipo de solo	Potencial Máximo (kV)			
	A	B	C	Superfície
Planícies agrícolas	1.69	0.665	0.114	15.7
Solos parcialmente arborizados	14.882	8.078	2.852	102.7
Colinas médias com florestamento	38.68	22.69	9.8	224.59
Solos rochosos	81.5	50.14	24.39	426.78
Áreas urbanas	178.87	114.51	60.83	868.43
Áreas industriais	558.59	378.31	219.6	2542

A Figura 68 ilustra a superfície de potencial gerada sobre o plano xy nos instantes de tempo onde a tensão atinge seu valor máximo. Pode-se verificar que as magnitudes mais elevadas encontram-se sobre a origem do eletrodo, local este da inserção do surto. Nos gráficos apresentados na mesma escala é visível a variação do potencial para o mesmo eletrodo enterrado em diferentes tipos de solo. A Tabela 10 também apresenta as máximas tensões obtidas considerando toda a superfície analisada, as quais variam de 15.70 kV até 2524 kV.

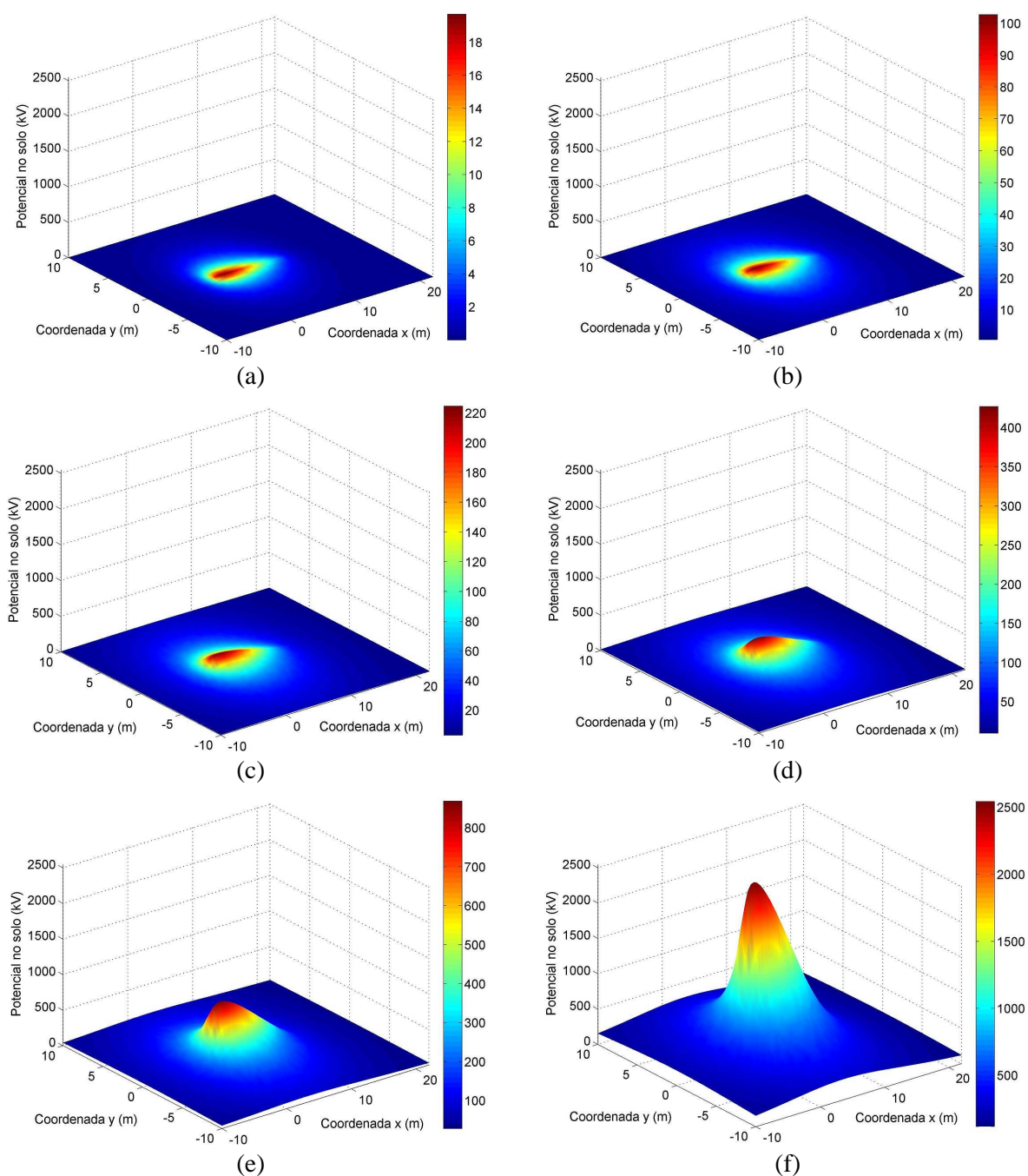


Figura 68 Potencial sobre a superfície considerando diferentes tipos de solo: (a) planícies agrícolas $\rho_s = 30 \Omega\text{m}$, $\varepsilon_r = 20$; (b) solos parcialmente arborizados $\rho_s = 130 \Omega\text{m}$, $\varepsilon_r = 13$; (c) colinas médias com florestamento $\rho_s = 270 \Omega\text{m}$, $\varepsilon_r = 12$; (d) solos rochosos $\rho_s = 500 \Omega\text{m}$, $\varepsilon_r = 10$; (e) áreas urbanas $\rho_s = 1000 \Omega\text{m}$, $\varepsilon_r = 6$; (f) áreas industriais $\rho_s = 3000 \Omega\text{m}$, $\varepsilon_r = 4$.

Adicionalmente, nas simulações realizadas constatou-se que a permissividade relativa do meio não exerce papel relevante na magnitude dos potenciais gerados, sendo estes predominantemente dependentes da resistividade do meio.

Os resultados aqui apresentados mostram que o equacionamento desenvolvido tem boa aplicabilidade de utilização em conjunto com método numérico unidimensional, como o TLM-1D, onde os potenciais estimados podem servir como parâmetros de entrada para estudos relacionados a segurança pessoas e suportabilidade, considerando uma abordagem em regime transiente.

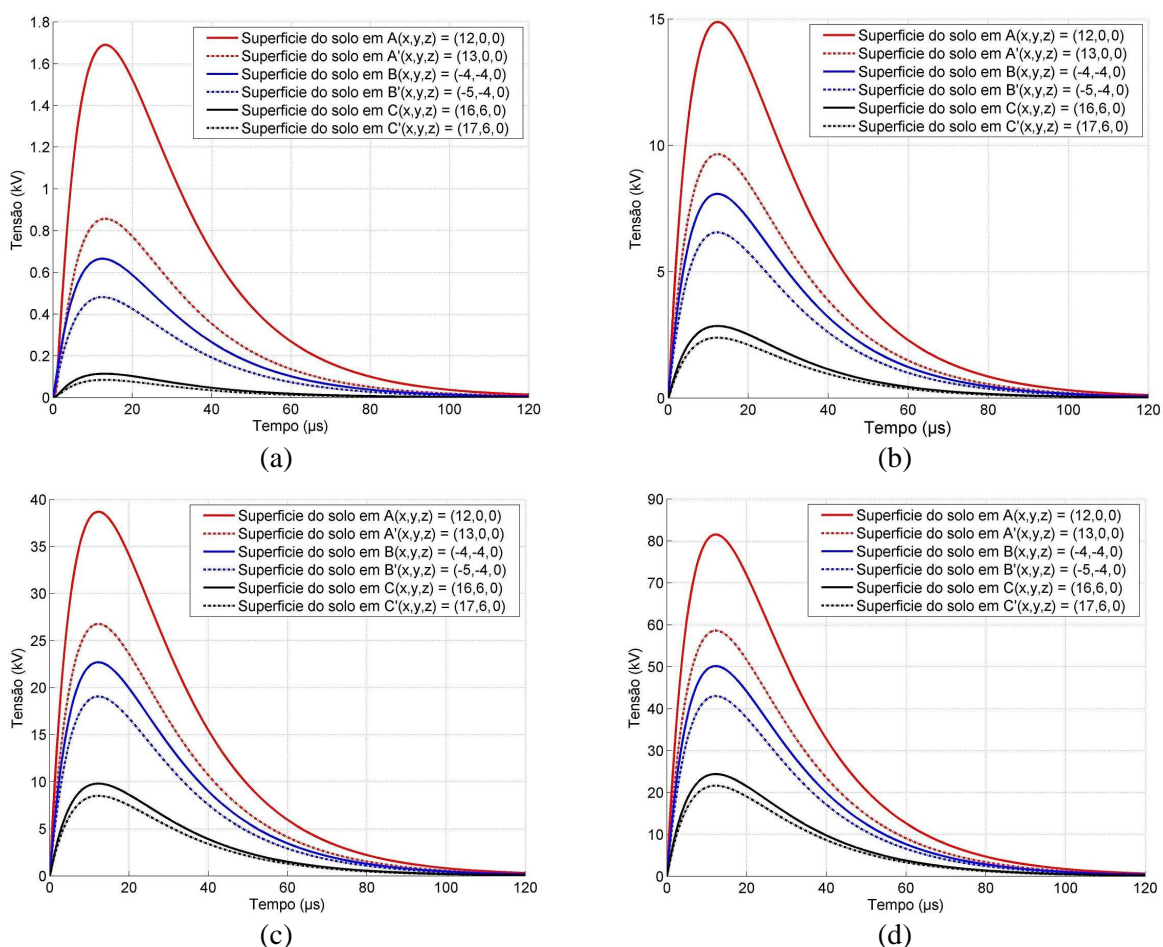
6.4 Suportabilidade e Segurança Pessoal

Nesta parte final dos estudos de caso será apresentada uma abordagem quantitativa referente à submissão de um ser humano, mediado pelo sistema de aterramento anteriormente caracterizado, ao contato com surto atmosférico com base nos modelos representativos discutidos no capítulo anterior. Novamente, a análise será realizada para os diferentes tipos de solo descritos na Tabela 7 considerando os mecanismos de potencial de passo, potencial de toque e potencial transferido. Com tal abordagem os parâmetros de referência para estudos de suportabilidade e segurança pessoal, corrente e energia, são estimados. Considera-se então, os pontos apresentados na Figura 66.

Para o mecanismo de potencial de passo ilustrado na Figura 49 e baseado do modelo representativo da Figura 52, os potenciais de passo entre os pontos $A(x,y,z) = (12, 0, 0)$ e $A'(x,y,z) = (13,0,0)$, $B(x,y,z) = (-4,-4,0)$ e $B'(x,y,z) = (-5,-4,0)$ e $C(x,y,z) = (16,6,0)$ e $C'(x,y,z) = (17,6,0)$ foram utilizados para a determinação dos parâmetros de referência.

A Figura 69 apresenta os referidos potenciais gerados na superfície do solo utilizados nas simulações realizadas, considerando desta forma um ser humano posicionado em três diferentes locais para os distintos tipos de solos avaliados.

Adotando-se então os referidos potenciais como fonte de excitação do modelo representativo apresentado na Figura 52, a corrente elétrica $I_{coração}$ e consequentemente a energia $E_{coração}$ gerada sobre o coração podem ser estimadas, A Tabela 11, Tabela 12 e a Tabela 13 quantificam os parâmetros de referência em estudo.



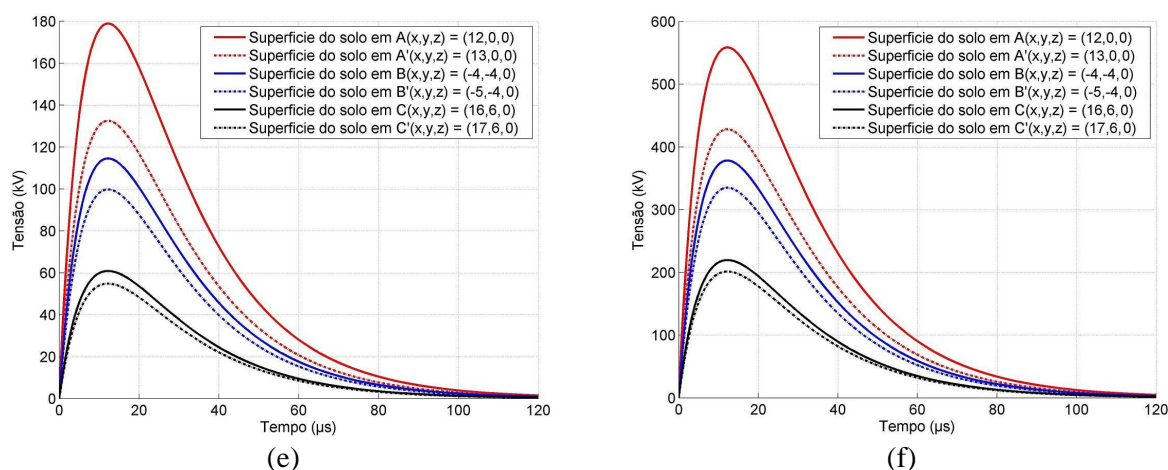


Figura 69 Potencial de passo considerando diferentes tipos de solo: (a) planícies agrícolas $\rho_s = 30 \Omega\text{m}$, $\epsilon_r = 20$; (b) solos parcialmente arborizados $\rho_s = 130 \Omega\text{m}$, $\epsilon_r = 13$; (c) colinas médias com florestamento $\rho_s = 270 \Omega\text{m}$, $\epsilon_r = 12$; (d) solos rochosos $\rho_s = 500 \Omega\text{m}$, $\epsilon_r = 10$; (e) áreas urbanas $\rho_s = 1000 \Omega\text{m}$, $\epsilon_r = 6$; (f) áreas industriais $\rho_s = 3000 \Omega\text{m}$, $\epsilon_r = 4$.

Tabela 11 Potencial de passo entre A e A'.

Tipo de solo	$I_{\text{coração máxima}}$ (A)	$E_{\text{coração}}$ (J/Ω)	Resistência do coração (Ω)		
			75 Ω	100 Ω	150 Ω
Energia (J)					
Planícies agrícolas	$4.63 \cdot 10^{-4}$	$1.35 \cdot 10^{-10}$	$1.01 \cdot 10^{-8}$	$1.35 \cdot 10^{-8}$	$2.03 \cdot 10^{-8}$
Solos parcialmente arborizados	$5.4 \cdot 10^{-3}$	$1.09 \cdot 10^{-8}$	$8.19 \cdot 10^{-7}$	$1.09 \cdot 10^{-6}$	$1.64 \cdot 10^{-6}$
Colinas médias com florestamento	$16.3 \cdot 10^{-3}$	$7.50 \cdot 10^{-8}$	$5.63 \cdot 10^{-6}$	$7.50 \cdot 10^{-6}$	$1.12 \cdot 10^{-5}$
Solos rochosos	$55.2 \cdot 10^{-3}$	$3.14 \cdot 10^{-7}$	$2.35 \cdot 10^{-5}$	$3.14 \cdot 10^{-5}$	$4.71 \cdot 10^{-5}$
Áreas urbanas	$146.6 \cdot 10^{-3}$	$1.2 \cdot 10^{-6}$	$8.99 \cdot 10^{-5}$	$1.2 \cdot 10^{-4}$	$1.80 \cdot 10^{-4}$
Áreas industriais	$561.2 \cdot 10^{-3}$	$9.97 \cdot 10^{-6}$	$7.48 \cdot 10^{-4}$	$9.97 \cdot 10^{-4}$	$1.5 \cdot 10^{-3}$

A Tabela 11 apresenta a corrente máxima sobre o coração e a energia gerada para o caso mais crítico de potencial de passo, modelo com os pés sobre os pontos A e A', devido à proximidade com o eletrodo de aterramento. Analisando-se os dados, verifica-se um aumento na corrente máxima passante sobre o coração, à medida que o solo se torna mais resistivo bem como um consecutivo crescimento na energia sobre o coração.

A constatação anterior também é válida para o caso de potencial de passo gerado referente ao contato dos pés com os pontos B e B', conforme dados apresentados na Tabela 12. Entretanto, para este cenário, a corrente e a energia gerada apresentam magnitudes inferiores se comparado aos dados obtidos no caso anterior, devido ao maior afastamento dos pontos de contato no solo com o eletrodo de aterramento.

Novamente, considerando a submissão de um surto atmosférico por meio potencial de passo, agora em um local relativamente afastado do ponto de inserção da descarga no eletrodo de aterramento, o potencial de passo entre os pontos C e C' conduz aos menores valores dos parâmetros de referência em análise. A Tabela 13 quantifica estas grandezas para os diferentes tipos de solo.

Tabela 12 Potencial de passo entre B e B'.

Tipo de solo	$I_{\text{coração}}$ máxima (A)	$E_{\text{coração}}$ (J/ Ω)	Resistência do coração (Ω)		
			75 Ω	100 Ω	150 Ω
			Energia (J)		
Planícies agrícolas	$2.25 \cdot 10^{-4}$	$2.91 \cdot 10^{-11}$	$2.19 \cdot 10^{-9}$	$2.91 \cdot 10^{-9}$	$4.37 \cdot 10^{-9}$
Solos parcialmente arborizados	$3.2 \cdot 10^{-3}$	$3.91 \cdot 10^{-9}$	$2.93 \cdot 10^{-7}$	$3.91 \cdot 10^{-7}$	$5.86 \cdot 10^{-7}$
Colinas médias com florestamento	$9.7 \cdot 10^{-3}$	$3.04 \cdot 10^{-8}$	$2.28 \cdot 10^{-6}$	$3.04 \cdot 10^{-6}$	$4.56 \cdot 10^{-6}$
Solos rochosos	$23.6 \cdot 10^{-3}$	$1.37 \cdot 10^{-7}$	$1.03 \cdot 10^{-5}$	$1.37 \cdot 10^{-5}$	$2.05 \cdot 10^{-5}$
Áreas urbanas	$59.7 \cdot 10^{-3}$	$5.56 \cdot 10^{-7}$	$4.17 \cdot 10^{-5}$	$5.56 \cdot 10^{-5}$	$8.35 \cdot 10^{-5}$
Áreas industriais	$227.4 \cdot 10^{-3}$	$5.02 \cdot 10^{-6}$	$3.76 \cdot 10^{-4}$	$5.02 \cdot 10^{-4}$	$7.52 \cdot 10^{-4}$

Tabela 13 Potencial de passo entre C e C'.

Tipo de solo	$I_{\text{coração}}$ máxima (A)	$E_{\text{coração}}$ (J/ Ω)	Resistência do coração (Ω)		
			75 Ω	100 Ω	150 Ω
			Energia (J)		
Planícies agrícolas	$3.59 \cdot 10^{-5}$	$8.20 \cdot 10^{-13}$	$6.15 \cdot 10^{-11}$	$8.20 \cdot 10^{-11}$	$1.23 \cdot 10^{-10}$
Solos parcialmente arborizados	$1.2 \cdot 10^{-3}$	$4.98 \cdot 10^{-10}$	$3.74 \cdot 10^{-8}$	$4.98 \cdot 10^{-8}$	$7.47 \cdot 10^{-8}$
Colinas médias com florestamento	$4.3 \cdot 10^{-3}$	$5.86 \cdot 10^{-9}$	$4.39 \cdot 10^{-7}$	$5.86 \cdot 10^{-7}$	$8.79 \cdot 10^{-7}$
Solos rochosos	$13.8 \cdot 10^{-3}$	$3.36 \cdot 10^{-8}$	$2.52 \cdot 10^{-6}$	$3.36 \cdot 10^{-6}$	$5.04 \cdot 10^{-6}$
Áreas urbanas	$40.9 \cdot 10^{-3}$	$1.64 \cdot 10^{-7}$	$1.23 \cdot 10^{-5}$	$1.64 \cdot 10^{-5}$	$2.45 \cdot 10^{-5}$
Áreas industriais	$176.2 \cdot 10^{-3}$	$1.78 \cdot 10^{-6}$	$1.33 \cdot 10^{-4}$	$1.78 \cdot 10^{-4}$	$2.67 \cdot 10^{-4}$

Tomando-se como referência extrapolações baseadas nos critérios de (DALZIEL, 1972), como a apresentada em (ANDREWS, 2003) a qual indica que uma corrente de 199 A durante 340 ns pode ser considerada fatal, constata-se que em todos os casos de potencial de passo analisados as correntes sobre o coração são sensivelmente inferiores em magnitude se comparadas a tal valor de referência. Ainda, baseando-se em magnitudes de energia atribuídas a desfibriladores ventriculares, na faixa de 50 a 360 J (BRONZINO, 2000), verifica-se que a energia determinada sobre o coração com diferentes resistências é consideravelmente menor que os valores apresentados.

Pode-se então constatar que para os casos simulados o potencial de passo não indica grandes riscos de fatalidade por fibrilação ventricular do coração.

Para o segundo mecanismo em estudo, potencial de toque ilustrado na Figura 50a, novamente três cenários são analisados. Adotou-se então o modelo representativo apresentado Figura 53, onde a diferença de potencial entre o local de contato direto com o eletrodo $P(x,y,z) = (12,0,-0.5)$ e o potencial produzido na superfície do solo em $A'(x,y,z) = (13,0,0)$ foi utilizada como fonte de excitação para o referido estudo.

A Figura 70 apresenta os potenciais produzidos no eletrodo sobre o ponto de toque $P(x,y,z) = (12,0,-0.5)$ para os diferentes tipos de solo sob investigação.

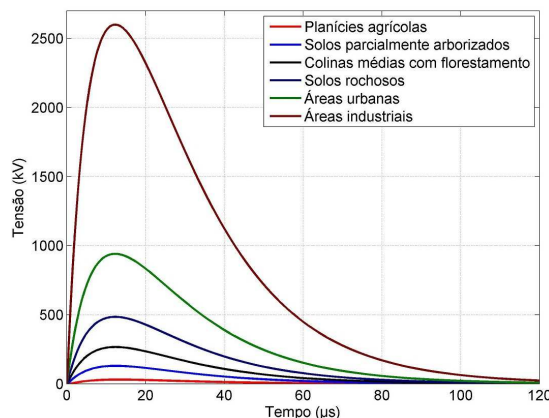


Figura 70 Tensão produzida sobre o eletrodo no ponto $P(x,y,z) = (12,0,-0.5)$ para diferentes tipos de solo.

Com base nos potenciais submetidos ao modelo da Figura 53, a corrente e energia sobre o coração pode ser determinada, conforme quantifica a Tabela 14.

Diferentemente do contato indireto com surto atmosférico mediado pelo sistema de aterramento considerando potencial de passo, para o caso de potencial de toque os parâmetros de referência assumem valores consideráveis para todos os tipos de solos analisados.

Tomando-se como referência a extrapolação utilizada em (ANDREWS, 2003), verifica-se que apenas no caso de planícies agrícolas e solos parcialmente arborizados a corrente de 199 A não foi excedida. Entretanto, em termos de energia sobre o coração, este segundo tipo de solo conduz a geração de altos valores desta grandeza. Os demais tipos de solo ditos mais resistivos ultrapassam o limiar de corrente estabelecido, bem como de tempo de exposição, visto que os valores máximos da corrente têm duração da ordem de micro segundos, muito superior aos 340 ns definidos por Andrews. Ainda, a energia gerada é bastante elevada.

Com base no estudo realizado para a configuração em questão e adotando uma abordagem conservadora a favor da segurança, pode-se dizer que todos os casos analisados referentes ao mecanismo de potencial de toque conduzem a situação possivelmente fatal.

Tabela 14 Potencial de toque.

Tipo de solo	$I_{\text{coração}}$ máxima (A)	$E_{\text{coração}}$ (J/ Ω)	Resistência do coração (Ω)		
			75 Ω	100 Ω	150 Ω
			Energia (J)		
Planícies agrícolas	39.35	4.59	344.77	459.7	689.55
Solos parcialmente arborizados	133.88	43.59	3269.3	4359.1	4538.7
Colinas médias com florestamento	216.14	111.16	8337.2	11116	16674
Solos rochosos	293.16	191.22	14342	19122	28683
Áreas urbanas	366.75	240.63	18047	24063	36094
Áreas industriais	417.27	273.36	20502	27336	41004

Finalmente, o último mecanismo em análise refere-se ao contato com o condutor de aterramento energizado por surto atmosférico considerando potencial transferido, ilustrado na Figura 50b. Neste caso utilizou-se o circuito equivalente, representando o corpo humano, apresentado na Figura 54. Para este caso, a diferença de potencial dá-se entre o ponto de contato no eletrodo $P(x,y,z) = (12,0,-0.5)$ qualificado na Figura 70 e o terra remoto (Zero Volt).

Devido à maior diferença de potencial neste cenário, sendo tal valor o potencial de contato, os parâmetros $I_{\text{coração}}$ e energias associadas assumem as maiores magnitudes aqui apresentadas. Assim como no mecanismo de potencial de toque, os dois solos menos resistivos conduzem a geração de correntes máximas sobre o coração inferiores aos limiares extrapolados em (ANDREWS, 2003). Entretanto, no que se refere à energia, todos os solos com exceção das planícies agrícolas estão associados a elevados valores, como pode ser visto na Tabela 15.

Pode-se inferir então que o mecanismo de potencial transferido, vinculado aos maiores níveis de corrente e energia, conduzem a condições possivelmente fatais para os estudos de caso analisado.

Tabela 15 Potencial transferido.

Tipo de solo	$I_{\text{coração}}$ máxima (A)	$E_{\text{coração}}$ (J/Ω)	Resistência do coração (Ω)		
			75 Ω	100 Ω	150 Ω
			Energia (J)		
Planícies agrícolas	40.49	4.87	365.18	486.9	730.36
Solos parcialmente arborizados	144.65	50.87	3815.7	5087.6	7631.3
Colinas médias com florestamento	240.33	137.37	10303	13737	20605
Solos rochosos	333.51	247.23	18542	24723	37084
Áreas urbanas	426.9	325.29	24397	32529	48794
Áreas industriais	499.56	389.44	29208	38944	58417

6.5 Considerações Sobre o Capítulo

Neste capítulo foram apresentadas aplicações práticas das contribuições ao estado da arte referente ao estudo de aterramento impulsivo associado à avaliação de suportabilidade de seres humanos descritas nesta tese. Para tanto, considerou-se um eletrodo de aterramento tipicamente utilizado em SPDAs em sistemas de transmissão de energia elétrica. Diferentes tipos de solo foram utilizados nos estudos de caso possibilitando a avaliação das potencialidades dos métodos propostos.

Inicialmente, o comportamento transiente do eletrodo foi avaliado em termos de tensão e impedância, enfatizando a importância da consideração do fenômeno de ionização do solo na simulação numérica, especialmente para solos de alta resistividade.

Posteriormente, com base no equacionamento desenvolvido para a estimação de potenciais na superfície do solo, alguns pontos sobre o mesmo foram avaliados, bem como curvas de superfície. Pôde então ser claramente visualizado a redução de tensões sobre o solo com o afastamento do local de inserção do surto, bem como as diferentes magnitudes encontradas para os tipos de solo avaliados.

Por fim, um estudo de caso referente à avaliação de corrente e energia gerada sobre o coração vinculada a estudos de suportabilidade e segurança pessoal foi apresentado. Para tanto, foram considerados três mecanismos de contato com surto atmosférico mediado pelo sistema de aterramento, a saber: potencial de passo, potencial de toque e potencial transferido. Para os cenários avaliados, constatou-se que o mecanismo de potencial de passo condiz a valores relativamente baixos dos parâmetros de referência, por outro lado, os mecanismos de contato direto, potencial de toque e transferido, sinalizam a condições potencialmente perigosas.

Dando fechamento a este trabalho, no próximo capítulo serão apresentadas as conclusões obtidas com o estudo realizado.

7. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou um estudo sobre aterramento elétrico em altas frequências, tendo seu enfoque principal no desenvolvimento e aprimoramento de metodologias para a representação de sistema de aterramento e sua interação com o meio e ser humano, submetido a surto atmosférico. Como resultados desta pesquisa foram estabelecidas contribuições ao estado da arte, as quais podem ser sumarizadas em três tópicos:

- contribuição ao Método da Modelagem por Linhas de Transmissão (TLM) vinculado ao desenvolvimento de técnica generalista para a inclusão do fenômeno de ionização de solo;
- contribuição para a determinação de potenciais gerados na superfície do solo considerando a utilização de método numérico em uma dimensão, mediante o aprimoramento e desenvolvimento de formulação analítica;
- contribuição ao estudo de suportabilidade e segurança de seres humanos submetidos a contato com surto atmosférico mediado pelo sistema de aterramento.

Para contemplar as contribuições citadas, avaliaram-se os principais modelos matemáticos e métodos numéricos para a simulação de fenômenos transitórios, associados à solução de problemas de compatibilidade eletromagnética. Dentre os modelos estudados, o Método da Modelagem por Linhas de Transmissão (TLM) mostrou ser uma alternativa adequada para a solução do problema em questão. Especialmente para o caso da representação de aterramento compostos por condutor horizontal ou vertical, comumente encontrado em sistemas de distribuição e transmissão de energia elétrica, uma abordagem através do Método TLM em uma dimensão mostrou ser apropriada.

Levando-se em conta seu procedimento de implementação (o qual pode ser considerado robusto e de relativa facilidade de programação), seu bom desempenho computacional (método estável sem problemas de convergência e soluções espúrias) e sua precisão, a abordagem unidimensional para a representação e análise de estruturas simples, como é o caso de eletrodos horizontais ou verticais de aterramento em solo homogêneo, mostrou ser a alternativa mais eficiente e confiável para o estudo em questão.

Além disso, constatou-se que o equacionamento desenvolvido para a idealização do mecanismo de disrupção do solo pode ser incorporado ao Modelo TLM-1D de uma forma generalista, independente das propriedades do meio, características do eletrodo e surto, sem ocasionar problemas de estabilidade ao método. Todavia, contemplando a inovação associada a esta Tese de Doutorado, o estabelecimento de potenciais gerados na superfície do solo, com base na utilização de método unidimensional, conduz a necessidade de desenvolvimento de formulação analítica com o intuito de estimar tais grandezas. Deste modo, conclui-se que a incorporação da ionização ao método clássico TLM com consequente estimação de potenciais

na superfície solo, fornecem subsídios para a utilização das técnicas propostas em estudos de suportabilidade e segurança pessoal, aproximando os ditos modelos representativos do real.

As metodologias concebidas neste trabalho fundamentaram-se no desenvolvimento de modelos sob enfoque numérico, enfatizando aspectos vinculados a conceituação do problema, formulação analítica e implementação computacional, incluindo a apresentação de resultados e validação dos métodos proposto.

Argumentando, agora de forma mais pontual, a seguir serão discutidas as principais conclusões e constatações obtidas ao longo desta pesquisa.

7.1 Modelagem do Fenômeno de Ionização do Solo

Tendo-se como base as principais metodologias numéricas desenvolvidas até então para a representação computacional do fenômeno de disrupção do solo, buscou-se uma nova aproximação para a solução do problema, de modo a contornar as limitações dos métodos existentes, as quais se caracterizam principalmente por subestimação dos valores calculados, necessidade do uso de constantes obtidas experimentalmente e soluções divergentes. Deste modo, o modelo proposto pode ser visto como uma extensão dos conceitos apresentados no grupo de trabalho do IEEE referente à modelagem de transitórios rápidos (IMECE, 1996) e de um aprimoramento dos Modelos de Velasquez, Liu e Grece (VELASQUEZ, 1984; LIU, 2004; GRCEV, 2009b). Tal metodologia tem sua inovação associada à variação dos parâmetros resistivos e condutivos do circuito TLM para a representação do referido fenômeno, aliado a desejável característica de generalização do problema.

Constatou-se que a determinação do incremento do raio fictício do eletrodo na região ionizada, com valores fisicamente aceitáveis, obtido como consequência da variação dos elementos resistivos presentes no Modelo TLM, conferem ao método estabilidade numérica e robustez computacional. Ainda, a determinação de constantes obtidas experimentalmente não torna-se necessária, propiciando a incorporação da metodologia a um algoritmo de caráter generalizado, independente das propriedades do meio, características do eletrodo e de parâmetros do surto atmosférico.

Baseando-se em comparações provenientes de outros métodos numéricos e de dados reais de medição, constatou-se que o algoritmo proposto apresentou bons resultados de convergência, com diferença de estimativa variando entre 0.5% a 16%, dependendo dos dados de comparação. Quanto à aferição realizada com outros modelos, conclui-se que, como já reportado na literatura, alguns métodos superestimam os efeitos ditos benéficos da ionização do solo relacionados à redução de potencial gerado sobre o eletrodo. Tais soluções podem ser interpretadas como uma abordagem contra a segurança, já que os potenciais reais serão maiores que os determinados numericamente.

Comparações realizadas com abordagem sob o enfoque de variação da resistividade do solo na região ionizada, também sinalizaram para uma boa convergência do algoritmo proposto. Ainda, a validação realizada com base na aproximação considerando a resistividade residual do solo na região ionizada conduziu novamente a bons resultados. Finalmente, se comparado a dados reais de medição o método proposto apresentou ótima precisão, confirmando desta forma sua característica de generalização do problema.

Um estudo considerando um eletrodo de aterramento utilizado em SPDAs, encontrado em redes de transmissão de energia elétrica foi realizado. Eletrodos instalados em diferentes tipos de solo foram analisados, considerando o comportamento transitório do aterramento em termos de tensão e impedância. Constatou-se que o potencial gerado sobre o condutor apresentou uma variação expressiva, comparando os enfoques com e sem a consideração da ionização do solo. Adicionalmente, o tempo necessário para a impedância de aterramento

atingir seu valor de regime é consideravelmente maior, levando em conta a influência de tal fenômeno. Este fato é importante no controle das sobretensões geradas pelas descargas atmosféricas. Enfatiza-se então a necessidade e importância da consideração do mecanismo de disrupção na simulação numérica, especialmente para o caso de eletrodos enterrados em solos com alta resistividade.

7.2 Estimação de Potencial na Superfície do Solo

Foi apresentado neste trabalho um equacionamento para a estimação de potenciais gerados na superfície do solo devido à dissipação da corrente elétrica em condutor de aterramento. Partindo dos estudos de (HEPPE, 1978a; HEPPE, 1978b) para baixa frequência e baseando-se em uma *aproximação quase estacionária* (MIRANDA, 2003) e modelagem de ondas planas (PORTELA, 1997d; PORTELA 1998), o potencial na superfície do solo pode ser estimado analiticamente.

Tal equacionamento, o qual foi concebido para eletrodos enterrados horizontalmente em solo homogêneo de uma camada, mostrou grande relevância para o estabelecimento dos referidos potenciais como base em grandezas determinadas em métodos numéricos unidimensionais, como o TLM-1D. Esta abordagem possibilita o cálculo das variáveis envolvidas apenas sobre o condutor de aterramento, sendo necessária uma estimação indireta para a determinação da elevação de potencial na superfície do solo. O equacionamento proposto não está restrito a ser utilizado apenas com o Método TLM-1D, possuindo caráter generalista com aplicabilidade a demais metodologias que sejam capazes de estimar a corrente elétrica sobre o eletrodo.

Na formulação apresentada, além da resistividade elétrica, a permissividade elétrica e a permeabilidade magnética do solo são levadas em consideração, com dependência da frequência. Sabendo-se que um surto atmosférico possui um elevado número de componentes em frequência e que as magnitudes associadas possuem valores aproximadamente constantes na faixa dos kHz, considerou-se que a estimação do potencial poderia ser realizada com base em uma única frequência, dita frequência mais representativa ou característica. Com base em simulações realizadas para a faixa de 10 kHz até 1 MHz e tendo-se como referência recomendações encontradas no estado da arte, concluiu-se que 500 kHz seria o componente mais expressivo dentro do sinal. Entretanto, constatou-se que tal determinação não é definitiva, dando margem para uma maior investigação.

Com base no equacionamento proposto, comparações foram realizadas com resultados provenientes de simulações utilizando o Modelo Eletromagnético (SES, 2006), considerado o mais rigoroso para a solução das equações de Maxwell devido as suas mínimas aproximações. Tanto para o caso de surto atmosférico representado por ondas lentas, assim como para ondas rápidas a formulação desenvolvida apresentou convergência satisfatória, considerando solos com diferentes propriedades.

Nos estudos de caso, aplicações práticas do uso da formulação analítica foram apresentadas para avaliar potenciais gerados na superfície do solo, sendo este caracterizado com diferentes propriedades. Partindo da corrente elétrica dissipada sobre condutor de aterramento utilizado em SPDAs, pôde então ser verificada a redução de tensões no solo com o afastamento do local de inserção da descarga atmosférica, assim como a variação das magnitudes para os diferentes tipos de solo avaliados.

Constatou-se que o modelo proposto pode conferir maiores potencialidades aos métodos unidimensionais, em especial ao TLM-1D, na representação de fenômenos transitórios e em altas frequências. A formulação proposta mostrou ser uma solução apropriada para a estimação de potenciais no solo, proporcionando a avaliação de diversos mecanismos de

contato com um surto atmosférico, contribuindo para o desenvolvimento de estudos associados à suportabilidade e segurança de seres humanos.

7.3 Estudo de Suportabilidade em Seres Humanos

Tomando-se como referências as demais contribuições desta tese, foi desenvolvido um estudo vinculado à avaliação da suportabilidade e segurança pessoas de seres humanos submetidos a contato com surto atmosférico mediado pelo sistema de aterramento. Baseando-se em modelo representativo composto por associação de circuitos elétricos (ANDREWS, 2003), os mecanismos de potencial de passo, potencial de toque e potencial transferido foram mitigados.

Com base na utilização de modelos baseados em circuitos elétricos e considerando os prováveis caminhos da corrente pelo corpo, avaliou-se o comportamento da mesma bem como da energia gerada sobre o coração, a qual pode induzir a uma condição de fibrilação ventricular. Tais parâmetros, corrente e energia, ditos de referência quantificam-se como grandezas básicas para estudos de suportabilidade. Destaca-se como relevância conferida ao estudo, a inclusão do sistema de aterramento como elemento mediador entre surto atmosférico e ser humano.

Diferentes tipos de solo foram avaliados em termos da corrente e energia sobre o coração. Constatou-se que o mecanismo de potencial de passo conduz a valores relativamente baixos dos parâmetros de referência. Entretanto, os mecanismos de potencial de toque e transferido sinalizam a condições potencialmente perigosas. Tais afirmativas são condizentes com argumentações presentes na literatura, sendo a validação dos resultados obtidos de difícil quantificação, principalmente pelo fato na inexistência de dados reais de medição. Tomando-se como referência extrapolações reportadas no estado da arte com base em critérios de letabilidade, os estudos realizados conduziram a resultados satisfatórios.

Ressalta-se que as contribuições do estudo não estiveram focadas na identificação de potenciais ou correntes toleráveis, mas sim desenvolver metodologia e modelo que possa ser utilizada em pesquisas correlatas. A metodologia e o estudo apresentado podem servir como embasamento para pesquisas futuras referentes à interação do ser humano com surto atmosférico e sistemas de aterramento, contribuindo desta forma para o aprimoramento do conhecimento nesta área, atualmente carente de pesquisas especificamente relacionados.

Finalmente, espera-se que as contribuições obtidas possam servir de forma efetiva para aprimorar a representação dos sistemas de aterramento contra descargas atmosféricas, assim como fornecer subsídios para uma melhor compreensão deste fenômeno natural e sua interação com o meio e seres humanos.

7.4 Sugestões para Trabalhos Futuros

Esta tese teve como objetivo contribuir para a melhor representação de sistemas de aterramento sob um enfoque transiente. Levando-se em conta a parcela reduzida de pesquisas relacionada a fenômenos transitórios se comparada à abordagem em regime permanente, uma grande área de estudo ainda é passível de investigação. A mesma escassez também é constatada quanto à realização de estudos de suportabilidade de seres humanos considerando a submissão a corrente impulsiva se comparada à forma senoidal. Apontando então para tópicos específicos, sugere-se como desenvolvimento de trabalhos futuros e aprimoramento deste estudo as seguintes linhas de investigação:

- desenvolvimento de estudo para determinação do valor de campo elétrico crítico incluindo a verificação da dependência das propriedades do meio no estabelecimento desta grandeza;

- verificação da real influência da variação da permissividade e da permeabilidade no fenômeno de ionização do solo;
- consideração da variação dos elementos indutivos e capacitivos no circuito TLM para a representação do fenômeno de ionização no solo, estando atento a necessidade de diferentes velocidades de propagação de onda na referida modelagem;
- implementação de método bidimensional, TLM-2D ou outro, verificando a potencialidade da utilização da formulação desenvolvida para estimação do potencial na superfície do solo, contemplando desta forma a análise de malhas de aterramento;
- investigação de outras frequências de cálculo, avaliando a inclusão de múltiplos componentes espectrais para a estimação de potenciais na superfície do solo;
- realização de pesquisas mais aprofundado das correntes e energias toleráveis pelos seres humanos, incluindo estudos focados em outros órgãos e partes do corpo;
- refinamento de modelos representativos do corpo humano e realização de estudos baseados em probabilidade de risco de danos causados por surto atmosférico.

REFERÊNCIAS

- ADAPA, R. EMTP - A Powerful Tool for Analyzing Power System Transients. **IEEE Computer Application in Power**, Piscataway, v. 3, n. 3, p. 36-41, July 1990.
- AHMAD, W. F. W.; THOMAS, W. P.; CHRISTOPOULOS, C. Modeling of a Grounding Wire Using TLM. In: TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION, 2008, Chicago. **Proceedings ...** Chicago, 2008a.
- AHMAD, W. F. W. et al. Study on Various Excitation Voltage Effects to the Transient Responses of a Single Long Horizontal Ground Conductor. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER AND ENERGY, 2., 2008, Baharu. **Proceedings ...** Baharu, 2008b. p. 362-366.
- AHMAD, W. F. W. et al. Transient Responses Due to Various Burial Depths on a Single Long Horizontal Ground Conductor. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER AND ENERGY, 2., 2008, Baharu. **Proceedings ...** Baharu, 2008c. p. 372-377.
- AHMAD, W. F. W. et al. Effective Length of a Single Long Horizontal Ground Conductor Buried in Homogeneous Soil. In: IEEE/PES POWER SYSTEMS CONFERENCE AND EXPOSITION, 2009, Washington. **Proceedings ...** Washington, 2009.
- ALA, G.; SILVESTRE, M. L. D. A Simulation Model for Electromagnetic Transients in Lightning Protection Systems. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, Piscataway, v. 44, n. 4, p. 539-554, November 2002.
- ALMAGUER, H. A. D. **Contribuição ao Método da Modelagem por Linhas de Transmissão (TLM) e sua Aplicação aos Estudos em Bioeletromagnetismo**. 2003. 160 p. Tese (Doutorado em Engenharia), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2003.
- ANDOLFATO, R.; BERNARDI, L.; FELLIN, L. Aerial and Grounding System Analysis by the Shifting Complex Images Method. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v.15, n. 3, p. 1001-1009, July 2000.
- ANDREWS, C. Electrical Aspects of Lightning Strike to Humans. In: COORAY, V. **The Lightning Flash**. London: IEEE Press, 2003.
- BECERRA, M.; COORAY, V. On the Interaction of Lightning Upward Connecting Positive Leaders With Humans. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, Piscataway, v. 51, n. 4, p. 1001-1008, November 2009.

BELLASCHI, P. L.; ARMINGTON, R. E.; SNOWDEN, A. E. Impulse and 60–Cycle Characteristics of Driven Grounds II. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, New York, v. 61, p. 349–363, 1942.

BIER, M. et al. Biophysical Injury Mechanisms Associated with Lightning Injury. **NeuroRehabilitation**, [S. l.], v. 20, n. 1, p. 53-62, March 2005.

BRONZINO, J. D. **The Biomedical Engineering Handbook**. 2nd ed. New York: CRC Press, 2000.

BRUNOTTE, X.; MEUNIER, G.; IMHOFF, J. F. Finite Element Modeling of Unbounded Problems Using Transformation: A Rigorous Powerful and Easy Solution. **IEEE Transactions on Magnetics**, Piscataway, v. 25, n. 2, p. 1663-1666, March 1992.

BRÜNS, H.; SCHUSTER, C.; SINGER, H. Numerical Electromagnetic Field Analysis for EMC Problems. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, Piscataway, v. 49, n. 2, p. 253-262, May 2007.

CECCONI, V.; MATRANGA, A.; RAGUSA, A. New Circuital Models of Grounding Systems and PDS for EMI Analysis During a Lightning Strike. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY, 31., 2008, Raleigh. **Proceedings ...** Raleigh, 2005. p. 1726-1731.

CIGRE, Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines. **CIGRE Working Group on Lightning**. Guide no. 63, Paris, France, October 1991.

COELHO, V. L. **Análise do Desempenho de Redes Aéreas de Distribuição de Média Tensão Frente à Ação das Descargas Atmosféricas**. 2010. 170 p. Tese (Doutorado em Engenharia), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2010.

COOPER, M. A., HOLLE, R. L., ANDREWS, C. Distribution of Lightning Injury Mechanisms. In: **INTERNATIONAL LIGHTNING DETECTION CONFERENCE**, 20., 2008, Tucson. **Proceedings ...** Tucson, 2008.

CHRISTOPOULOS, C. **The Transmission-Line Modeling Method – TLM**. New York: IEEE Press, 1995.

CHRISTOPOULOS, C. **The Transmission-Line Modeling Method in Electromagnetics**. [S. l.]: Morgan & Claypool Publishers, 2006.

CIDRAS, J.; OTERO, A. F.; GARRIDO, C. Nodal Frequency Analysis of Grounding Systems Considering the Soil Ionization Effect. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 15, n. 1, p. 103-107, January 2000.

COSTA, K. Q.; DMITRIEV, V. Software Based on Mom Model to Analyze Electromagnetic Transients in Grounding Systems. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUNDING AND EARTHING & 2nd INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PHYSICS AND EFFECT**, 2006, Maceió. **Proceedings ...** Maceió. 2006.

COURANT, R. Variational Methods for a Solution of Problems of Equilibrium and Vibrations. **Bull. Amer. Math. Soc**, [S. l.], p. 1–23, 1943.

DALZIEL, C. F. Threshold 60-cycle Fibrillating Currents. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers Power Apparatus and Systems**, New Your, v. 79, n. 3, p. 667–673, October 1960.

DALZIEL, C. F. Electric Shock Hazard. **IEEE Spectrum**, New York, v. 9, n. 2, p. 41-50, February 1972.

DARVENIZA, M. **Electrical Properties of Wood and Line Design**. [S. l.]: University of Queensland Press, 1980.

DAWALIBI, F. Electromagnetic Fields Generated by Overhead and Buried Short Conductors, part I – Single Conductors. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 1, n. 4, p. 105-111, October. 1986a.

DAWALIBI, F. Electromagnetic Fields Generated by Overhead and Buried Short Conductors, part II – Ground Networks. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 1, n. 4, p. 112-119, October. 1986b.

DAWALIBI, F.; SELBI, A. Electromagnetic Fields of Energized Conductors. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 8, n. 3, p. 1275-1284, July 1993.

DIAS, G. A. D. et al. Revisiting Lightning Body Model. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, 10., 2009, Curitiba. **Proceedings ...** Curitiba, 2009.

DIAS, G. A. D. et al. Death in the Beach Sentry Box How to Avoid it. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUNDING AND EARTHING & 4th INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PHYSICS AND EFFECT, 2010, Salvador. **Proceedings ...** Salvador, 2010.

DWIGHT, H.B. Calculation of the Resistances to Ground. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, New York, v. 55, p. 1319–1328, December 1936.

FACCIONI FILHO, M. **O Método da Modelagem por Linhas de Transmissão (TLM) e Aplicações em Compatibilidade Eletromagnética (EMC)**. 1997. 86 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 1997.

FERREIRA, G. S. **Modelamento Numérica de Problemas de Compatibilidade Eletromagnética Utilizando TLM (Transmission Line Modeling Method)**. 1999. Tese (Doutorado em Engenharia), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 1999.

FLISOWSKI, Z., MAZZETTI, C., An Approximate Method of Assessment of the Electric Shock Hazard by Lightning Strike. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 18., 1985, Munich. **Proceedings ...** Munich, 1985.

FORTIN, S. et al. Electromagnetic Fields of Energized Conductors in Multilayer Soils. In: THE ASIA-PACIFIC CONFERENCE ON ENVIRONMENTAL ELECTROMAGNETICS, 4., 2006, Dalian. **Proceedings ...** Dalian, 2006.

GAZZANA, D. S. et al. Metodologias Aplicadas para a Modelagem e Análise de Sistemas de Aterramento Impulsivo Revisão do Estado da Arte. In: SPANISH-PORTUGUESE CONFERENCE ON ELECTRICAL ENGINEERING, 11., 2009, Zaragoza. **Proceedings ...** Zaragoza, 2009.

GAZZANA, D. S. et al. Comparative Analysis of EMC Methodologies Applied on Transients Studies of Impulsive Grounding Systems. In: IEEE ICIT INTERNATIONAL

CONFERENCE ON INDUSTRIAL TECHNOLOGY, 2010, Viña del Mar. **Proceedings ...** Viña del Mar, 2010a. v. 1. p. 672-678.

GAZZANA, D. S. et al. Numerical Methodologies for EMC Analysis in High Frequency Grounding Systems. In: IET INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER ELECTRONICS, MACHINES AND DRIVES, 5., 2010, Brighton. **Proceedings ...** Brighton, 2010b.

GAZZANA, D. S. et al. Transient Response of Grounding Electrode with Emphasis on the Transmission Line Modeling Method (TLM). In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 30., 2010, Cagliari. **Proceedings ...** Cagliari, 2010c.

GAZZANA, D. S. et al. Grounding Meshes Performance Evaluation in Sand Soil due Lightning Surges. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEMS TRANSIENTS, 10., 2011, Delft. **Proceedings ...** Delft, 2011.

GAZZANA, D. S. et al. Effective Length Study of Grounding Electrodes Reached by Lightning Based on Transmission Line Modelling Method. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, 2012, Pittsburgh. **Proceedings ...** Pittsburgh, 2012.

GERI, A. Behaviour of Grounding Systems Excited by High Impulse Currents: the Model and Its Validation. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 14, n. 3, p. 1008-1017, July 1999.

GHCC - Global Hydrology and Climate Center. **Lightning and Atmospheric Electricity Research at the GHCC**. Disponível em: <http://thunder.nsstc.nasa.gov/> Acesso em: 05 de Dezembro de 2011.

GRCEV, L.; DAWALIBI, F. An Electromagnetic Model for Transients in Grounding Systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v 5, n. 4, p. 1773-1781, October 1990.

GRCEV, L. Computation of Transient Voltages Near Complex Grounding Systems Caused by Lightning Currents. IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, 1992, Anaheim. **Proceedings ...** Anaheim, 1992. p. 392-399.

GRCEV, L. Computer Analysis of Transient Voltages in Large Grounding Systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 11, n. 2, p. 815-823, April 1996a.

GRCEV, L.; MENTER, F. Transient Electromagnetic Fields Near Large Earthing Systems. **IEEE Transaction on Magnetics**, Piscataway, v. 32, n. 3, p. 1525-1528, May 1996b.

GRCEV, L.; ARNAUTOVSKI, V. Frequency Dependent and Transient Impedance of Grounding Systems: Comparison Between Simulation and Measurement. In: **INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING AND MOUNTAINS**, 2., 1997, Chamonix-Mont-Blanc. **Proceedings ...** Chamonix-Mont-Blanc, 1997.

GRCEV, L.; POPOV, M. On High-Frequency Circuit Equivalents of a Vertical Ground Rod. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 20, n. 2, p. 1598-1603, April 2005.

GRCEV, L. Impulse Efficiency of Ground Electrodes. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 24, n. 1, p. 441-451, January 2009a.

GRCEV, L. Modeling of Grounding Electrodes Under Lightning Currents. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, Piscataway, v. 51, n. 3, p. 559-571, August 2009b.

GRCEV, L. On HF Circuit Models of Horizontal Grounding Electrodes. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, Piscataway, v. 51, n. 3, p. 873-875, August 2009c.

GRCEV, L. Time and Frequency-Dependent Lightning Surge Characteristics of Grounding Electrodes. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 24, n. 4, p. 2186-2196, October. 2009d.

GRCEV, L.; GERCEVA, S. Comparison Between Exact and Quasi-Static Methods for HF Analysis of Horizontal Buried Wires. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, Piscataway, v. 51, n. 4, p. 1051-1054, November 2009e.

GRCEV, L. Lightning Surge Efficiency of Grounding Grids. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 26, n. 3, p. 1692-1699, July 2011.

HANINGTON, R. **Field Computation by Moment Methods**. New York Macmillan Company, 1968. 229 p.

HATZIARGYRIOU, N. D.; LORENTZOU, M. Grounding Systems Design Using EMTP. In: **EUROPEAN EMTP USERS GROUP MEETING**, 23., 1997, Barcelona. **Proceedings ...** Barcelona, 1997.

HEIDLER, F. Analytische Blitzstromfunktion Zur LEMP-Berechnung. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION**, 18., 1985, Munich. **Proceedings ...** Munich, 1985.

HEPPE, R. J. Step Potentials and Body Currents Near Grounds in Two-Layer Earth. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, New York, v. PAS-98, n. 1, p. 45-59, January 1979a.

HEPPE, R. J. Computation of Potential at Surface Above an Energized Grid or Other Electrode. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, New York, v. PAS-98, n. 6, p. 1978-1989, November 1979b.

IBEN, I. E. T.; EDELSTEIN, W. A.; ROEMER, P. B. Dielectrics Properties of Soil: Application to Radio Frequency Ground Heating. **Technical Information Series**, Electronic Systems Laboratory 96CRD150, GE Research and Development Center, [S. l.], 1996.

IMECE, A. F. et al. Modeling Guidelines for Fast Front Transients. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 11, n. 1, p. 493-506, January 1996.

INPE. **INPE divulga incidência de raios em 2009**. Disponível em: <http://www.inpe.br/>. Acesso em: 21 de Janeiro de 2010, Publicado em 13 de Janeiro de 2010.

INPE. **Divulgado novo ranking de incidência de raios**. Disponível em: <http://www.inpe.br/>. Acesso em: 10 de Janeiro de 2012, Publicado em 26 de Abril de 2011.

IEEE POWER & ENERGY SOCIETY. **IEEE Std 1410**, Guide for Improving Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines, New York, 2011.

IEEE POWER & ENERGY SOCIETY. **IEEE Std 80**, Guide for Safety in Ac Substation Grounding, New York, 2000.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61024-1-1**: Protection of Structures Against Lightning, Part 1: General Principles, Geneva, ed. 1.0, 1993.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC/TS 60479-1**: Effects of Current on Human Beings and Livestock - Part 1: General Aspects, Geneva, ed. 4.0, 2005.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC/TS 60479-2**: Effects of Current on Human Beings and Livestock - Part 2: Special Aspects, Geneva, ed. 3.0, 2007.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC/TS 60479-3**: Effects of Current on Human Beings and Livestock - Part 3: Effects of Currents Passing Through the Body of Livestock, Geneva, ed. 1.0, 1998.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC/TR 60479-4**: Effects of Current on Human Beings and Livestock - Part 4: Effects of Lightning Strokes on Human Beings and Livestock, Geneva, ed. 1.0, 2004.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC/TR 60479-5**: Effects of Current on Human Beings and Livestock - Part 5: Touch Voltage Threshold Values for Physiological Effects, Geneva, ed. 1.0, 2007.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 62305-1**: Protection Against Lightning – Part 1: General Principles, Geneva, ed. 2.0, 2010.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 62305-2**: Protection Against Lightning – Part 2: Risk Management, Geneva, ed. 2.0, 2010.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 62305-3**: Protection Against Lightning – Part 3: Physical Damage to Structures and Life Hazard, Geneva, ed. 2.0, 2010.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 62305-4**: Protection Against Lightning – Part 4: Electrical and Electronic Systems Within Structures, Geneva, ed. 2.0, 2010.

ISHIKAWA, T. et al. Experimental Study on the Lethal Threshold Value of Multiple Successive Voltage Impulses to Rabbits Simulating Multi-Stroke Lightning Flash. **International Journal of Biometeorology**. [S. l.], v. 29, n. 2, p. 157-168, June 1985.

JAROSLAW, W. Distribution of Step and Touch Voltages at Typical HV/MV Substation During Lightning. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTROMAGNETICS DISTURBANCES, 13., 2003, Bialystok. **Proceedings ...** Bialystok, 2003.

JITHESH, V.; PANDE, D. C. A Review on Computational EM1 Modeling Techniques. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE AND COMPATIBILITY, 8., 2003, Chennai. **Proceedings ...** Chennai, 2003.

JOHNS, P. B.; BEURLE, R. L. Numerical Solution of 2-Dimensional Scattering Problems Using a Transmission-Line Matrix. **Proceedings of the IEE**, [S. l.], v. 118, n. 9, p. 1203-1208, 1971.

JOHNS, P. B. Application of the Transmission-line Matrix Method to Homogeneous Waveguides of Arbitrary Cross-Section. **Proceedings of the IEE**, [S. l.], v. 119, p. 1086-1091, 1972.

JOHNS, P. B. A New Mathematical Model to Describe the Physics of Propagation. **The Radio and Electronic Engineer**, [S. 1.], v. 44, n. 12, p. 657-666, December 1974.

JOHNSON, W. C. **Transmission Lines and Networks**. International Student Edition. [S. 1.]: McGraw-Hill Inc. 1950.

LI, J. et al. Numerical and Experimental Investigation of Grounding Electrode Impulse-Current Dispersal Regularity Considering the Transient Ionization Phenomenon. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 26, n. 4, p. 2647-2658, October 2011.

LIEW, A. C.; DARVENIZA, M. Dynamic Model of Impulse Characteristics of Concentrated Earths. **Proceedings of the Institution of Electrical Engineers**, [S. 1.], v. 121, n. 2, p. 123-135, February 1974.

LIMA, A. C. S; PORTELA, C. Inclusion of Frequency-Dependent Soil Parameters in Transmission-Line Modeling. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 22, n. 1, p. 492-499, January 2007.

LIMA, J. L. C. **Avaliação Experimental Sobre o Efeito de Ionização do Solo Devido à Injeção de Correntes Impulsivas**. 2008. 142 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2008.

LIU, Y.; ZITNIK, M.; THOTTAPPILLIL, R. An Improved Transmission-Line Model of Grounding System. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, Piscataway, v. 43, n. 3, p. 348-355, August 2001.

LIU, Y. **Transient Response of Grounding Systems Caused by Lightning: Modelling and Experiments**. 2004. 90 p. Thesis, Faculty of Science and Technology, Uppsala, Sweden, 2004.

LORENTZOU, M. I.; HATZIARGYRIOU, N. D.; PAPADIAS, B. C. Time Domain Analysis of Grounding Electrodes Impulse Response. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 18, n. 2, p. 517-524, April 2003a.

LORENTZOU, M. I.; HATZIARGYRIOU, Transient Analysis of Grounding Electrodes Using Pocket Calculator. In: **IEEE POWER TECH CONFERENCE, 2003, Bologna. Proceedings ...** Bologna, 2003b.

MANNA, T.K.; CHOWDHURI, P., Generalised Equation of Soil Critical Electric Field EC Based on Impulse Tests and Measured Soil Electrical Parameters. **IET Generation, Transmission & Distribution**. v. 1, n. 5, p. 811-817, September 2007.

MARTI, J. Accurate Modeling of Frequency Dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transient Simulations. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, New York, v. PAS-101, p. 147-155, January 1982.

MATTOS, M. A. Transitórios em Malhas de Terra. In: **SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 17.**, 2003, Uberlândia. **Anais ...** Uberlândia, 2003.

MATTOS, M. A. Grounding Grids Transient Simulation. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 20, n. 2, p. 1370-1378, April 2005.

- MATTOS, M. A. Lightning-Transmission Line Current Transient TLM Numerical Simulation. In: INTERNATIONAL ZURICH SYMPOSIUM ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, 20., 2009, Zurich. **Proceedings ...** Zurich, 2009. p. 125-129.
- MAZZETTI, C. Principles of Protection of Structures Against Lightning. In: COORAY, V. **The Lightning Flash**. London: IEEE Press, 2003.
- MELIOPOULOS, A. P.; MOHARAM, M. G. Transient Analysis of Grounding Systems. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, New York, v. PAS-102, p. 389–399, February 1983.
- MELIOPOULOS, A. P.; PAPALEXOPOULOS, A. D. Frequency Dependent Characteristics of Grounding Systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 2, p. 1073-1081, October 1987.
- MELIOPOULOS, A. P. **Power System Grounding and Transients**. New York: Marcel Dekke, 1988.
- MENTER, F. Accurate Modeling of Conductors Imbedded in Earth with Frequency Dependent Distributed Parameter Lines. In: EMTP USER GROUP MEETING, 1992, [S. l.]. **Proceedings ...** [S. l.], 1992.
- MENTER, F. E.; GRCEV, L. EMTP-Based Model for Grounding System Analysis. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 9, n. 4, p. 1838-1849, October 1994.
- MIRANDA, J. A. **Simulação de Fenômenos Transitórios em Sistemas de Aterramento**. 2003. 137 p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2003.
- MISBAH, N. R.; AB KADIR, M. Z. A.; GOMES, C. Modelling and Analysis of Different Aspect of Mechanisms in Lightning Injury. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MODELING, SIMULATION AND APPLIED OPTIMIZATION, 4., 2011, Kuala Lumpur. **Proceedings ...** Kuala Lumpur, 2011.
- MONTAÑA, J. et al. UN_PAT: Software for Computing Transients Voltage in Grounding Systems. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUNDING AND EARTHING & 2nd INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PHYSICS AND EFFECT, 2006, Maceió. **Proceedings ...** Maceió, 2006.
- MOUSA, A. M. The Soil Ionization Gradient Associated with Discharge of High Currents into Concentrated Electrodes. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 9, n. 3, p. 1669-1677, July 1994.
- NEKHOUL, B. et al. A Finite Element Method to Calculating the Electromagnetics Fields Generated by Substation Grounding Systems. **IEEE Transactions on Magnetics**, Piscataway, v. 31, n. 3, p. 2150-2153, May 1995.
- NEKHOUL, B. et al. Calculating the Impedance of Grounding Systems. **IEEE Transactions on Magnetics**, Piscataway, v. 32, n. 3, p. 1509-1512, May 1996.
- OHASHI, M.; KITAGAWA, N.; ISHIKAWA, T. Lightning Injury Caused by Discharges Accompanying Flashovers - A Clinical and Experimental Study of Death and Survival. **Burns**, v. 12, n. 7, p. 496-501, October 1986.

OTERO, A. F.; CIDRAS, J.; DEL ALAMO, J. L. Frequency-Dependent Grounding System Calculation by Means of a Conventional Nodal Analysis Technique. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 14, n. 3, p. 873-878, July 1999.

PEDROSA, A. G. et al. Transient Response of Grounding Electrodes for the Frequency-Dependence of Soil Parameters. In: IEEE/PES TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION: LATIN AMERICA, 2010, São Paulo. **Proceedings ...**, São Paulo, 2010. p. 839-845.

PEREIRA, J. B. J. **Modelagem de Incertezas em Sistemas de Aterramento Elétricos**. 2008. 118 p. Tese (Doutorado em Engenharia), Universidade Federal de Brasília, Distrito Federal, Brasil, 2008.

PIANTINI, A. **Descargas Atmosféricas Causam Prejuízo Anual de R\$ 500 Milhões ao Setor Elétrico**. (entrevista com publicação online). Disponível em: http://www.clamper.com.br/noticias_artigo.asp?id=104. Acesso em: 21 de Dezembro de 2008, Publicado em 26 de Novembro de 2007.

POILJAK, D. et al. Towards the Model for the Assessment of the Current Density Induced in the Human Body Due to the Electric Field Irradiated from the Rod Struck by Lightning. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOFTWARE, TELECOMMUNICATIONS AND COMPUTER NETWORKS, 15., 2007, Split. **Proceedings ... Split**, 2007.

PORTELA, C. Grounding Systems Behavior for Atmospheric Discharges - Determination of Relative Effect related to People and Equipments Security and the Interference in the Protection and Control Systems. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 14., 1997, Belém. **Anais ... Belém**, 1997a.

PORTELA, C. Frequency and Transient Behavior of Grounding Systems. I Physical and Methodological Aspects. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, 1997, Beijing. **Proceedings ... Beijing**, 1997b. p. 379-384.

PORTELA, C. Frequency and Transient Behavior of Grounding Systems. II. Practical application examples. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, 1997, Beijing. **Proceedings ... Beijing**, 1997c. p. 385-390.

PORTELA, C. Campos e Ondas. Rio de Janeiro: COPPE, 1997d.

PORTELA, C. Ondas Planas: complementos. Rio de Janeiro: COPPE, 1998.

PORTELA, C.; TAVARES, M.; PISSOLATO FILHO, J. Accurate Representation of Soil Behaviour for Transient Studies. **Proceedings of the IEE Generation, Transmission and Distribution**, v. 150, n. 6, p. 736-744, November 2003.

POTIER, G. C. et al. **Física dos Raios & Engenharia de Proteção**. 2^a ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2010.

RAMAMOORTY, M.; NARAYANAN, M. M. B.; PARAMESWARAN, S. Transient Performance of Grounding Grids. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 4, p. 2053-2059, October 1989.

- SADIKU, M. N. O. **Numerical Techniques in Electromagnetics with MatLab**. New York: CRC Press, 2009.
- SEKIOKA, S. et al. Current-Dependent Grounding Resistance Model Based on Energy Balance of Soil Ionization. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 21, n. 1, p. 194-201, January 2006.
- SES Safe Engineering Services & Technologies Ltd., 2006.
- SHI, W.; CHEW, M-S. Mathematical and Physical Models of a Total Artificial Heart. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONTROL AND AUTOMATION, 7., 2009, Christchurch. **Proceedings ...** Christchurch, 2009. p. 637-642.
- SUNDE, E. D. **Earth Conduction Effects in Transmission Systems**. New York: Dover Publications, 1968.
- TELLÓ, M. et al. **Aterramento Elétrico Impulsivo, em Baixas e Altas Frequências com Apresentação de Casos**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007a.
- TELLÓ, M. et al. Improvement of Transmission Line Lightning Performance. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, 9., 2007, Foz do Iguaçu. **Proceedings ...** Foz do Iguaçu, 2007b.
- MATHWORKS ,The MathWorks, Inc. **MATLAB Software**, 2012.
- VELASCO, J. A. M. **Power System Transients Parameter Determination**. New York: CRC Press, 2010.
- VELASQUEZ, R.; MUKHEDKAR, D. Analytical Modeling of Grounding Electrodes Transient Behavior. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, New York, v. PAS-103, p. 1314–1322, June 1984.
- VISACRO, S. A Comprehensive Approach to the Grounding Response to Lightning Currents. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 22, n. 1, p. 381-386, January 2007.
- VISACRO, S. et al. The Response of Grounding Electrodes to Lightning Currents: the Effect of Frequency Dependent Soil Resistivity and Permittivity. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 53, n. 2, p. 401-406, May 2011.
- VISACRO, S. ALIPIO, R. Frequency Dependence of Soil Parameters: Experimental Results, Predicting Formula and Influence on the Lightning Response of Grounding Electrodes. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 27, n. 2, p. 927-935, April 2012.
- WANG, J. LIEW, A.C. DARVENIZA, M. Extension of Dynamic Model of Impulse Behavior of Concentrated Grounds at High Currents. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 20, n. 3, p. 2160-2165, July 2005.
- WISINTAINER, B. W. **Análise Através de Simulações Numéricas TLM da Influência do Comportamento Dispersivo do Solo em Sistemas de Aterramento Frente a Descargas Atmosféricas**. 2010. 104 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, Brasil, 2010.
- YEE, K. S. Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, Piscataway, v. AP-14, n. 5, p. 302–307, May 1966.

YUAN, X. Three-Dimensional Electromagnetic Scattering from Inhomogeneous Objects by the Hybrid Moment and Finite Element Method. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, Piscataway, v. 38, n. 8, p. 1053–1058, August 1990.

ZOLL. **Biphasic Technology**. Disponível em: <http://www.zoll.com/medical-technology/defibrillation/rectilinear-biphasic-technology/current/>. Acesso em Janeiro 2012.

APÊNDICE – REFERÊNCIAS PESSOAIS

Publicações em Profundidade

DIAS, G. A. D.; TELLÓ, M.; GAZZANA, D. S.; POTIER, G. C. Revisiting Lightning Body Model. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, 10., 2009, Curitiba. **Proceedings ...** Curitiba, 2009.

GAZZANA, D. S.; BRETAS, A. S.; DIAS, G. A. D.; TELLÓ, M. Metodologias Aplicadas para a Modelagem e Análise de Sistemas de Aterramento Impulsivo Revisão do Estado da Arte. In: SPANISH-PORTUGUESE CONFERENCE ON ELECTRICAL ENGINEERING, 11., 2009, Zaragoza. **Proceedings ...** Zaragoza, 2009.

DIAS, G. A. D.; GAZZANA, D. S.; BRETAS, A. S.; TELLÓ, M.; VOGEL, A. F.; BORN, A.; DIENSTMANN, V. Death in the Beach Sentry Box How to Avoid it. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUNDING AND EARTHING & 4th INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PHYSICS AND EFFECT, 2010, Salvador. **Proceedings ...** Salvador, 2010.

GAZZANA, D. S.; BRETAS, A. S.; DIAS, G. A. D.; TELLÓ, M. Comparative Analysis of EMC Methodologies Applied on Transients Studies of Impulsive Grounding Systems In: IEEE ICIT INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL TECHNOLOGY, 2010, Viña del Mar. **Proceedings ...** Viña del Mar, 2010. v. 1. p. 672-678.

GAZZANA, D. S.; BRETAS, A. S.; DIAS, G. A. D.; TELLÓ, M. Numerical Methodologies for EMC Analysis in High Frequency Grounding Systems. In: IET INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER ELECTRONICS, MACHINES AND DRIVES, 5., 2010, Brighton. **Proceedings ...** Brighton, 2010.

GAZZANA, D. S.; BRETAS, A. S.; DIAS, G. A. D.; TELLÓ, M. Transient Response of Grounding Electrode with Emphasis on the Transmission Line Modeling Method (TLM). In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 30., 2010, Cagliari. **Proceedings ...** Cagliari, 2010.

POTIER, G. C.; GAZZANA, D. S.; DIAS, G. A. D.; SILVA, L. C. F.; TELLÓ, M. **Física dos Raios & Engenharia de Proteção**. 2^a ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2010.

GAZZANA, D. S.; BRETAS, A. S.; DIAS, G. A. D.; TELLÓ, M. Grounding Meshes Performance Evaluation in Sand Soil due Lightning Surges. . In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEMS TRANSIENTS, 10., 2011, Delft. **Proceedings ...** Delft, 2011.

GAZZANA, D. S.; BRETAS, A. S.; DIAS, G. A. D.; TELLÓ, M.; THOMAS, D. W.; CHRISTOPOULOS C. Effective Length Study of Grounding Electrodes Reached by Lightning Based on Transmission Line Modelling Method. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, 2012, Pittsburgh. **Proceedings ...** Pittsburgh, 2012.

Publicações em Abrangência

TELLÓ, M.; DIAS, G. A. D.; GAZZANA, D. S.; CANALLI, V. M.; BRANCO FILHO, V. T. D.; MARTINS JR, F. R. P; ROSO, D. S.; HOMRICH, R. P. Improvement of Transmission Line Lightning Performance. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, 9., 2007, Foz do Iguaçu. **Proceedings ...** Foz do Iguaçu, 2007.

DIAS, G. A. D.; BRANCO FILHO, V. T. D.; TELLÓ, M.; SALGADO, L.; GAZZANA, D. S. Grounding System of Emergency Generation of São José do Norte Due to the Erection of Rio Grande Shipyard. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUNDING AND EARTHING & 3th INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PHYSICS AND EFFECT, 2008, Florianópolis. **Proceedings ...** Florianópolis, 2008.

DIAS, G. A. D.; FILIPPON, D.; GAZZANA, D. S.; TELLÓ, M.; LINHARES, A. A.; POTIER, G. C. Grounding and Shielding of UTE Candiota II Fase C. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, 10., 2009, Curitiba. **Proceedings ...** Curitiba, 2009.

CABRAL, R. J.; GAZZANA, D. S.; LEBORGNE, R. C.; BRETAS, A. S.; DIAS, G. A. D.; TELLÓ, M. Evaluation of the Wire-Guard and Grounding Arrangements in Overhead Distribution Feeders Performance Against Lightning. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON RENEWABLE ENERGIES AND POWER QUALITY, 2012, Santiago de Compostela. **Proceedings ...** Santiago de Compostela, 2012.