

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

SISTEMA DE ATERRAMENTO COM  
CABO CONTRAPESO REPRESENTADO  
POR LINHAS DE TRANSMISSÃO  
IMPLEMENTADO EM MATLAB COM  
CIRCUITOS EM CASCATA DE  $\pi$

**José Saverio Spozito Junior**

**Orientador: Prof. Dr. Luiz Fernando Bovolato**

**Ilha Solteira - SP, Fevereiro de 2012**



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"  
Campus de Ilha Solteira

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

SISTEMA DE ATERRAMENTO COM  
CABO CONTRAPESO REPRESENTADO  
POR LINHAS DE TRANSMISSÃO  
IMPLEMENTADO EM MATLAB COM  
CIRCUITOS EM CASCATA DE  $\pi$

**Jose Saverio Spozito Junior**

**Orientador:** Prof. Dr. Luiz Fernando Bovolato

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia – UNESP - Campus de Ilha Solteira, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de conhecimento: Automação.

**Ilha Solteira - SP, Fevereiro de 2012**

## FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação  
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP - Ilha Solteira.

S765s Spozito Junior, José Saverio.  
Sistema de aterramento com cabo contrapeso representado por linhas de transmissão  
Implementado em Matlab com circuitos em cascatas de PÍ / José Saverio Spozito Junior.  
-- Ilha Solteira : [s.n.], 2012  
84 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de  
Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2012

Orientador: Luiz Fernando Bovolato  
Inclui bibliografia

1. Correntes elétricas – Aterramento. 2. Sistemas de aterramento. 3. Hastes  
metálicas. 4. Cabos contrapeso. 5. Para-raios.



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA


**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**


**TÍTULO:** Sistema de aterramento com cabo contrapeso representado por linhas de transmissão implementado em Matlab com circuitos em cascata de Pi

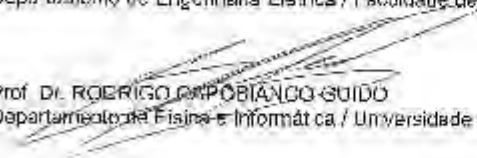
**AUTOR:** JOSÉ SAVERIO SPOZITO JUNIOR

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. LUIZ FERNANDO BOVOLATO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área: AUTOMAÇÃO, pela Comissão Examinadora:

  
Prof. Dr. LUIZ FERNANDO BOVOLATO  
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

  
Prof. Dr. SERGIO KUROKAWA  
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

  
Prof. Dr. ROGERIO DO PRÍNCIPE GUIDO  
Departamento de Física e Informática / Universidade de São Paulo

Data da realzação: 24 de maio de 2012.

*Dedico à Professora Soeli Aparecida Ferreira Spozito, esposa e companheira  
em paciência e incentivo de levar a termo este trabalho.*

† *In memoriam:*

*Jose Saverio Spozito e Alcide Moreira Spozito  
Dr. Jose Carlos Rossi*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a DEUS pela oportunidade da vida e encaminhamento de minha trajetória de modo a ter oportunidade de desenvolvimento intelectual tão preciosa.

Ao meu orientador, professor Dr. Luiz Fernando Bovolato que aceitou o desafio de tema recente. Agradeço a compreensão e a paciência do mesmo nos momentos em que precisava alternar meu foco entre os estudos e trabalho, bem como alguns momentos em que me ajudou a refletir sobre críticas e sugestões sobre este trabalho, sempre de forma ponderada.

Aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica da Unesp - Campus de Ilha Solteira – SP: Dra. Mariângela Bovolato, Dr. Sergio Kurokawa, Dr. Afonso José do Prado, pelos incentivos e ensinamentos nas disciplinas cursadas e orientadas. Aos Mestres Gislaine Aparecida Alves e Newton Vieira Junior no incentivo como companheiros de jornada.

Aos meus filhos Eng. Ms. Daniel Saverio Spozito, Eng. Raphael Saverio Spozito, Tec. Fabio Saverio Spozito e esposas Prof<sup>a</sup>. Sonia Regina Correa Fernandes, Katia de Oliveira Spozito e Andreia Aparecida Renzi, que muito incentivaram para que este trabalho de Mestrado se concretizasse.

Aos meus netos Maria Eduarda Renzi Spozito, Eng<sup>a</sup>. Taís Fernandes Guerra e Tiago Fernandes Guerra, pela escolha do caminho correto, como estudo e trabalho, possibilitando a harmonia e equilíbrio familiar, demonstrando, desde cedo, características de pessoas comprometidas, esforçadas e respeitadas.

Ao irmão Dr. Eliseu Saverio Sposito e esposa Dr<sup>a</sup>. Maria Encarnação Beltrão Sposito, referências familiares na academia pelos incentivos, Unesp - Campus de Presidente Prudente - SP.

Ao Professor Dr. Jose de Carvalho Sombra, incentivador da empreitada face aos anos já decorridos além do período normal e Dr. Rodrigo Capobianco Guido, Unesp - Campus de São José do Rio Preto - SP.

Aos colegas de trabalho na Unorp, professores Dr. Paulo Sergio da Silva Gouveia, , André Luiz Delorme e Enio Jose Bolognini pelos incentivos, colaborações e esclarecimentos sobre a linguagem de programação empregada e Ademir Pradela na revisão ortográfica do presente trabalho.

Professor Eng. Arnaldo de Oliveira e aos demais incentivadores com gestos e palavras de ânimo, que porventura deixamos de decliná-los.

"Engenharia consiste em 10% de Física e 90% de Bom Senso!"

† Professor Ronald Ulysses Pauli, Escola de Engenharia de Lins - 1966, Unilins



## RESUMO

Este estudo é um levantamento de artigos e publicações sobre os diversos sistemas de aterramento existentes. Os sistemas de aterramento estão diretamente ligados à proteção das instalações de subestações e equipamentos empregados na geração, transmissão e distribuição de energia elétrica que por ocasião das descargas atmosféricas diretas ou por tensões induzidas por campos eletromagnéticos decorrentes, possam ser prejudicados. O Método propõe o estudo de um sistema de aterramento, com cabo contrapeso, utilizando abordagem por linhas de transmissão representada por uma cascata de circuitos  $\pi$ , analisado e simulado pelo “Software Matlab”. Utilizou-se a simulação com o emprego de programa no Matlab para linhas de transmissão de energia elétrica, a primeira com comprimento de dez mil metros e outra com oitenta metros, utilizada como referencial na comparação das respostas aos sinais de entrada aplicados nos circuitos  $\pi$  simulando o cabo contrapeso com seus componentes representado pelos parâmetros elétricos. Através de variação no parâmetro resistividade do solo comparou-se os resultados mostrados nos gráficos da tensão elétrica na terminação do cabo contrapeso, simulado como uma linha de transmissão com terminação em aberto. Como análise adicional em termos de segurança foi implementado no programa a análise das tensões elétricas ao longo do cabo contrapeso, excitado por aplicação de sinais de tensão elétrica e de corrente elétrica estabelecendo a comparação entre os potenciais elétricos sobre o solo em valores máximos que podem afetar seres vivos.

Palavras-chave: Sistemas de aterramentos. Hastes metálicas. Cabos Contrapeso. Proteção por para-raios.

## **ABSTRACT**

This study is a survey of articles and publications on the various existing grounding systems. The grounding systems are directly linked to the protection of substation facilities and equipment used in the generation, transmission and distribution of electric power, due to induced voltages by lightning's generating electromagnetic fields. The method proposed in this study, about a grounding system made with a buried cable using the approach by transmission lines method, represented by a cascade of  $\pi$  circuits analyzed and simulated by Matlab Software. The simulation with the Matlab program on transmission lines of electricity, one ten thousand meters in length and another eighty meters respectively, to serve as a reference in comparison between responses to input signals applied to the cable simulated by  $\pi$  circuit employing the parameters involved. Through variation in the soil resistivity parameter, the results are shown in the graphs of voltage in the termination of the grounding cable, simulated as an open line at end. As further analysis in terms of safety, was implemented the analysis of the voltages along the cable, by applying voltage signals and current to check the electrical potentials on the ground, the maximum values that affect persons.

**Keywords:** Grounding systems. Metal rods. Grounding cables. Lightning protection.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Descarga atmosférica.....	20
Figura 2 - Formação de raios entre nuvens.....	22
Figura 3 - Descargas atmosféricas durante temporal.....	25
Figura 4 - Exemplo de instalação de para-raio aéreo e cabo de descida .....	27
Figura 5 - Acessórios para sistemas de aterramento.....	27
Figura 6 - Haste de aterramento e cabo de ligação.....	28
Figura 7 - Representação do cabo contrapeso. ....	29
Figura 8 - Diferença de potencial elétrico de passo.....	30
Figura 9 - Diferença de potencial elétrico de toque.....	30
Figura 10 - Circuito elétrico equivalente do potencial de toque.....	33
Figura 11 - Circuito elétrico equivalente do potencial de passo.....	33
Figura 12 - Representação básica de um eletrodo enterrado. ....	42
Figura 13- Representação da célula $\pi$ do cabo contrapeso. ....	47
Figura 14 - Circuito $\pi$ equivalente da célula unitária do cabo contrapeso. ....	47
Figura 15 - Modo de injeção de sinal no cabo contrapeso. ....	50
Figura 16 - Modo de injeção de sinal em malha de aterramento.....	50
Figura 17 - Circuitos $\pi$ em cascata. ....	53
Figura 18 - Sinal de excitação em rampa estabilizada em 0 kV.....	58
Figura 19 - Sinal de excitação em rampa estabilizada em 20 kV.....	58
Figura 20 - Tensão elétrica no final da linha elétrica em aberto – 10 km .....	59
Figura 21 - Tensão elétrica no final da linha elétrica em aberto – 0,080 km. ....	59
Figura 22 - Tensão elétrica no final do cabo contrapeso em função da resistividade do solo. ....	60
Figura 23 - Tensão elétrica no final do cabo contrapeso em função da resistividade do solo. ....	61
Figura 24 - Tensão elétrica no final do cabo contrapeso em função da resistividade do solo. ....	61
Figura 25 - Sinal no final da linha em aberto em função da resistividade do solo.....	62
Figura 26 - Sinal no final da linha em aberto em função da resistividade do solo.....	62
Figura 27 - Tensões elétricas ao longo do cabo contrapeso .....	64
Figura 28 - Tensões elétricas ao longo do cabo contrapeso .....	64
Figura 29 – Tensões elétricas ao longo do cabo contrapeso.....	65
Figura 30 - Circuitos em cascata $\pi$ - corrente.....	66
Figura 31 - Tensões elétricas no terminal do cabo contrapeso por corrente. ....	67
Figura 32 - Tensões elétricas no terminal do cabo contrapeso por corrente. ....	67
Figura 33 - Tensões elétricas no terminal do cabo contrapeso por corrente. ....	68
Figura 34 - Tensões elétricas no terminal do cabo contrapeso por corrente. ....	68
Figura 35 - Tensões elétricas no final do cabo contrapeso por corrente. ....	69
Figura 36 - Tensões elétricas ao longo do cabo contrapeso por corrente.....	69
Figura 37 - Tensões elétricas ao longo do cabo contrapeso por corrente.....	70
Figura 38 - Tensões elétricas ao longo do cabo contrapeso excitado por corrente .....	70
Figura 39 - Tensões e correntes no cabo contrapeso em segmentos .....	81

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Diferenças de Potenciais no solo. ....	32
Quadro 2 - Comparação dos principais modelos analíticos.....	37
Quadro 3 - Comparação dos diferentes modelos com métodos numéricos. ....	41
Quadro 4 - Resistividade do solo em função do tipo de formação. ....	44
Quadro 5 - Parâmetros de sistemas de aterramento. ....	49
Quadro 6 - Parâmetros de referencia da linha de transmissão elétrica .....	58

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

COSEDI	Comissão de Segurança e Edificações
EMTP	Electro Magnetic Transient Program
FDTD	Finite Elements Time Domain
FEM	Finite Elements Method
GHz	Giga Hertz
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineering
kA	um mil Ampère ou quilo Ampère
kHz	um mil Hertz ou quilo Hertz
kV	um mil Volt ou quilo Volt
MATLAB	Language of Mathematical Computing
MB	Mega Bytes
MHz	Mega Hertz
MoM	Moment Method
mA	miliampère
mH	milihenry
ms	milisegundos
nF	nanofarad
NASA	National Aeronautics and Space Administration
OO	Orientado a Objetos
pF	picofarad
RF	Rádio Frequência
TLM	Transmission Line Method
SPDA	Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas
SI	Sistema Internacional de Medidas
$\mu\text{m}$	micrômetro
$\mu\text{s}$	microsegundos
$\Omega$	Símbolo da resistência elétrica Ohm.

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO: BREVE HISTÓRICO RELACIONADO</b> .....	16
1.1	Trabalhos de consulta relacionados .....	17
1.2	Motivação.....	17
1.3	Objetivos do trabalho .....	18
1.4	Organização do texto .....	18
2	<b>CONCEITOS E DEFINIÇÕES</b> .....	20
2.1	Descargas Atmosféricas.....	20
2.2	Modo de captar descargas elétricas.....	26
2.3	Fatores relacionados entre eletricidade e seres vivos. ....	29
2.4	Máxima corrente elétrica permissível pelo corpo humano .....	31
2.5	Conclusão sobre as origens das descargas atmosféricas .....	33
3	<b>O ESTADO DA ARTE DOS MODELOS MATEMATICOS APLICADOS NOS SISTEMAS DE ATERRAMENTO</b> .....	34
3.1	Modelagem analítica .....	35
3.1.1	<i>Modelagem por circuitos elétricos</i> .....	35
3.1.2	<i>Modelagem por campos eletromagnéticos</i> .....	36
3.1.3	<i>Modelagem híbrida</i> .....	36
3.1.4	<i>Modelagem por linhas de transmissão de energia elétrica</i> .....	37
3.2	Modelagem numérica .....	37
3.2.1	<i>Método das diferenças finitas no domínio do tempo</i> .....	38
3.2.2	<i>Método dos momentos (MoM)</i> .....	39
3.2.3	<i>Método dos elementos finitos no domínio do tempo</i> .....	39
3.2.4	<i>Método numérico da modelagem por linhas de transmissão de energia elétrica (TLM)</i> .....	40
3.3	Conclusão sobre os métodos e modelos relacionados. ....	41
4	<b>CABO CONTRAPESO ANALISADO PELO METODO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO</b> .....	42
4.1	Parâmetros elétricos .....	42
4.1.1	<i>Resistência elétrica equivalente do sistema de aterramento</i> .....	43
4.1.2	<i>Resistividade elétrica do solo</i> .....	43
4.1.3	<i>Modo de cálculo da resistividade elétrica do solo</i> .....	43
4.1.4	<i>Resistência aparente de aterramento do cabo contrapeso com efeito do solo</i> .....	44
4.1.5	<i>Condutância elétrica</i> .....	45
4.2	Identificação dos parâmetros do cabo nu enterrado ou cabo contrapeso simples .....	45
4.3	Exemplo numérico dos parâmetros de um cabo contrapeso .....	48
4.4	Tipos de sinais elétricos aplicáveis no circuito da cascata de $\pi$ . ....	49
4.5	Conclusão sobre os parâmetros calculados para o cabo contrapeso em circuitos $\pi$ .....	51
5	<b>CIRCUITOS EM CASCATA DE <math>\pi</math></b> .....	52
5.2	Equações dos circuitos $\pi$ em cascata .....	53
5.3	Montagem da matriz das equações diferenciais.....	55
5.3.1	<i>Matriz dos coeficientes para as equações diferenciais.</i> .....	56

<b>6</b>	<b>RESULTADOS GRÁFICOS DA SIMULAÇÃO DO CABO CONTRAPESO</b>	<b>58</b>
<b>6.3</b>	<b>Análise de tensões elétricas ao longo do cabo contrapeso .....</b>	<b>63</b>
<b>6.4</b>	<b>Resultados gráficos da simulação do cabo contrapeso por cascata de circuitos <math>\pi</math> aplicando onda de corrente elétrica .....</b>	<b>65</b>
<b>6.5</b>	<b>Conclusão sobre o resultado das análises de tensões elétricas no cabo contrapeso .....</b>	<b>70</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>72</b>
<b>7.2</b>	<b>Continuidade na implementação dos programas matlab.....</b>	<b>73</b>
<b>7.3</b>	<b>Estudos sobre a implantação de um sistema real para aquisição de dados.....</b>	<b>73</b>
<b>7.4</b>	<b>Estudos sobre o futuro no emprego do método.....</b>	<b>73</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>74</b>
	<b>APENDICE A .....</b>	<b>77</b>
	<b>APENDICE B.....</b>	<b>81</b>
	<b>APENDICE C .....</b>	<b>83</b>
	<b>ANEXO A.....</b>	<b>84</b>

## CAPÍTULO I

---

### 1 INTRODUÇÃO: BREVE HISTÓRICO RELACIONADO

Na segunda metade do século XIX, os estudos ligados aos sistemas de proteção de instalações e edificações contra descargas atmosféricas eram pouco enfatizados. Havia, sobre o assunto, o simples para-raios Franklin que atendia às necessidades mínimas exigidas. A medida que avançava o uso e emprego da energia elétrica, considerada prática e versátil face às existentes na época, com demanda crescente, começaram a multiplicar-se empresas de geração, transmissão e distribuição dessa forma de energia. Pela dimensão de tais sistemas, os fenômenos atmosféricos geradores de descargas tornaram-se fontes constantes de problemas.

O complexo formado por redes, equipamentos, dispositivos de proteção e demais acessórios interligados eram constantemente danificados pelas descargas atmosféricas. Em vista dos problemas decorrentes de fornecimento interrompido, por ocasião de chuvas, temporais, vendavais e suas conseqüências, iniciaram-se pesquisas sobre os modos de aterramento e seu comportamento durante as descargas atmosféricas.

Constatada a fragilidade dos sistemas elétricos de potência sob a ação destes agentes naturais, alguns pesquisadores notaram que o comportamento do aterramento, dispositivo notadamente eficiente em proteção, diferia muito quando sujeito a correntes de impulso com alta intensidade, comparado ao utilizado em baixa frequência e baixa intensidade das mesmas.

Detectou-se ainda que o comportamento dos sistemas de aterramento apresentava efeitos contrastantes entre ensaios realizados com dados coletados nas operações em baixa frequência, comparados aos de altas intensidades, notadamente pela presença de harmônicas observadas por distorções constatadas nos resultados testados em alguns modelos propostos.

No caso de sistemas de aterramentos de grandes dimensões vale destacar que a resistência de aterramento tem valores maiores em detrimento dos medidos com corrente de baixa intensidade e baixa frequência.

Outro fenômeno também presente é a ionização do solo nas vizinhanças das hastes de aterramentos, as quais propiciam a circulação e drenagem das correntes.

No intuito de apresentar um quadro resumido mais compreensível da atualidade nos estudos e métodos existentes, explana-se neste trabalho alguns dos métodos e modelos de aterramento já desenvolvidos e divulgados. Os potenciais de passo e toque toleráveis pelos



seres vivos usualmente são considerados como parâmetros referenciais na análise de malhas de terra em regime permanente operando nas baixas frequências. Entretanto, tais potenciais podem ser excedidos no período transitório de um impulso elétrico como na ocorrência de uma descarga atmosférica, ou raio.

As descargas induzem nas redes de energia elétrica, através de campos eletromagnéticos, altas tensões transitórias antes de serem neutralizadas e dissipadas pelo solo, além de prejudicarem dispositivos sensíveis a esses campos quando conectados ao sistema, induzindo a erros de operação ou ainda destruição.

Metodologia e modelos apropriados que simulem o comportamento de um sistema de aterramento frente a uma descarga atmosférica podem prover o embasamento necessário para construção de malhas de terra mais eficientes introduzindo um aumento na confiabilidade e segurança de operação do sistema elétrico envolvido. Atenção especial deve ser dada à segurança dos profissionais ligados aos serviços de eletricidade que operam e mantêm o funcionamento dos sistemas de geração, transmissão e distribuição da energia elétrica. Inclui-se a segurança dos usuários que estão nas proximidades das fontes normais em áreas residenciais.

## **1.1 Trabalhos de consulta relacionados**

Curso de pós-graduação sobre linhas de transmissão, UNESP-FEIS-Campus Ilha Solteira (SP), literatura tradicional dos “Proceedings IEEE”, teses de mestrado e doutorado do acervo UNESP-FEIS Campus de Ilha Solteira (SP), teses de doutorado do acervo USP-EESC Campus de São Carlos (SP), sobre o tema Aterramento em Sistemas Elétricos, livros e periódicos da área, listados na referência.

E também projetos tradicionais de redes de transmissão de energia elétrica, baseados em normas, recomendações e melhores práticas.

## **1.2 Motivação**

Durante a análise das ferramentas e com a necessidade de uma solução que realizasse simulações de sistemas de aterramento localizados ou distribuídos em instalações prediais, comerciais e industriais foi observada a carência de soluções que adotassem meios de

monitoramento na proteção dos equipamentos e acessórios ligados diretamente à rede transmissora de energia elétrica.

A motivação para este trabalho, além da necessidade de resolver uma solução pontual, foi destacar a carência de soluções para aperfeiçoamento dos sistemas empregados na proteção de redes de energia elétrica e os vários dispositivos a elas conectados.

Como principal contribuição, considerou-se o emprego do “Software Matlab” no desenvolvimento da ferramenta sem a dependência de sistemas de terceiros no que tange, especificamente, os sistemas exclusivos e muitas vezes pouco flexíveis existentes no mercado. Neste trabalho de montagem dos programas relacionados às redes de energia elétrica, e os sistemas de aterramentos agregados, inclui alterar a estrutura no caso da inserção de novos componentes ou atributos.

### **1.3 Objetivos do trabalho**

Este trabalho tem como propósito desenvolver a simulação do comportamento de um cabo contrapeso utilizado em sistemas de aterramento onde aplica-se os conceitos de aterramento na proteção de grandes sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Também leva em consideração a formação e o comportamento das descargas atmosféricas que são responsáveis por grande parte dos problemas nesses sistemas.

Foi desenvolvida uma metodologia que possibilitou utilizar a ferramenta de computação “Matlab” nos programas para coleta de dados sobre o comportamento do cabo contrapeso muito utilizado em sistemas sujeitos a ação de altas tensões e ou correntes impulsivas. Deste modo, justificar-se-á o desenvolvimento da simulação com as funcionalidades básicas na modelagem através do método das linhas de transmissão (TLM) representadas por circuitos elétricos, na configuração de circuitos  $\pi$  em cascata.

### **1.4 Organização do texto**

O texto foi organizado em sete capítulos, incluída a introdução apresentada no Capítulo I. No capítulo II descreve-se o processo das descargas atmosféricas nas suas formações e os fenômenos de propagação envolvidos, juntamente com a proteção à vida humana nas possíveis condições de contato ou proximidade. No Capítulo III descreve-se sucintamente uma análise sobre o estado da arte dos diversos métodos e modelos analíticos e ou numéricos,

graus de dificuldade nas formulações e comparação entre os métodos analisados. No Capítulo IV é descrita a metodologia aplicada bem como a utilização dos conceitos de simulação do cabo contrapeso como uma linha de transmissão de energia elétrica com terminal de carga em aberto. O capítulo V apresenta a teoria pertinente ao equacionamento utilizado no desenvolvimento dos programas utilizando o “Software Matlab”. No capítulo VI são apresentados os resultados da aplicação dos programas implementados com excitação por tensão elétrica, na forma de figuras contendo gráficos ilustrativos. Inclui as figuras com os gráficos dos resultados com excitação por correntes elétricas e figuras dos gráficos da análise das tensões elétricas ao longo do cabo contrapeso. No capítulo VII apresenta-se conclusões sobre os resultados obtidos nas simulações.

---

## CAPÍTULO II

---

### 2 CONCEITOS E DEFINIÇÕES

Para o correto entendimento do funcionamento e utilidade de um sistema de aterramento torna-se necessário definirmos, de forma clara, os fenômenos, parâmetros e equipamentos envolvidos interna ou externamente nas varias combinações existentes cuja condição básica inicial consiste em neutralizar as descargas atmosféricas, relâmpagos ou raios.

#### 2.1 Descargas Atmosféricas

São descargas elétricas de grande extensão, da ordem de alguns quilômetros e de grande intensidade com picos de corrente acima de um quilo Ampère que ocorrem devido ao acúmulo de cargas elétricas em regiões localizadas da atmosfera, em geral dentro de tempestades. A descarga, decorrente do acúmulo das cargas elétricas dentro das nuvens, provocada pela movimentação forçada devido às diferenças de pressão e temperatura localizadas, inicia quando o campo elétrico produzido por estas cargas excede sua capacidade isolante também conhecida como rigidez dielétrica do ar em um dado local na atmosfera, que pode ser dentro da nuvem ou próximo ao solo. Quebrada essa rigidez, tem início um rápido movimento de elétrons de uma região de cargas negativas para uma região de cargas positivas. Existem diversos tipos de descargas, classificadas em função do local onde se originam e do local onde terminam. A Figura 1 mostra uma descarga completa, ou seja, saindo da nuvem e atingindo o solo terrestre.

**Figura 1 - Descarga atmosférica.**



Fonte: Eletric Ground (2011).

Descargas atmosféricas podem ocorrer da nuvem para o solo, do solo para a nuvem, dentro da nuvem, da nuvem para um ponto qualquer na atmosfera, denominados descargas no ar, ou ainda entre nuvens. De todos os tipos de descargas, as entre nuvens são as mais frequentes, em parte devido ao fato da capacidade isolante do ar diminuir com a altura em função da diminuição da densidade do mesmo ou devido às regiões de cargas opostas dentro das nuvens encontrarem-se próximas. Globalmente essas descargas entre nuvens representam cerca de 70% do número total de descargas.

Esse percentual, em relação às descargas totais deflagradas, varia com a latitude geográfica, sendo em torno de 80-90% nas regiões próximas ao equador geográfico e 50-60% em regiões de médias latitudes.

As descargas nuvem para o solo, também denominados raios, são os mais estudados devido ao seu caráter destrutivo. Elas podem ser divididas em dois tipos ou polaridades, definidas em função do sinal da carga efetiva transferida da nuvem ao solo: negativas e positivas. Considera-se a denominação relâmpago ao efeito luminoso gerado pela descarga atmosférica tornando visível sua trajetória.

Os raios de polaridade negativa, perfazendo cerca de 90%, transferem cargas negativas (elétrons) de uma região carregada negativamente dentro da nuvem para o solo. Os raios positivos em cerca de 10%, transferem cargas positivas de uma região carregada nesta polaridade dentro da nuvem para o solo porém na realidade elétrons são transportados do solo para a nuvem.

Os raios duram na média em torno de um quarto de segundo, embora valores variando desde um décimo de segundo até dois segundos têm sido registrados. Durante este período, percorrem na atmosfera trajetórias com comprimentos desde alguns quilômetros até dezenas de quilômetros.

A corrente elétrica, por sua vez, sofre grandes variações desde centenas de Ampère até centenas de quilo Ampère. A corrente flui em um canal com um diâmetro de poucos centímetros, denominado canal do relâmpago, onde a temperatura atinge valores máximos tão elevados quanto algumas dezenas de milhares de graus e a pressão valores de dezenas de atmosferas (DESCARGAS..., 2000).

Embora o raio possa parecer para o olho humano uma descarga contínua, em geral ele é formado de múltiplas descargas, denominadas descargas de retorno, que se sucede em intervalos de tempo muito curtos. Ao número destas descargas, dá-se o nome de

multiplicidade do raio. Durante o intervalo entre as descargas, variações lentas e ou rápidas de correntes podem ocorrer.

- Raios de polaridades negativa e positiva

Um raio negativo é formado por diversas etapas. Ele inicia com fracas descargas na região de cargas negativas dentro da nuvem, em geral em torno de cinco quilômetros, que se deslocam em direção ao centro inferior de cargas positivas ao longo de um período de cerca de 10 ms denominado período de quebra de rigidez preliminar, mostrado na Figura 2.

Ao final do processo de quebra de rigidez, uma fraca descarga luminosa, geralmente não visível, fenômeno este denominado líder escalonado, se propaga para fora da nuvem em direção ao solo com uma velocidade em torno de 400.000 km/h ao longo de um canal de relâmpago. Por transportar cargas negativas, o líder escalonado é dito ser de polarização negativa.

**Figura 2 - Formação de raios entre nuvens**



Fonte: Faz Fácil (2011).

O líder escalonado segue um caminho tortuoso e em etapas, cada uma delas percorrendo de 30m a 100m e com duração em torno de um milionésimo de segundo ( $\mu$ s), em busca do caminho mais fácil para a formação do canal. Ao final de cada etapa, há uma pausa de cerca de 50 milésimos de segundo. A maior parte da luminosidade é produzida durante as etapas de um milésimo de segundo, praticamente não havendo luminosidade durante as pausas.

Ao todo, o líder escalonado transporta dez ou mais Coulomb de carga e aproxima-se do solo na média de 20 milésimos de segundos, dependendo da trajetória não uniforme de seu

caminho. A corrente média do líder escalonado é de algumas centenas de Ampère, com pulsos de ao menos um mil Ampère (kA), correspondentes a cada etapa. Geralmente o líder escalonado ramifica-se ao longo de vários caminhos, embora na grande maioria das vezes um só ramo atinja o solo. Quando o líder escalonado aproxima-se do solo a uma distância de algumas dezenas a pouco mais de uma centena de metros, as cargas elétricas no canal produzem um campo elétrico intenso entre a extremidade do líder e o solo, correspondente a um potencial elétrico da ordem de 100 milhões de volts. Este campo causa a quebra de rigidez do ar em um ou mais pontos no solo fazendo com que um ou mais líderes ascendentes positivos, denominados líderes conectantes, saiam do solo propagando-se de forma similar ao líder escalonado. As poucas medidas avaliadas da velocidade de líderes conectantes indicam valores similares a dos líderes escalonados. Em cerca de 30% dos casos, mais de um líder surge a partir de diferentes pontos no solo.

No instante que um líder conectante encontra o líder escalonado, as cargas armazenadas no canal do líder escalonado começam a mover-se em direção ao solo na forma de uma intensa descarga acompanhada de um forte clarão que se propaga para cima ao longo do canal com uma velocidade da ordem de 400.000.000 km/h, cerca de um terço da velocidade da luz, iluminando o canal e todas as ramificações.

A velocidade do clarão é máxima próxima do solo, diminuindo em até 50% próximo à base da nuvem. Esta descarga, denominada de descarga de retorno, dura cerca de 100 milésimos de segundo e produz a maioria da luz que vemos. As cargas depositadas no canal, bem como aquelas ao redor e no topo do canal movem-se para baixo, produzindo no ponto de contato do líder conectante com o solo (denominado base do canal) um pico de corrente médio em torno de 30 kA, com variações desde uns poucos milhares de Ampère até centenas de milhares de Ampère. Valores superiores a 200 kA correspondem a menos de 0,1% dos casos. Até o presente, os máximos valores de corrente de raios negativos já estimados com alguns registros no solo é de aproximadamente 280 kA.

Em geral, a corrente da descarga de retorno atinge seu pico em cerca de 10 ms e decai a metade deste valor em cerca de 100 ms, perdurando em média 200 a 400 ms. A corrente no início aumenta lentamente, correspondendo ao período que antecede ao encontro da descarga do líder conectante com o líder escalonado, passando então a aumentar mais rapidamente apresentando uma máxima variação pouco antes de atingir o pico máximo. Após atingir o pico, a corrente diminui de forma mais lenta indicando que menos carga é depositada nas regiões mais altas do canal durante o movimento descendente do líder escalonado. A carga

negativa média transferida ao solo durante uma descarga de retorno é ao redor de dez Coulomb.

Se após a descarga de retorno o raio terminar, ele é denominado um raio simples. Cerca de 20% dos raios negativos são simples, embora este valor possa variar grandemente de uma tempestade para outra. Na maioria dos casos, contudo, após uma pausa entre um e 500 ms, com valores médios em torno de 40 a 90 ms, uma nova descarga de retorno ocorre. Esta nova descarga é denominada descarga de retorno subsequente. Para que ela ocorra, entretanto, é necessário que outras cargas dentro da nuvem sejam transportadas para a região onde se iniciou o líder escalonado.

Quando as novas cargas transportadas dentro da nuvem atingem a região do canal formado pela primeira descarga de retorno, um novo fenômeno denominado líder contínuo, ocorre. Este líder irá abrir o caminho para a descarga de retorno subsequente. Diferentemente do líder escalonado, o líder contínuo propaga-se como um segmento de corrente com comprimento entre 10 e 100 m, ao longo do canal já ionizado pelo líder escalonado, de uma forma contínua e sem apresentar as ramificações típicas deste último. A duração do líder contínuo é em torno de um milésimo de segundo e a velocidade média é em geral bem maior do que a do líder escalonado, com valores em torno de 4.000.000 km/h, devido a já existência do canal. A corrente no canal é da ordem de um mil Ampère e a carga transportada em torno de um Coulomb.

Todavia, em muitos casos o líder contínuo pode desviar-se ao longo do trajeto seguindo um novo caminho, devido ao decaimento do canal inicial ou fortes ventos, passando a apresentar um comportamento similar a um líder escalonado. Isto ocorre principalmente quando o tempo após uma descarga de retorno é maior do que 100 ms.

Nestes casos, a velocidade do líder tende a ser menor e a nova descarga de retorno irá ocorrer a partir de um líder conectante proveniente de um ponto diferente no solo. Raios deste tipo são conhecidos como raios bifurcados. Evidências indicam que cerca de 30 a 50% dos raios negativos são bifurcados.

Em poucos casos, o líder contínuo pode subitamente interromper seu trajeto na atmosfera, não produzindo uma descarga de retorno subsequente. Assim que o líder contínuo aproxima-se alguns metros do solo, após cerca de 50 ms do início, surge novamente um líder conectante, neste caso de apenas alguns metros de extensão, e tem-se então a descarga de retorno subsequente onde a velocidade da descarga tende a ser levemente maior do que a



velocidade da primeira descarga de retorno. Os pulsos de radiação gerados pelo líder contínuo possuem máxima intensidade na faixa de frequências até 250 MHz (SHOENE et al., 2003).

Raios com diversas descargas de retorno subsequentes são denominados raios múltiplos. O pico de corrente das descargas de retorno subsequentes tende a ser menor do que a intensidade da primeira descarga de retorno, com valores típicos em torno de 10 kA. A corrente de descargas de retorno subsequentes tende também a atingir o pico mais rapidamente em torno de um ms, devido ao menor comprimento da descarga conectante e permanece por um período menor, em torno de 50 ms.

Os pulsos de radiação associados às descargas de retorno subsequentes, por sua vez, tendem a ser similar àquele da primeira descarga de retorno, apenas de menor intensidade. Em média, um raio negativo possui de 3 a 6 descargas de retorno, sendo que em cerca de 1% dos casos 6 ou mais descargas ocorrem.

Os raios de polaridade positiva seguem de um modo geral as mesmas etapas descritas para os de polaridade negativa, porém em geral, iniciam-se a partir de um líder com uma luminosidade mais fraca do que a de um líder escalonado de um raio negativo, que se propaga a partir de uma região de cargas positivas dentro da nuvem, não apresentando etapas e sim uma luminosidade contínua e com variações periódicas de intensidade. Na maior parte das vezes, costumam apresentar somente uma descarga de retorno, cuja intensidade média é levemente maior do que a dos raios de polaridade negativa. Na Figura 3 amostragem de descargas atmosféricas com três raios simultâneos, um deles bifurcado.

**Figura 3 - Descargas atmosféricas durante temporal.**



Fonte: Sitelco Rádio Comunicação (2011).

As descargas podem ser de nuvem para nuvem, nuvem para terra ou ainda terra para nuvem, dependendo da polaridade relativa do potencial elétrico entre essas formações. A terra é o ponto final do caminho das descargas deflagradas. No

mostra-se um resumo sucinto sobre descargas atmosféricas.

Os efeitos sobre quaisquer objetos, equipamentos, fauna e flora que se encontrarem na trajetória dessa descarga sofrerão as consequências resultantes da alta transferência energética, sob a forma de calor latente por queima, fusão e carbonização.

## **2.2 Modo de captar descargas elétricas**

O meio mais comum de captar uma descarga elétrica é o dispositivo denominado para-raios. O primeiro para-raios foi idealizado por Benjamin Franklin (1748), nos Estados Unidos da América do Norte.

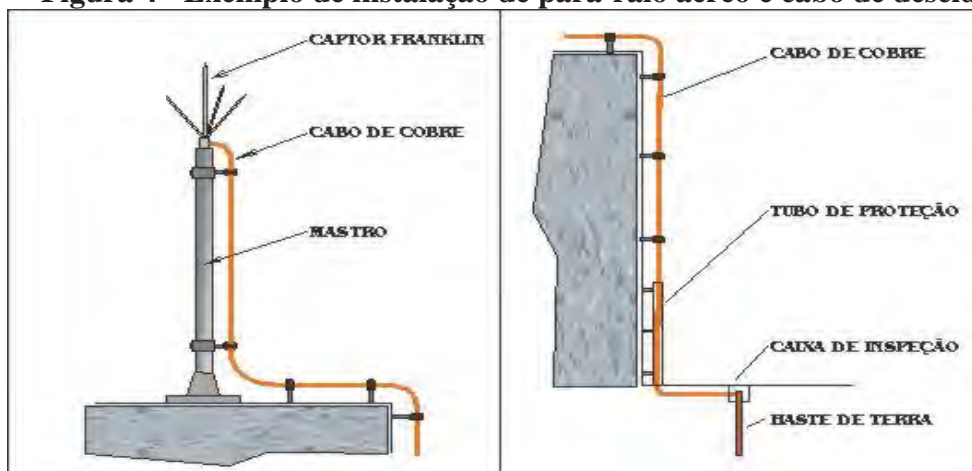
O sistema de para-raios era constituído por haste metálica de material bom condutor, uma estrutura de suporte para mantê-la acima do solo, o condutor também metálico denominado cabo de descida que conectado ao sistema de aterramento conduz a energia ao solo para neutralização.

Esse conjunto será eficiente dependendo da maneira da instalação da haste metálica, da capacidade de condução da energia através do cabo de descida e principalmente de como é construído o aterramento final, este último o contato físico direto com o solo.

Seu funcionamento pode ser explicado pelo fenômeno elétrico do poder das pontas que movimenta as cargas das nuvens para a terra drenando-as de maneira a evitar atingir o potencial de quebra da rigidez dielétrica do ar e evitar a formação da descarga atmosférica.

Se chegar a ocorrer descarga e atingir o para raios este deve estar construído com as características corretas de maneira a conduzi-la diretamente ao solo. Os para-raios podem ser instalados em telhados, postes, prédios e edifícios de grande altura com as descidas do cabo condutor com capacidade suficiente para condução da energia das descargas atmosféricas, exemplificado na Figura 4.

**Figura 4 - Exemplo de instalação de para-raio aéreo e cabo de descida**



Fonte: Wedtec Pára-raios (2011).

Define-se sistema de aterramento o conjunto resultante da combinação desde os captadores elevados, como para-raios de haste ou qualquer outro tipo, aos dispositivos instalados e interligados a um ponto comum no solo, de fácil acesso. Na Figura 5 mostram-se os tipos de acessórios mais comuns utilizados nas conexões entre os captadores, condutores e conectores que permitem a continuidade metálica da união para a terra.

**Figura 5 - Acessórios para sistemas de aterramento.**



Fonte: Firegas (2011).

- Aterramento é o meio físico dentro do solo terrestre empregado para facilitar o escoamento da energia oriunda das descargas elétricas captadas por equipamentos como os para-raios, instalados em postes, construções civis variadas, altos prédios e estruturas metálicas com alturas entre 10 e 100 m acima da superfície.

Desviada a energia para o solo evita-se probabilisticamente que os equipamentos conectados às redes de energia elétrica sejam afetados e danificados por estes fenômenos geradores de altas tensões elétricas, por ação direta ou indução eletromagnética.

Normalmente os materiais bons condutores de eletricidade como o cobre, ferro, zinco e praticamente todos os metais, são empregados para fazer a ligação ao solo na forma de hastes ou cabos enterrados, dotados de características específicas que permite drenar os fluxos de energia presentes nos fenômenos naturais.

As hastes de aterramento são elementos metálicos em contato direto com a crosta terrestre que drenam a energia diretamente a esta. Interligam os pontos de recebimento das descargas impulsivas. São enterradas profundamente no solo em posição vertical. Podem variar em profundidades de 2 a 10m, fabricadas em aço com película de cobre envolvente com espessura da ordem de 15 a 20  $\mu\text{m}$ , e o espaçamento médio entre as mesmas esta em torno de 10 metros. Haste e conexão esta exemplificado na

Figura 6.

**Figura 6 - Haste de aterramento e cabo de ligação.**

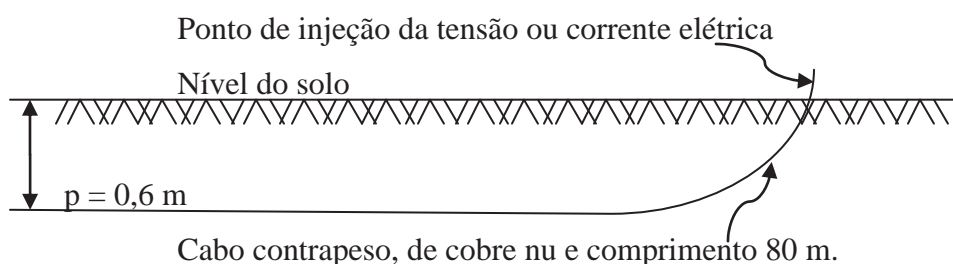


Fonte: Firegas (2011).

Na Figura 7, um fio de cobre sem isolamento, de comprimento  $l$  e diâmetro  $a_0$ , é enterrado a uma profundidade  $p$ . A configuração usada é uma simplificação aproximada e o comprimento  $l$  deve ser menor ou igual a 10 % do maior comprimento de onda das frequências envolvidas (CELLI; PILO, 2003, p. 1650). Valores típicos são  $a_0 = 35 \text{ mm}^2$ ,  $l = 80 \text{ m}$  e  $p = 0,6 \text{ m}$ .

Quando utilizado em linhas de transmissão, costuma-se compará-lo ao cabo contrapeso também metálico sem isolamento, enterrado e compactado no solo. Utilizaremos a denominação de cabo contrapeso por ser mais conhecida, constado na referência acima.

**Figura 7 - Representação do cabo contrapeso.**



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Nessa configuração o elemento condutor é instalado na horizontal a pouca profundidade, aterrado com a máxima compactação possível, e o ponto de injeção das correntes é uma das extremidades que afloram no terreno, local onde será conectado aos cabos dos captadores da energia elétrica em transito, no caso mais comum, das descargas atmosféricas. Os cabos empregados neste tipo de aterramento normalmente são cabos encontrados no comercio de materiais elétricos (CONDUSPAR, 2011).

A combinação dos itens anteriores empregados nas montagens de diversas formações geométricas recebe o nome de malhas de aterramento. Pode-se ter uma formação em grade resultante de vários cabos contrapesos dispostos horizontalmente e interligados tendo hastes verticais nos vértices das malhas formadas, nas suas periferias ou nos pontos centrais.

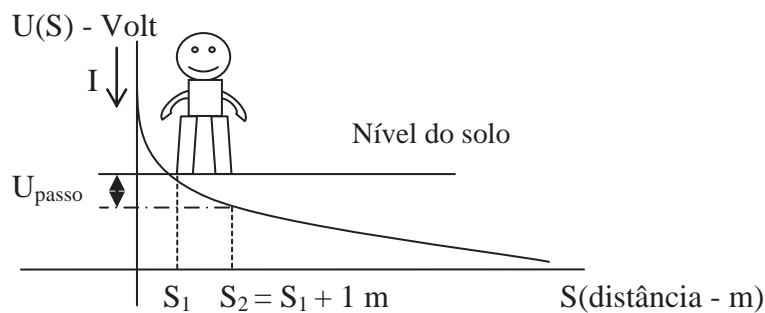
### 2.3 Fatores relacionados entre eletricidade e seres vivos

Outra condição importante que será utilizada na simulação é a segurança pessoal, consideração fundamental no projeto de sistemas de aterramento, pois o mesmo deverá atuar de forma a assegurar que pessoas não sejam submetidas a tensões elétricas fatais quando estiverem nas proximidades de locais onde existirem equipamentos aterrados. Ou ainda caminhar sobre a superfície do solo onde esteja instalado um cabo contrapeso pertencente a algum sistema elétrico em suas proximidades, tanto em condições normais de operação quanto na ocorrência de descargas, curto-circuito ou outras anomalias que envolvam o aterramento pertinente.

Na prática, isso tem sido solucionado por meio da especificação de diferenças de potencial máximas admissíveis, as quais uma pessoa ou qualquer ser vivo possa ser submetido, denominadas máxima diferença de potencial de passo e máxima diferença de potencial de toque. Nos itens subsequentes esclarece-se a respeito destas duas importantes condições enfatizando mais o lado do ser humano não descartando que os efeitos também afetam os demais seres vivos levado em consideração suas características e dimensões físicas na devida proporção.

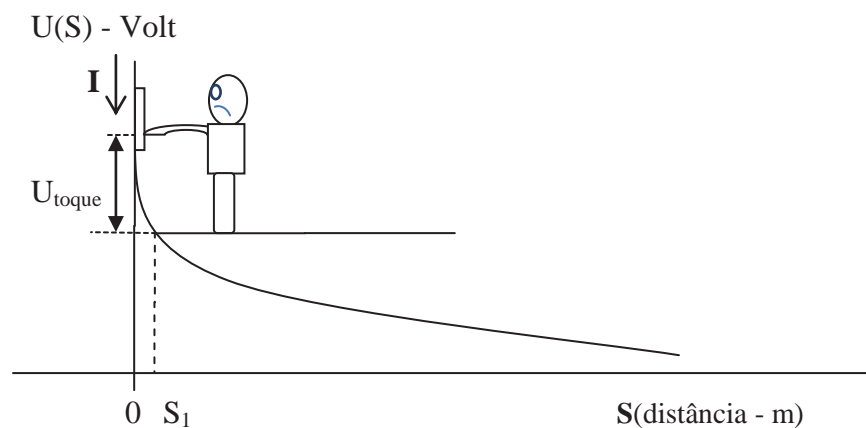
Denomina-se diferença de potencial de passo ao valor da tensão elétrica entre dois pontos na superfície do solo tocados pelos pés de uma pessoa que caminha no interior da área sobre o sistema de aterramento, sem que a mesma faça contato com qualquer outro objeto aterrado, exemplificado na Figura 8. O parâmetro  $I$  é a corrente que chega ao sistema de aterramento e a curva estabelece a relação entre a tensão no solo e a distância de afastamento do ponto de injeção dos sinais elétricos.

**Figura 8 - Diferença de potencial elétrico de passo.**



Fonte: Telebrás (1995).

**Figura 9 - Diferença de potencial elétrico de toque.**



Fonte: Telebrás (1995).



Diferença de potencial elétrico transferido é o caso da tensão de toque em área distante do local onde o sistema de aterramento encontra-se instalado.

#### 2.4 Máxima corrente elétrica permissível pelo corpo humano

Na frequência industrial (50 – 60 Hz) é o valor no qual mesmo associando-se baixas magnitudes de corrente o corpo humano é muito vulnerável à magnitude e a duração da corrente conduzida através do mesmo. Deve ser menor do que aquelas que acarretam fibrilação ventricular, considerada esta como a consequência mais perigosa.

Conforme estudos (DALZIEL, 2010, p. 739-744) e, utilizado na faixa de duração entre 0,03 a 3,0s, a máxima corrente permissível, para que não ocorra fibrilação ventricular é dada pela

Equação 1:

$$I_{\max} = \frac{k}{\sqrt{t}} \text{ Ampère.} \quad (1)$$

O valor de  $t$  é o tempo de duração física do choque e o coeficiente  $k$  igual a 0,116 e 0,157 para pessoas com 50 e 70 kg de massa, respectivamente.

Cumprir comentar que, a equação anterior é discutida por alguns autores, principalmente para valores de  $t$  menores que o ciclo cardíaco da ordem de 0,8s. Além disso, para valores elevados de  $t$  superiores em alguns segundos, indica-se usar como valor máximo permissível a corrente de tetanização muscular, sensivelmente inferior ao limiar de fibrilação ventricular da ordem de 10 mA.

- Máximas diferença de potencial de passo e de toque

Quando da injeção de corrente em ponto determinado ponto do solo, a diferença de potencial entre outros dois pontos na superfície do mesmo, situados às distâncias radiais  $S_1$  e  $S_2$  do ponto de injeção de corrente é dada pela Equação 2:  $U_{S_1,S_2} \propto \left( \frac{1}{S_1} - \frac{1}{S_2} \right)$ , (2)

onde  $\alpha$  é uma constante de proporcionalidade.

Para fins práticos, os pés de um indivíduo quando caminha, são considerados afastados de 1 metro um do outro, mostrado no resumo no Quadro 1.

**Quadro 1 - Diferenças de Potenciais no solo.**

<b>Distâncias S1 e S2</b>	<b>Significado da Diferença de Potencial <math>U_{S1,S2}</math></b>
S1 – S2 = 1 m	$U_{\text{passo}}$ - diferença de potencial de passo
S1 ou S2 em torno de 1 m	$U_{\text{toque}}$ - diferença de potencial de toque em S1 ou S2

Fonte: Dalziel (2010).

As diferenças de potencial de passo e de toque são calculadas conhecendo-se o circuito elétrico representativo da circulação da corrente no indivíduo para cada caso.

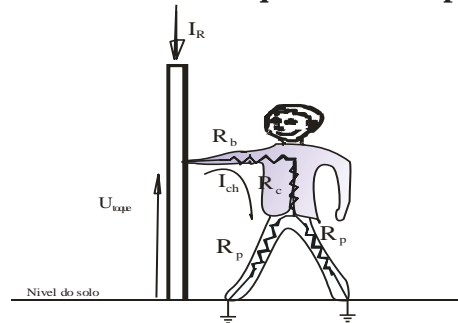
Em princípio, devem ser consideradas as seguintes resistências:

- Resistência das luvas ( $R_L$ );
- Resistência de contato ao objeto com potencia ( $R_{co}$ );
- Resistência equivalente do corpo humano entre o ponto de contato e os pés ( $R_{ch}$ );
- Resistência equivalente dos sapatos e meias ( $R_{sm}$ );
- Resistência de contato dos pés com o solo ( $R_{ps}$ ).
- Resistência equivalente do corpo humano (pernas) - ( $R_p$ ).

No entanto, é frequente desprezar  $R_{co}$ , que é pequeno quando comparado com  $R_{ch}$  e  $R_{cp}$ , e desprezar  $R_L$  e  $R_{sm}$ , o que de certa forma corresponde a incorporar os valores respectivos, em termos estatísticos, num critério em que se considerem valores típicos mínimos de  $R_{ch}$ , no sentido de um valor com elevada probabilidade de ser excedido, para efeito de cálculo de segurança de pessoas principalmente. Nessas condições, têm-se nas Figuras 9 e 10, os circuitos elétricos representativos quando um indivíduo é submetido às diferenças de potencial de passo e de toque.

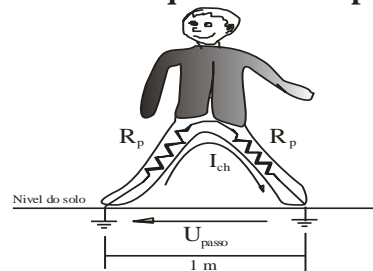


**Figura 10 - Circuito elétrico equivalente do potencial de toque.**



Fonte: Telebrás (1995).

**Figura 11 - Circuito elétrico equivalente do potencial de passo.**



Fonte: Telebrás (1995).

As grandezas indicadas nas figuras 10 e 11, significam:

$I$  – corrente injetada no solo através do sistema de aterramento cujo valor da resistência de aterramento é  $R_{as}$ . Eletricamente essa corrente dependerá das resistências  $R_{Tch}$  e da resultante da combinação entre  $R_p$  e  $R_m$ .

$U_{toque}$  – diferença de potencial de toque medido em Volt;

$U_{passo}$  – diferença de potencial de passo, medido em Volt,;

$I_{ch}$  – corrente que circulará pelo corpo do indivíduo, sujeito às condições do local.

Estas considerações aplicam-se à simulação das tensões que podem ser induzidas no cabo contrapeso do sistema de aterramento.

## 2.5 Conclusão sobre as origens das descargas atmosféricas

Neste capítulo foi explicado a origem e como as descargas atmosféricas são formadas e descarregadas. Também foram abordadas as condições de segurança em relação à vida, nas formas de contatos mais comuns e suas consequências.

Enfatizou-se a necessidade de sistemas de aterramento para promover a drenagem das energias violentas contidas nas descargas e como neutraliza-las eficientemente.

## CAPÍTULO III

---

### 3 O ESTADO DA ARTE DOS MODELOS MATEMATICOS APLICADOS NOS SISTEMAS DE ATERRAMENTO

Com a evolução dos equipamentos e programas de computação na década de 80, sua aplicação nos trabalhos e problemas relacionados à engenharia cresceu vertiginosamente, pelo que a modelagem do comportamento transitório dos sistemas de aterramento sob a ação de descargas atmosféricas, evolui face às razões seguintes:

- Os métodos analíticos e empíricos sofriam simplificações excessivas para chegar-se a uma solução aceitável;
- os sistemas de aterramentos permitiram modelagens mais simples devido faixas de memória amplas e velocidades computacionais disponibilizadas;
- Problemas envolvendo análise de aterramentos podem ser avaliados utilizando abordagens analíticas e numéricas. Onde a aplicação de uma solução analítica é de análise e desenvolvimento, como ocorre em sistemas de malhas de terra, a utilização de métodos numéricos torna-se uma alternativa poderosa. Boa parte dos métodos numéricos de análise e modelagem de sistemas de aterramento resolve numericamente as Equações de Maxwell, sujeitas a certas determinações e condições de contorno. Também são classificadas em duas categorias:
  - Base com modelos de equações diferenciais;
  - Base com modelos de equações integrais.

Tanto do ponto de vista numérico quanto das técnicas analíticas, estas podem ser aplicadas para a solução de problemas no domínio do tempo ou no domínio da frequência. Técnicas de modelagem no domínio tempo são mais apropriadas para a solução de problemas envolvendo várias frequências. Dependendo da complexidade do problema em estudo, o tempo de processamento computacional poderá ser elevado.

Metodologias baseadas no Domínio da Frequência possui melhor eficiência quando aplicado a soluções de problemas envolvendo poucas frequências, como é o caso da corrente elétrica comercial (50 ou 60 Hz). Diversas metodologias foram desenvolvidas e aperfeiçoadas ao longo dos últimos anos. Exemplos são o Método dos Momentos, o Método dos Elementos Finitos, o Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo e a modelagem por Linhas de

Transmissão, considerados como as principais empregadas para a solução de problemas de compatibilidade eletromagnética.

As aplicações dos métodos analíticos e numéricos utilizados na modelagem e análise de transitórios em sistemas de aterramentos, baixas ou altas frequências, resume-se em:

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

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

Descreve-se o estudo das abordagens, métodos e procedimentos aplicáveis na análise dos problemas envolvendo eletricidade, empregados e utilizados na maioria dos sistemas elétricos em uso, do ponto de vista da modelagem analítica e na sequência a modelagem numérica.

### **3.1 Modelagem analítica**

#### **3.1.1 Modelagem por circuitos elétricos**

Utilizado para modelar o comportamento de sistemas de aterramento que normalmente apresentam uma geometria complexa. Os principais passos aplicados podem ser assim divididos:

- Decompõe-se o sistema em vários segmentos finitos;
- Elabora-se um modelo de cada segmento e validam-se os parâmetros, indutâncias próprias, mútuas, capacitâncias, condutâncias e resistências próprias;
- Resolve-se as equações aplicando as leis de Ohm e Kirchoff.

As indutâncias (L), capacitâncias (C), condutâncias (G) e resistências (R) permitem agregar o efeito da frequência para cada parâmetro específico. Representa-se cada segmento na forma de circuitos elétricos.

Pesquisadores (MELIOPOULOS, 1983; RAMAMOORTY et al., 1989) também publicaram trabalhos utilizando a metodologia dos circuitos elétricos incluindo ainda o fenômeno da ionização. A modelagem por circuitos é compreendida se o comportamento transitório do sistema de aterramento simulado empregar a solução por circuitos equivalentes.

A ionização não linear do solo pode ser incorporada ao modelo tendo como inconveniente não prever o atraso de propagação dos impulsos.

### ***3.1.2 Modelagem por campos eletromagnéticos***

Esta modelagem é capaz de representar fenômenos transitórios como as descargas atmosféricas com elevada precisão cuja referência esta estritamente baseada nos princípios do eletromagnetismo. É o mais rigoroso para modelar o comportamento transitório em sistemas de aterramento empregando a resolução das Equações de Maxwell com mínimas aproximações. Pode ser implementado usando o método dos elementos finitos (Finity Element Method - FEM) ou método dos momentos (Moment Method - MoM) que será apresentado em tópico seguinte. Não é um método simples devido à complexidade na programação. Além disso, por ser baseado em uma solução no domínio da frequência (FD), incluir-se a não linearidade devido à ionização do solo torna-se trabalhoso.

Este método permite transformar as condições de contorno aberta do ar e do solo em contornos fechados, de modo a reduzir a complexidade do problema em análise. Um importante fato quando da utilização do método dos elementos finitos é a flexibilidade de discretizar-se a geometria do meio, permitindo a inclusão dos efeitos da ionização do solo. Para a solução do sistema de equações no caso de transitórios o tempo de simulação cresce demasiado com o numero de frequências.

### ***3.1.3 Modelagem híbrida***

Este método resulta da combinação da modelagem por circuitos elétricos e eletromagnéticos. Sua vantagem é ser mais precisa quando a fonte de excitação possui valores elevados conferida pelo modelo eletromagnético.

### 3.1.4 Modelagem por linhas de transmissão de energia elétrica

Método que emprega a teoria de linhas de transmissão de energia elétrica tratando os condutores interconectados do sistema de aterramento utilizando as “Equações do Telegrafista” resolvidas diretamente. A modelagem por linhas de transmissão pode ser usada para analisar o comportamento transitório do aterramento no domínio da frequência (FD). Nesta modelagem é possível incluir o efeito do acoplamento mútuo entre eletrodos e pode prever o atraso de propagação da onda impulsiva. O tempo computacional empregado é menor que o requerido para o modelo eletromagnético. O **Quadro 2** apresenta alguns critérios importantes relacionados aos modelos analíticos apresentados na análise transitória de sistemas de aterramento, utilizado como base para determinar o modelo a ser utilizado no presente estudo.

**Quadro 2 - Comparação dos principais modelos analíticos.**

<b>Modelo</b>	<b>Expressão matemática</b>	<b>Compreensão</b>	<b>Precisão</b>	<b>Procedimento de solução</b>	<b>Desempenho computacional</b>
<b>Circuitos elétricos</b>	Complicado	Difícil	Mais preciso	Complicado	Grande
<b>Eletromagnético</b>	Simples	Fácil	Preciso	Simples	Pequena
<b>Híbrido</b>	Complicado	Difícil	Preciso	Complicado	Grande
<b>Linhas de transmissão</b>	O mais simples	Fácil	Preciso	Simples	Pequena

Fonte: Gazzana et al. (2010).

Entende-se como desempenho computacional a relação custo e benefício na utilização de equipamentos e unidades periféricas de sistema de computadores bem como o tempo de utilização envolvido no processamento dos dados.

## 3.2 Modelagem numérica

A utilização de métodos numéricos para análise e modelagem torna-se uma alternativa poderosa. Boa parte dos métodos numéricos aplicados à modelagem de sistemas de aterramento resolve numericamente as Equações de Maxwell, sujeitas a certas condições de contorno e também classificadas nas categorias de equações diferenciais e integrais.

Essa modelagem pode ser aplicada para a solução de problemas no domínio do tempo ou no domínio da frequência. Técnicas no domínio do tempo são mais apropriadas para a solução de problemas envolvendo várias frequências. Dependendo da complexidade do problema em estudo, o tempo de processamento computacional poderá ser elevado.

Metodologias baseadas no domínio da frequência possuem melhor eficiência quando aplicadas a soluções de problemas envolvendo pequeno número de frequências, como é o caso da corrente elétrica comercial (50 ou 60 Hz).

Diversas metodologias foram desenvolvidas e aperfeiçoadas ao longo dos últimos anos. Exemplos são o método dos momentos, o método dos elementos finitos, o método das diferenças finitas no domínio do tempo e o método da modelagem por linhas de transmissão, considerados como as principais técnicas empregadas para a solução de problemas de compatibilidade eletromagnética.

Descreve-se resumido as aplicações dos métodos numéricos utilizados na modelagem e análise de transitórios em aterramentos nas baixas e altas frequências.

### ***3.2.1 Método das diferenças finitas no domínio do tempo***

Este método é amplamente utilizado no domínio do tempo, baseado em discretizar as equações de Maxwell diretamente no espaço e no tempo. Emprega conceitos e condições de contorno na solução dessas equações para que o método seja numericamente estável. Aplicado na análise da resposta de sistemas de aterramento sujeito a descargas atmosféricas considerando a geometria das malhas de aterramento irregulares, meios não lineares e com perdas.

O método considera a malha composta por células retangulares onde cada aresta é associada a um campo elétrico. Pode empregar materiais diferentes para cada aresta da malha conferindo ao método propriedade de anisotropia na análise do conjunto solo e eletrodo. Como método iterativo, os valores dos campos elétrico e magnético são calculados na unidade de tempo, a cada passo incrementado. Utiliza-se a transformada inversa de Fourier para reverter do domínio da frequência para o domínio do tempo, incluído os parâmetros de dispersão.

Por ser um método explícito onde todo o domínio computacional é discretizado faz-se desnecessário resolver um conjunto de equações lineares. É matematicamente menos denso e

mais intuitivo que outros métodos numéricos, como o método dos momentos. A dificuldade maior é encontrada quando envolve valores para campos distantes.

### 3.2.2 *Método dos momentos (MoM)*

O método dos momentos é uma técnica no domínio da frequência (FD) onde uma equação integral é obtida com emprego de funções matemáticas específicas por redução de um sistema de equações lineares, incluindo as de Maxwell.

O método também tem desenvolvimentos onde são adaptadas as considerações envolvendo a interface solo com o ar. No caso de estruturas compostas por hastes e cabos contrapeso, aplica-se a aproximação por fios finos onde são levados em consideração o cálculo da corrente elétrica ao longo do eletrodo de aterramento. No caso de altas frequências, presentes na fase de transitórios, há que se considerar o tamanho do elemento para um máximo de 10% do comprimento de onda da máxima frequência envolvida. O procedimento para a programação do método dos momentos pode ser desenvolvida nos quatro passos seguintes:

- Derivação da equação integral apropriada;
- Discretiza-se a equação integral em uma matriz de equações usando bases ou funções de expansão e funções de ponderação;
- Estimar os elementos da matriz;
- Resolução da matriz de equações e obtenção dos parâmetros de interesse.

Não é o melhor método para utilização com aterramentos de malhas de construções complexas. O tempo de processamento e necessidade de grande área de memória computacional aumenta demasiado se o número de segmentos for elevado.

### 3.2.3 *Método dos elementos finitos no domínio do tempo*

Consiste de uma técnica no domínio da frequência para solucionar equações diferenciais parciais. Foi concebido originalmente na análise estrutural e posteriormente utilizado na solução de problemas de eletromagnetismo. Leva em consideração o formato geométrico dos aterramentos, condições de contorno, suas correntes de excitação e o potencial elétrico no ponto de injeção do impulso. A análise com o método dos elementos finitos resume-se nos passos:

- Discretiza-se a região de solução em sub-regiões ou elementos tipicamente triangulares e tetraédricos;
- Obtenção das equações de campo nas superfícies de cada elemento em termos dos coeficientes não conhecidos nos nós entre as arestas dos elementos ou na superfície dos elementos utilizando polinômios;
- Junção de todos os elementos na região de solução utilizando matriz de equações;
- E finalmente, solucionar o sistema de equações obtido.

O método é complexo quando utilizado em análise de descargas atmosféricas onde o número de frequências e harmônicos são elevados, necessitando assim elevado tempo computacional. Ocorre ainda que as condições de contorno podem extrapolar nas tarefas de precisão dos cálculos, devido à exigência de uma região muito grande além das malhas ou elementos do sistema de aterramento, truncando assim o domínio da solução.

### ***3.2.4 Método numérico da modelagem por linhas de transmissão de energia elétrica (TLM)***

Este método, também denominado de método das matrizes de linhas de transmissão de energia elétrica é um método diferencial possível que permite implementações no domínio do tempo e no domínio da frequência. As soluções das equações de Maxwell são realizadas por analogia com a teoria das linhas de transmissão de energia elétrica.

Em presença de campos eletromagnéticos oriundos de transitórios, as correntes e tensões que se propagam ao longo de uma estrutura de aterramento, baseiam-se em que cada ponto da frente de onda produz ondas secundárias espalhando-se em todas as direções, análogo ao comportamento ondulatório de ondas luminosas explicadas pelo Princípio de Huygens (HUYGENS, 2007).

O Método permite trabalhar com estruturas tridimensionais de geometria complexa, materiais com propriedades não lineares e não homogêneos e perdas dispersivas em meios anisotrópicos como no solo atuando de modo similar a um dielétrico, nos sistemas de aterramento.

Envolve a técnica de divisão da região de solução em um conjunto de linhas de transmissão de tal forma que através de algoritmos pode-se resumir como:

- Determinação das tensões incidentes em cada segmento considerado 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 dos cálculos;
- Determinação das novas tensões incidentes para a iteração.

Dentre as vantagens do método por linhas de transmissão podemos dizer que os cálculos de correntes, tensões, campo elétrico e magnético podem ser efetuados simultaneamente em uma mesma simulação. A formulação das versões em duas e três dimensões é relativamente simples bem como para os casos de materiais não lineares e não homogêneos justificados pelas facilidades de programação.

Entre os métodos numéricos o método por linhas de transmissão mostra ser a técnica mais promissora para avaliar transitórios em sistemas de aterramento. A facilidade de programação conjugada a não necessidade de aprofundados conhecimentos matemáticos juntamente com a teoria eletromagnética são os atrativos para seu uso. O **Quadro 3** mostra comparação entre os diversos métodos numéricos utilizados na análise de transitórios em sistemas de aterramentos elétricos.

**Quadro 3 - Comparação dos diferentes modelos com métodos numéricos.**

<b>Modelo</b>	<b>Expressão matemática</b>	<b>Compreensão</b>	<b>Precisão</b>	<b>Procedimento</b>	<b>Desempenho computacional</b>
<b>FDTD</b>	Simple	Fácil	Preciso	Simple	Pequena
<b>MoM</b>	Complicado	Difícil	Preciso	Complicado	Muito grande
<b>FEM</b>	Complicado	Difícil	Preciso	Complicado	Muito grande
<b>TLM</b>	O mais simples	Fácil	Preciso	Simple	Grande

Fonte: Gazzana et al. (2010).

### 3.3 Conclusão sobre os métodos e modelos relacionados

Neste capítulo foi resumido o estado da arte dos diversos métodos e modelagens do ponto de vista analítico e numérico, comparando suas vantagens e desvantagens, facilidade de uso, eficiência e aplicação. Dentre os métodos apresentados optou-se pela modelagem por linhas de transmissão de energia elétrica com bom desempenho computacional, simples e preciso.

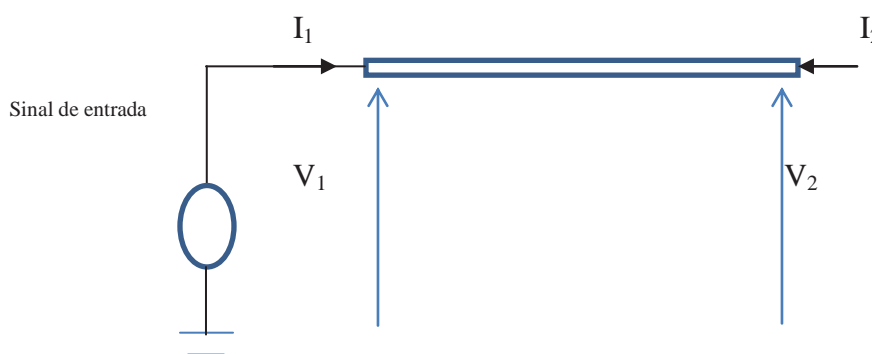
## CAPÍTULO IV

### 4 CABO CONTRAPESO ANALISADO PELO METODO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO

Dentre os métodos relatados, será empregada a modelagem por linhas de transmissão nos seus conceitos básicos no caso de um eletrodo horizontal enterrado. Suponha, como na Figura 12, que um eletrodo metálico seja representado através de um circuito composto de um gerador de tensão, ou um gerador de corrente elétrica ou uma descarga atmosférica, conectado diretamente nesse eletrodo pertencente a determinado conjunto de aterramento.

Aos familiarizados com as “equações do telegrafista” utilizadas para analisar as distribuições das tensões e correntes ao longo de uma linha aérea de transmissão de energia elétrica, não será difícil estender este conceito aplicando-o ao condutor enterrado, substituindo sua condutância dispersiva pela resistência equivalente de aterramento recíproca, distribuída ao longo do mesmo. Cabe-nos determinar então os valores numéricos da resistência equivalente, por exemplo, do sistema de aterramento para utilizá-los no cálculo dos parâmetros que serão aplicados na representação por circuitos  $\pi$  em cascata.

**Figura 12 - Representação básica de um eletrodo enterrado.**



Fonte: Elaboração do próprio autor.

#### 4.1 Parâmetros elétricos

Tratando-se de eletricidade nas formas normais e mais comuns de utilização faz-se necessário a definição das grandezas utilizadas nos circuitos teóricos e elaborar cálculos para definir valores condizentes com os resultados arbitrados e também compará-los a outros já conhecidos. Dentre as grandezas elétricas declina-se nos itens subsequentes as principais que serão empregadas.

#### **4.1.1 Resistência elétrica equivalente do sistema de aterramento**

É o valor medido em Ohms, como um fator limitador à passagem da corrente elétrica aos elementos metálicos que conduzem energia diretamente ao solo terrestre. A resistência total para efeito de cálculos e simulações compõe-se da resistência dos condutores metálicos em série com a resistência aparente determinada em função da resistividade do solo onde os cabos e eletrodos estão enterrados.

#### **4.1.2 Resistividade elétrica do solo**

É a medida da capacidade que o solo tem na condução da corrente elétrica por tratar-se de um meio não totalmente metálico, decorrente da composição por vários materiais de diferentes valores de resistividade. Sua grandeza é o Ohm vezes metro (Ohm.m).

Atenção especial deve ser considerada em relação à resistividade elétrica do solo. É a principal grandeza de onde resulta a condutância (G), a resistência aparente do solo (R), capacitância entre eletrodos considerados cabo e solo (C) e o efeito indutivo entre cabo e solo (L). Estas grandezas estão declinadas no Apêndice A e a resistividade elétrica será o principal parâmetro utilizado neste estudo de simulação do comportamento de um cabo contrapeso comparado a uma linha de transmissão com final em aberto, representada por circuitos em cascata de  $\pi$ .

O Método mais comum utilizado para determinar a resistividade do solo é o Método de Wenner, (TELEBRAS, 1995, p. 10-12), onde pode-se extrair as equações empregadas nos cálculos da resistividade do solo (Ohm.m) e sua resistência final equivalente de aterramento em Ohm. Nesse método inicialmente procede-se à análise do solo onde será instalado o sistema de aterramento, e de posse dos dados e suas características elétricas, calcula-se a resistividade elétrica e em função desta a resistência de aterramento equivalente do mesmo. Essa resistência equivalente pode ser comparada a uma carga resistiva instalada como receptora em um circuito elétrico.

#### **4.1.3 Modo de cálculo da resistividade elétrica do solo**

A equação 3, avalia a resistividade do solo pelo Método de Wenner (TELEBRAS, 1995, p. 10).

$$\rho_a = \rho_1 \left\{ 1 + 4 \sum_{i=1}^{\infty} \left[ \frac{k^i}{\sqrt{(1+2ip/a)^2}} - \frac{k^i}{\sqrt{(4+(2ip/a))}} \right] \right\} \quad (3)$$

No Quadro 4 mostra-se a variação da resistividade em função do tipo de solo.

**Quadro 4 - Resistividade do solo em função do tipo de formação.**

TIPO DE SOLO	RESISTIVIDADE ( $\Omega \cdot m$ )
Lama	5 a 100
Humus	10 a 150
Limo	20 a 100
Argila com 40% de umidade	80
Argila com 20% de umidade	330
Terra de jardim com 50% de umidade	140
Terra de jardim com 20% de umidade	480
Argila seca	1500 a 5000
Calcário fissurado	500 a 100
Calcário compacto	100 a 5000
Granito	1500 a 10000
Areia com 90% de umidade	1300
Areia seca	3000 a 8000
Basalto	10000 a 20000

Fonte : Salari Filho, Santos e Nascimento, 2000.

#### 4.1.4 Resistência aparente de aterramento do cabo contrapeso com efeito do solo

Com o valor da resistividade do solo obtida da equação (3) e aplicando a equação 4 (TELEBRAS, 1995, p. 11) resulta a resistência elétrica aparente do cabo contrapeso (R).

$$R = \frac{\rho_a}{\pi l_c} \left\{ \ln \left[ \frac{2l_c}{\sqrt{a_0 \cdot p}} \right] - 1 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{\infty} k^i \left[ \ln \left( \frac{1 + \sqrt{(2ih/l_c)^2 + 1}}{(2ih/l_c)} \right) + 8 \cdot \frac{ih}{l_c} \cdot 4 \sqrt{\left( \frac{2ih}{l_c} \right)^2 + 1} \right] \right\} \quad (4)$$

As variáveis e significado nas equações estão resumidos no Apêndice A. Serão utilizadas e melhor entendidas com os dados intrínsecos para obtenção dos valores numéricos nos cálculos da condutividade e resistência aparente do solo.

#### 4.1.5 Condutância elétrica

É o recíproco da resistividade elétrica. A unidade derivada do SI de condutância é o Siemens (símbolo S, igual a  $\Omega^{-1}$ ). Oliver Heaviside criou esse termo em Setembro de 1885. Condutância elétrica não deve ser confundida com condutividade elétrica que é uma característica específica de um material e recíproca da resistividade elétrica.

O valor da condutância elétrica pode variar de 0,1Siemens a infinito porem na prática situa-se entre 10 e 500 Siemens.m<sup>-1</sup> A condutância G que é a componente real da admitância está relacionada com a susceptância B, sua componente imaginária, e a admitância, Y, pela equação:

$$Y = G + jB \text{ onde:} \quad (5)$$

Y é a admitância, medida em Siemens;

G é a condutância, medida em Siemens;

B é a susceptância medida em Siemens.

O módulo da admitância é dado pela expressão (6) e sua fase pela expressão (7).

$$Y = \sqrt{G^2 + B^2} \quad (6)$$

$$\Theta = \text{tg}^{-1} \left( \frac{B}{G} \right) \quad (7)$$

Sabe-se que a impedância pode ser obtida pela relação na expressão abaixo e tem como unidade o Ohm, cujo simbolo é  $\Omega$ .

$$Z = 1/Y. \quad (8)$$

## 4.2 Identificação dos parâmetros do cabo nu enterrado ou cabo contrapeso simples

Pode-se identificar um eletrodo metálico enterrado através dos seus parâmetros comprimento físico ( $\ell$ ), resistência própria do cabo( $r$ ), indutância (L), condutância (G) e a capacitância (C). Esses parâmetros dependem do diâmetro ( $a_0$ ) do condutor enterrado, da resistividade intrínseca do eletrodo ( $\rho_{cu}$ ), da condutividade elétrica do solo ( $\sigma_{solo}$ ) e da profundidade no solo ( $p$ ) (CELLI; PILO, 2003, p. 1651).

São definidos alguns valores para efetuar-se o cálculo dos demais, sendo:

$\ell$  = comprimento físico do cabo contrapeso;

$r$  = resistência do condutor metálico rígido nu;

$a_0$  = diâmetro do condutor;

$\rho_{\text{solo}}$  = resistividade do solo;

$\sigma_{\text{solo}}$  = condutividade do solo;

$p$  = profundidade do cabo contrapeso em relação ao nível do solo;

$$G = \frac{\pi \cdot \ell}{\rho_{\text{solo}} \left[ \ln \left( \frac{2 \cdot \ell}{\sqrt{2 \cdot a_0 \cdot p}} \right) - 1 \right]}, \text{ condutância entre cabo e solo;} \quad (9)$$

$$L_s = \sigma_{\text{solo}} \frac{\ell^2}{\epsilon_0 c_0^2 G}, \text{ indutância entre cabo e o solo;} \quad (10)$$

$L_c$  = indutância própria do cabo metálico;

$$C = \frac{\epsilon \cdot G}{\sigma_{\text{solo}}}, \text{ capacitância entre o cabo e o solo;} \quad (11)$$

No cálculo da resistência do aterramento utiliza-se a fórmula clássica:

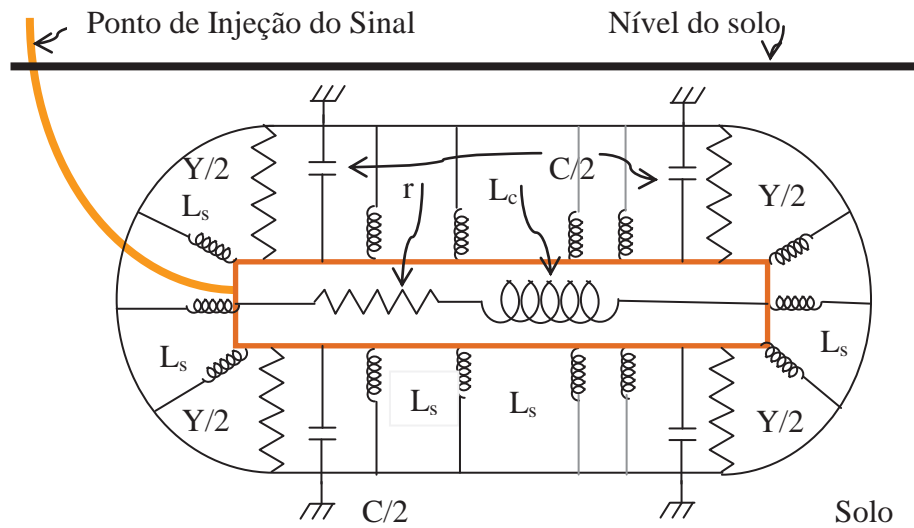
$$R = \left[ \left( \frac{\rho_{\text{cu}}}{2\pi\ell} \right) \cdot \ln \left( \frac{2 \cdot \ell}{a_0} \right) \right] \cdot \ell ; \quad (12)$$

$Y$  = admitância entre cabo e solo.

A constante  $\epsilon_0$  é a permissividade do espaço livre,  $\epsilon$  a permissividade do solo relacionada por  $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ , onde  $\epsilon_r$  é a permissividade relativa do mesmo, e  $c_0$  a velocidade da luz no vácuo. As equações listadas permitem calcular a resistência de aterramento, considerando o contato do eletrodo com o solo e a resistividade do mesmo.

Os cálculos dos valores para utilização na cascata de  $\pi$  foram realizados através do programa “Calc\_Parametros\_Cabo\_Contrapeso” na plataforma Matlab. Representa-se esse eletrodo horizontal enterrado através de uma célula  $\pi$ , por seu circuito elétrico e os parâmetros distribuídos como esquematizado na Figura 13.

**Figura 13- Representação da célula  $\pi$  do cabo contrapeso.**



Fonte: Elaboração do próprio autor.

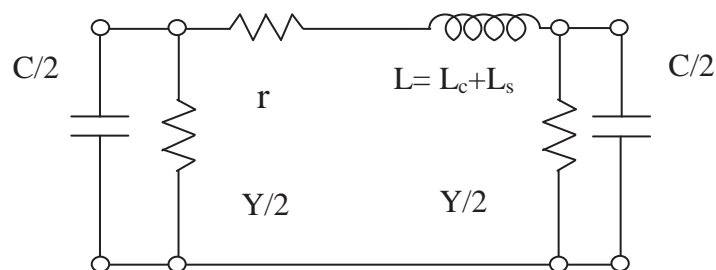
Esta representação dos elementos equivalentes de resistência, condutância e indutância decorrem da interação entre a superfície do condutor de cobre nu e o solo envolvente do mesmo ao longo deste.

O cabo contrapeso, por tratar-se de um sistema tridimensional, será representado por linha de transmissão de energia elétrica como na Figura 14 por circuito  $\pi$  único utilizando os parâmetros concentrados nas extremidades e no centro.

Neste estudo empregou-se a representação do cabo contrapeso como uma linha de transmissão com final em aberto composta por células  $\pi$  com os parâmetros concentrados resultantes da Figura 13.

Mostra-se na Figura 14 a representação da célula  $\pi$  empregada no desenvolvimento matemático (CHARANTOLA, 2007, p. 39-65).

**Figura 14 - Circuito  $\pi$  equivalente da célula unitária do cabo contrapeso.**



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os parâmetros são respectivamente (C) a capacitância, (G) a condutância, (r) a resistência própria do eletrodo e (L) sua indutância resultante da própria do cabo ( $L_c$ ) e a calculada em função da indução magnética pelo fluxo concatenado entre o cabo e o solo envolvente ( $L_s$ ), geradas pela corrente no cabo, validados através das formulas (9) a (12) inclusive.

### 4.3 Exemplo numérico dos parâmetros de um cabo contrapeso

Segue o procedimento de cálculos dos parâmetros através de exemplo numérico implementado na plataforma Matlab.

Seja um condutor de cobre nu com  $\ell = 80\text{m}$  de comprimento, solo com resistividade  $\rho_{\text{solo}} = 390 \text{ Ohm.m}$ , condutividade do solo  $\sigma_{\text{solo}} = 3,34 \text{ S/m}$  e diâmetro do condutor  $a_0 = 0,005 \text{ m}$ .

Calculada a Condutância G, utilizando a formula (9) e o programa Calc\_Parametros\_Cabo\_Contrapeso, resulta o valor de  $G = 11,7458 \text{ Siemens}$ .

Através das equações (9) a (12) inseridas no programa desenvolvido e citado, obtém-se os seguintes parâmetros:

$$G = 11,7458 \text{ S};$$

$$L = 0,0348 \text{ H} = 34,8 \text{ mH};$$

$$C = 6,2987 \text{ e}^{-11} = 0,63 \text{ pF};$$

$$R = 0,0415 \text{ Ohm} = 41,50 \text{ m}\Omega;$$

$$r = 39,30 \text{ m}\Omega \text{ resistência própria do cabo.}$$

Estes são os parâmetros típicos para emprego na representação do cabo contrapeso como um circuito ou célula  $\pi$ .

As respostas a transitórios no caso de eletrodos horizontais são frequentemente referenciadas à impedância de impulso, definida como a relação entre a tensão e a corrente no ponto de injeção. Em nosso caso a impedância de aplicação de ondas elétricas de tensão ou corrente elétrica será o circuito representado pela entrada equivalente do circuito  $\pi$ .

Modelos baseados em circuitos têm sido tratados por divisão do eletrodo de aterramento, no caso o cabo contrapeso, em segmentos menores de mesmo comprimento  $\ell$ , respeitando a condição de eletricamente pequeno ou no mínimo menor que dez por cento do comprimento de onda da maior frequência de interesse, e, o raio do eletrodo seja muito menor que seu comprimento físico, (CECCONI, MATRANGA, RAGUSA, 2005, p. 1728).



Apresenta-se no **Quadro 5**, o resumo de dados obtidos para um cabo contrapeso em comparação com uma malha de aterramento, geralmente esta última nada mais sendo que o resultado da combinação de cabos contrapesos e hastes interligadas.

O programa implementado em Matlab utilizará a representação do cabo por cascata de circuitos  $\pi$  e resolução das equações de estado pelo método numérico de integração trapezoidal (SILVA et al., [200?]).

**Quadro 5 - Parâmetros de sistemas de aterramento.**

Parâmetros elétricos	Eletrodo Horizontal Cabo de 80 m	Malha aterramento
$\rho_{\text{solo}}$ - Resistividade do solo	391 $\Omega$	1.300 $\Omega$
L - Indutância do cabo-solo	0,30 $\mu\text{H}$	0,47 $\mu\text{H}$
C - Capacitância cabo-solo	23,27 pF	25,00 pF
r - Resistência própria do cabo	39,30 m $\Omega$	39,30 m $\Omega$
R - Resistência aparente entre cabo e solo	11,00 $\mu\Omega$	$\ll 27,00 \mu\Omega$

Fonte: Cecconi, Matranga e Ragusa (2005, p. 1728).

De posse dos dados, foi ajustado o programa em Matlab onde o principal parâmetro é a resistividade elétrica do solo, visto que as demais grandezas lhe são dependentes, excetuando-se a resistência intrínseca do cabo contrapeso. Em função da resistividade do solo calculam-se as demais grandezas (R, L, C e G) que serão utilizadas no programa “Simula\_cascata\_de\_PI\_contrapeso” e os resultados comparados aos da linha de transmissão de energia elétrica terminada em aberto.

#### 4.4 Tipos de sinais elétricos aplicáveis no circuito da cascata de $\pi$ .

Nos eletrodos longos em posição horizontal, aplica-se no seu ponto inicial uma tensão elétrica ou corrente elétrica definidas por funções como mostradas abaixo:

$$V_1(t) = k * V_0 * t \text{ para } 0 < t \leq t_0 \text{ com } V_0 = 20 \text{ kV e}$$

$$V_1(t) = 0 \text{ para } t > t_0, \text{ sendo } k \text{ uma constante de proporcionalidade.} \quad (13)$$

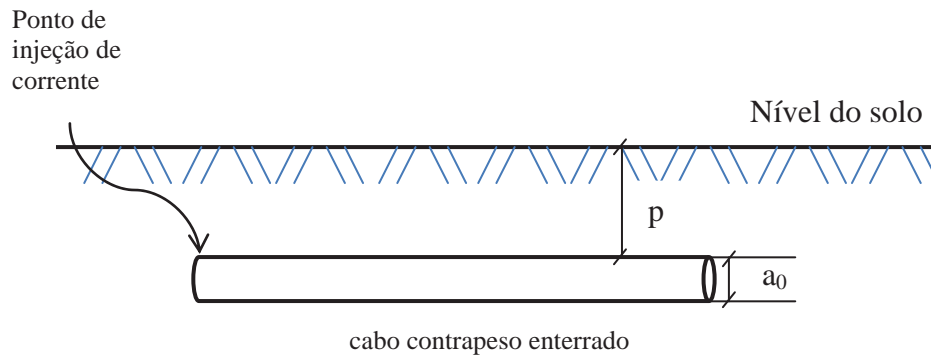
Ou ainda utilizar o tipo de duas exponenciais, por fontes de correntes elétricas como:

$$I_2(t) = 36,5 ( e^{-6000000t} - e^{-60000t} ) \text{ kA, em cabos simples e ou}$$

$$I_3(t) = 10,0 ( e^{-5040000t} - e^{-14300t} ) \text{ kA.} \quad (14)$$

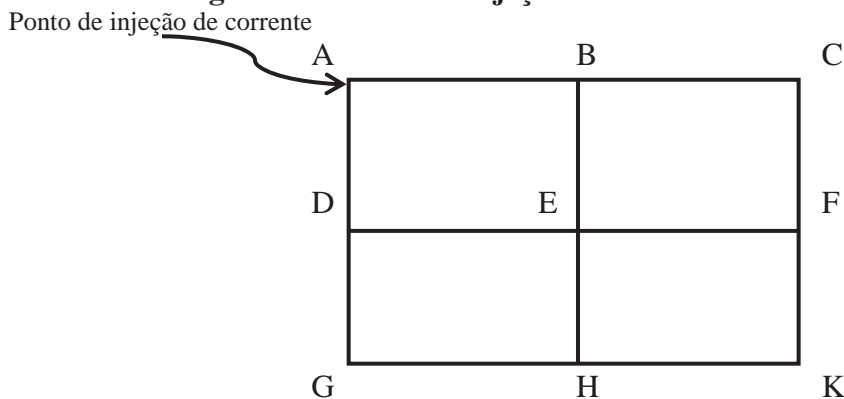
O modo de aplicação dos sinais de injeção no sistema de aterramento está mostrado nas figuras 15 e 16 seguintes.

**Figura 15 - Modo de injeção de sinal no cabo contrapeso.**



Fonte: Cecconi, Matranga e Ragusa (2005, p. 1728).

**Figura 16 - Modo de injeção de sinal em malha de aterramento.**



Fonte: Cecconi, Matranga e Ragusa (2005, p. 1728).

No caso de malhas, como mostrado na figura acima, os pontos de injeção das descargas podem ser qualquer dos cantos ou interconexões internas, E ou H por exemplo.

Nas configurações mostradas convém que as uniões entre o cabo de descida dos captadores de descargas sejam executadas com soldagens especiais do tipo de fusão por reação química ou outra fonte geradora de temperaturas elevadas. Recomenda-se o uso de cabos e hastes de cobre de boa pureza. As hastes e cabos de aço cobreados não são muito indicados para essas soldagens devido à espessura muito fina da parte melhor condutora e no processo de soldagem pode ser desintegrada, reduzindo a condutibilidade final do sistema.

Nas ligações com hastes de aço cobreadas o modo mais utilizado é por conexões de pressão mecânica com conectores aparafusados ou por cizalhamento mecânico empregando cunhas metálicas impulsionadas por tiros a ar comprimido ou disparos de pólvora.

#### **4.5 Conclusão sobre os parâmetros calculados para o cabo contrapeso em circuitos $\pi$ .**

Neste capítulo foram definidos os principais parâmetros do cabo contrapeso de uso comum em sistemas de aterramento, sua representação como um circuito de configuração  $\pi$ , partindo de sua formação real com os parâmetros distribuídos ao longo do mesmo para parâmetros concentrados no começo, meio e no fim da célula básica.

Esta configuração será empregada na ligação dos circuitos em cascata de  $\pi$  emulados por programa desenvolvido no matlab para fins da análise dos resultados decorrentes da aplicação de sinais de tensão e corrente elétrica.

## CAPÍTULO V

---

### 5 CIRCUITOS EM CASCATA DE $\pi$

Dentre os fenômenos de transporte efetivo da energia elétrica através do campo eletromagnético, as linhas de transmissão físicas constituídas de elementos metálicos isolados e suportados por estruturas de sustentação sem contato direto com o solo, é o meio mais comum amplamente empregado. Tais campos eletromagnéticos estão praticamente ligados à superfície dos condutores por terem frequências muito baixas, comprimentos de onda longos, e não podem irradiar energia ao nível de utilização prática.

Em frequências acima de 250 kHz consegue-se irradiar na atmosfera energias facilmente sintonizáveis e captáveis.

Representa-se a linha de transmissão monofásica por equações diferenciais (CHARANTOLA, 2007, p. 14) conhecidas como equações de ondas cujas soluções são ondas que podem viajar ao longo da mesma em determinada velocidade. Alguns autores batizam-nas como equações de ondas viajantes ou progressivas, muitas vezes referenciadas como equações do telegrafista, mostradas nas equações (15) e (16).

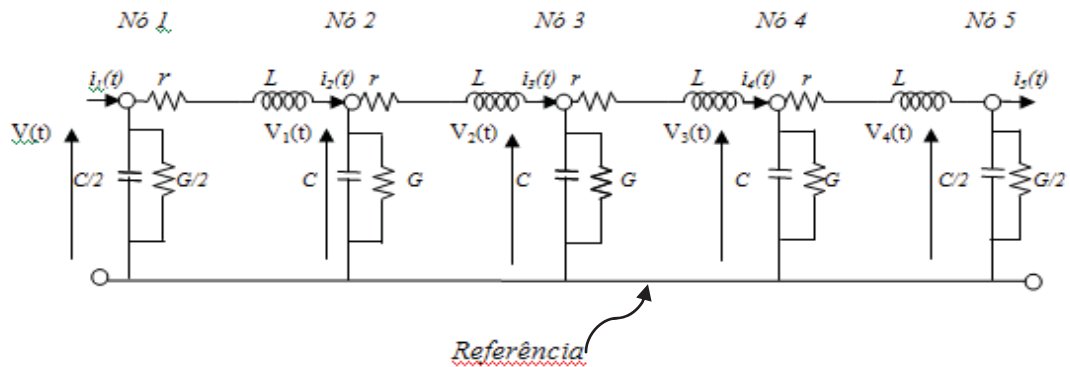
$$\frac{\partial^2 V(x,t)}{\partial x^2} = R \cdot G V(x,t) + (R \cdot C + L \cdot G) \frac{\partial V(x,t)}{\partial t} + L \cdot C \frac{\partial^2 V(x,t)}{\partial t^2} \quad (15)$$

$$\frac{\partial^2 I(x,t)}{\partial x^2} = R \cdot G I(x,t) + (R \cdot C + L \cdot G) \frac{\partial I(x,t)}{\partial t} + L \cdot C \frac{\partial^2 I(x,t)}{\partial t^2} \quad (16)$$

Aplicam-se estas equações, reservadas as condições de contorno, na simulação do cabo contrapeso representado pelas células  $\pi$  no diagrama da Figura 17, no domínio do tempo.

Os circuitos em cascata são interligados de maneira que o sinal de saída do primeiro seja conectado diretamente à entrada do segundo e sequencialmente até o último, elucidado no resumo do Apêndice B.

**Figura 17 - Circuitos  $\pi$  em cascata.**



Fonte: Elaboração do próprio autor.

## 5.2 Equações dos circuitos $\pi$ em cascata

No circuito da Figura 17, formada por quatro circuitos  $\pi$ , um em sequência ao outro, representando o circuito elétrico do cabo contrapeso segmentado. A aplicação das Leis de Ohm e Kirchoff no circuito acima representado, resulta o conjunto de equações diferenciais de primeira ordem no domínio do tempo. No mesmo circuito a referência indicada é o potencial elétrico considerado nulo do solo (SILVA et al, 2010, p. 1).

A teoria da aplicação das leis elétricas em circuitos está inicialmente condicionada a uma explanação com quatro células  $\pi$  básicas e depois generalizada para um numero arbitrário entre cinco e quinhentos destas ressaltando que na ultima célula a terminação permanecerá sem corrente saindo do enésimo nó, exceto nas condutâncias e capacitâncias próprias do final, característica esta de uma linha em aberto.

Para o nó 1

$$i_1(t) = \frac{G}{2} V_o(t) + \frac{C}{2} \frac{d}{dt} V_o(t)$$

Dividindo a expressão (5.3) por  $2/C$  e rearranjando tem-se:

$$\frac{d}{dt} V_o(t) = - \frac{G}{C} V_o(t) + \frac{2}{C} i_1(t) \quad (17)$$

Na malha 1-2

$$V_o(t) - r i_1(t) - L \frac{d}{dt} i_1(t) - V_1(t) = 0 \quad (18)$$

Dividindo (5.4) por  $L$ , e rearranjando toda a expressão:

$$\frac{d}{dt}i_1(t) = -\frac{r}{L}i_1(t) + \frac{1}{L}V_0(t) - \frac{1}{L}V_1(t) \quad (19)$$

Nó 2:

$$i_1(t) - i_2(t) = GV_1(t) + C \frac{d}{dt}V_1(t)$$

Dividindo a expressão por C e rearranjando tem-se:

$$\frac{d}{dt}V_1(t) = -\frac{G}{C}V_1(t) + \frac{1}{C}i_1(t) - \frac{1}{C}i_2(t), \text{ e}$$

$$V_1(t) - r i_2(t) - L \frac{d}{dt}i_2(t) - V_2(t) = 0 \quad (20)$$

Dividindo a expressão anterior por L e reagrupando, tem-se:

$$\frac{d}{dt}i_2(t) = -\frac{r}{L}i_2(t) + \frac{1}{L}V_1(t) - \frac{1}{L}V_2(t). \quad (21)$$

Nó 3 :

$$i_2(t) - i_3(t) = G V_2(t) + C \frac{d}{dt}V_2(t)$$

Dividindo a expressão por C e rearranjando tem-se:

$$\frac{d}{dt}V_2(t) = -\frac{G}{C}V_2(t) + \frac{1}{C}i_2(t) - \frac{1}{C}i_3(t) \quad (22)$$

$$V_2(t) - r i_3(t) - L \frac{d}{dt}i_3(t) - V_3(t) = 0,$$

Dividindo a expressão anterior por L e reagrupando, tem-se:

$$\frac{d}{dt}i_3(t) = -\frac{r}{L}i_3(t) + \frac{1}{L}V_2(t) - \frac{1}{L}V_3(t). \quad (23)$$

Nó 4 :

$$i_3(t) - i_4(t) = G V_3(t) + C \frac{d}{dt}V_3(t)$$

Dividindo a expressão por C e rearranjando tem-se:

$$\frac{d}{dt}V_3(t) = -\frac{G}{C}V_3(t) + \frac{1}{C}i_3(t) - \frac{1}{C}i_4(t) \quad (24)$$

$$V_3(t) - r i_4(t) - L \frac{d}{dt}i_4(t) - V_4(t) = 0,$$

Dividindo a expressão anterior por  $L$  e reagrupando, tem-se:

$$\frac{d}{dt} i_4(t) = -\frac{r}{L} i_4(t) + \frac{1}{L} V_3(t) - \frac{1}{L} V_4(t) \quad (25)$$

Nó 5:

$$i_4(t) - i_5(t) = \frac{G}{2} V_4(t) + \frac{C}{2} \frac{d}{dt} V_4(t)$$

$$\frac{d}{dt} V_4(t) = -\frac{G}{2C} V_4(t) + \frac{2}{C} i_4(t) \quad (26)$$

$$V_4(t) - r i_4(t) - L \frac{d}{dt} i_4(t) - V_4(t) = 0$$

Dividindo a expressão anterior por  $L$  e reagrupando, tem-se:

$$\frac{d}{dt} i_4(t) = -\frac{r}{L} i_4(t) - \frac{1}{L} V_4(t) - \frac{1}{L} V_4(t). \quad (27)$$

### 5.3 Montagem da matriz das equações diferenciais

A equação de estados representativa é dada por:

$$\left[ \frac{d}{dt} X \right] = [A] \cdot [X] + [B] \cdot V_o(t), \quad (28)$$

onde  $[X]$  é o vetor com as variáveis de estado enquanto  $[A]$  e  $[B]$  representam matrizes quadrada e coluna de estados respectivamente, do circuito mostrado na Figura 17. A função  $V_o(t)$  é o sinal de excitação na entrada do primeiro  $\pi$  no circuito.

Transcrevendo ordenadamente as expressões obtidas anteriormente, resultam os conjuntos de equações (29) e (30)

$$\frac{d}{dt} i_1(t) = -\frac{r}{L} i_1(t) - \frac{1}{L} V_1(t) + \frac{1}{L} V_0(t)$$

$$\frac{d}{dt} i_2(t) = -\frac{r}{L} i_2(t) - \frac{1}{L} V_2(t) + \frac{1}{L} V_1(t),$$

$$\frac{d}{dt} i_3(t) = -\frac{r}{L} i_3(t) - \frac{1}{L} V_3(t) + \frac{1}{L} V_2(t),$$

$$\frac{d}{dt} i_4(t) = -\frac{r}{L} i_4(t) - \frac{1}{L} V_4(t) + \frac{1}{L} V_3(t) \quad (29)$$

$$\begin{aligned}
\frac{d}{dt} V_1(t) &= -\frac{G}{c} V_1(t) + \frac{1}{c} i_1(t) - \frac{1}{c} i_2(t) \\
\frac{d}{dt} V_2(t) &= -\frac{G}{c} V_2(t) + \frac{1}{c} i_2(t) - \frac{1}{c} i_3(t) \\
\frac{d}{dt} V_3(t) &= -\frac{G}{c} V_3(t) + \frac{1}{c} i_3(t) - \frac{1}{c} i_4(t) \\
\frac{d}{dt} V_4(t) &= -\frac{G}{c} V_4(t) + \frac{2}{c} i_4(t) - \frac{2}{c} i_5(t).
\end{aligned} \tag{30}$$

Estruturalmente o sistema com as equações diferenciais pode ser expresso na forma abaixo onde  $\frac{d}{dt} i_n(t)$  é a derivada de  $i_n(t)$  e  $[A]$  é a matriz das impedâncias escrita na condição da linha em aberto no final ( $i_5(t) = 0$ ), representado na forma geral das equações seguintes:

$$\frac{d}{dt} i_n(t) = k_1 I_n(t) + k_1' V_n(t) + k_1'' V_{n-1}(t) \text{ e} \tag{31}$$

$$\frac{d}{dt} V_n(t) = k_2 V_n(t) + k_2' i_n(t) + k_2'' i_{n+1}(t), \text{ onde } k_j, k_j' \text{ e } k_j'' \text{ são coeficientes numéricos.} \tag{32}$$

### 5.3.1 Matriz dos coeficientes para as equações diferenciais.

$$\begin{bmatrix} \frac{d}{dt} i_1(t) \\ \frac{d}{dt} i_2(t) \\ \frac{d}{dt} i_3(t) \\ \frac{d}{dt} i_4(t) \\ \frac{d}{dt} V_1(t) \\ \frac{d}{dt} V_2(t) \\ \frac{d}{dt} V_3(t) \\ \frac{d}{dt} V_4(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r}{L} & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{r}{L} & 0 & 0 & \frac{1}{L} & -\frac{1}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{r}{L} & 0 & 0 & \frac{1}{L} & -\frac{1}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{r}{L} & 0 & 0 & \frac{1}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{c} & -\frac{1}{c} & 0 & 0 & -\frac{G}{c} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{c} & -\frac{1}{c} & 0 & 0 & -\frac{G}{c} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{c} & -\frac{1}{c} & 0 & 0 & -\frac{G}{c} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{2}{c} & 0 & 0 & 0 & -\frac{G}{c} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_1(t) \\ i_2(t) \\ i_3(t) \\ i_4(t) \\ V_1(t) \\ V_2(t) \\ V_3(t) \\ V_4(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} * V_o(t) \tag{33}$$

No sistema matricial representado, trataremos o cabo contrapeso empregado em aterramentos, representado como uma linha de transmissão em aberto, terminada pela capacitância  $C$  e pela condutância  $G$ , calculadas por (9) a (12).



A resolução das equações mostradas na forma matricial fornece os valores de tensões e correntes nos terminais de cada segmento do cabo no domínio do tempo, (SILVA et al., 2010, p. 1-6).

Utilizado o programa na plataforma Matlab para resolver este sistema de equações e utilizando os parâmetros relacionados em quadro do próximo capítulo, procede-se a uma primeira simulação.

### **5.3 Conclusão sobre equações analíticas do método TLM ajustadas com o matlab**

Neste capítulo foi apresentada a teoria de circuitos elétricos para o método de linhas de transmissão de energia elétrica por um sistema de equações diferenciais de primeira ordem representativo do circuito em cascata de  $\pi$  que serão resolvidas numericamente por programa matlab implementado.

A matriz dos coeficientes é montada a partir das equações obtidas das leis de Ohm e Kirchoff, básicas por nós de corrente e malhas de tensão elétrica. Adotamos como referencial básico nos programas o valor de cem células em todos os programas e simulações realizadas.

## CAPITULO VI

### 6 RESULTADOS GRÁFICOS DA SIMULAÇÃO DO CABO CONTRAPESO

Considerando os dados resumidos no **Quadro 6** logo abaixo, para um cabo de 80 m, diâmetro 0,5 cm, admitindo que a capacitância entre o cabo e o solo seja da ordem de nF, a resistência terminal do cabo própria  $r$  adicionada à resistência aparente dependente da resistividade do solo, como parâmetros de processamento.

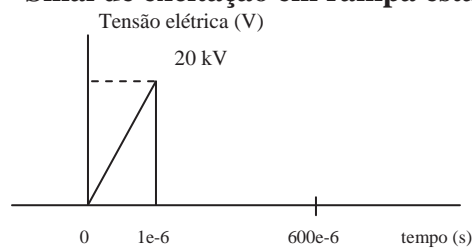
Inicialmente com os dados do **Quadro 5** elaborou-se o teste do programa “Simula\_cascata\_pi\_I” aplicando o sinal de excitação elétrica da **Figura 19** resultou, nas **Figuras 20 e 21**, os gráficos que são resultados conhecidos (CHARANTOLA, 2007, p. 79-82).

**Quadro 6 - Parâmetros de referencia da linha de transmissão elétrica**

Parâmetro	Valor
<b>L</b>	1,000 mH / km
<b>G</b>	5,560 $\mu$ S / km
<b>C</b>	11,110 nF / km
<b>r</b>	0,055 $\Omega$ / km

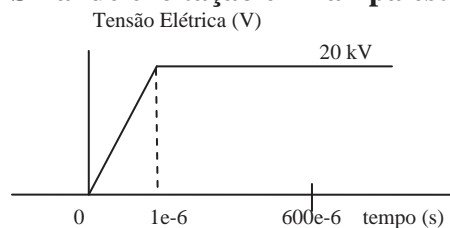
Fonte: Charantola (2007, p.79-82)

**Figura 18 - Sinal de excitação em rampa estabilizada em 0 kV**



Fonte: Elaboração do próprio autor.

**Figura 19 - Sinal de excitação em rampa estabilizada em 20 kV**



Fonte: Elaboração do próprio autor.

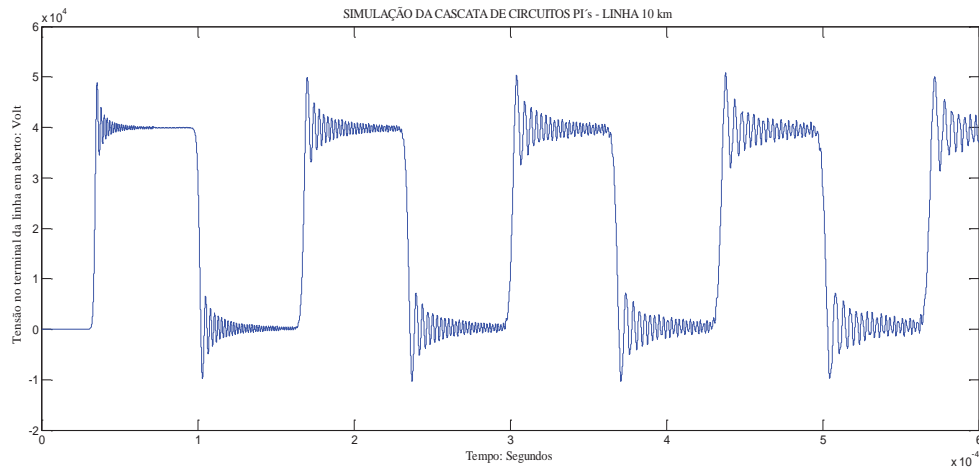
## 6.2 Figuras da simulação gráfica de uma linha de transmissão de energia elétrica.

Empregado o programa “\_Calcula\_R\_L\_C\_G” em Matlab, implementado no programa “Simula\_cascata\_pi\_I”, parametrizado na resistividade do solo, resultou os gráficos numerados sequencialmente.

Nas Figuras 20 e 21 apresentam-se os gráficos das respostas ao sinal de tensão elétrica mostrado na Figura 19.

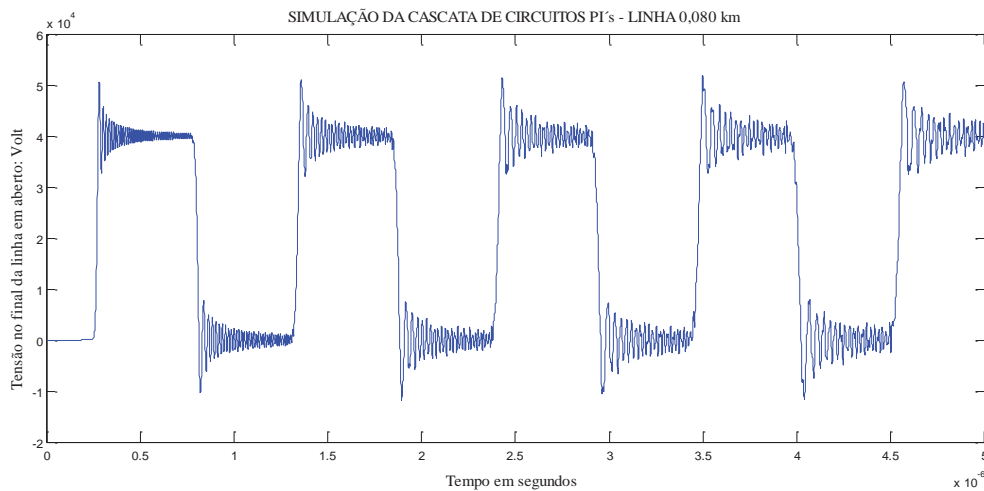
No Apêndice C tem-se o resumo do encadeamento dos programas implementados em Matlab utilizados para os cálculos dos parâmetros e das figuras contendo os gráficos dos resultados.

**Figura 20 - Tensão elétrica no final da linha elétrica em aberto – 10 km**



Fonte: Elaboração do próprio autor.

**Figura 21 - Tensão elétrica no final da linha elétrica em aberto – 0,080 km.**



Fonte: Elaboração do próprio autor.

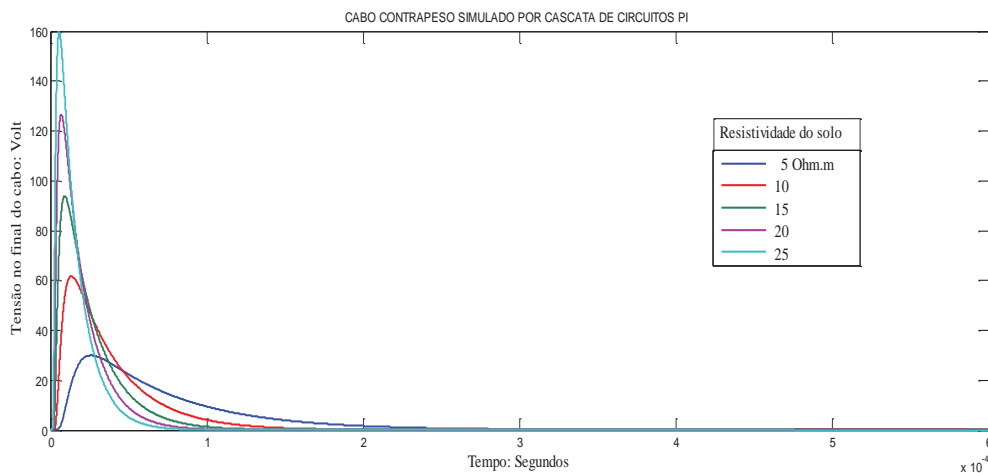
Como o gráfico apresentado na Figura 21, devido ao comprimento de 80 m relativamente muito pequeno comparado ao gráfico da Figura 20 obtido para o comprimento de dez quilômetros, expandiu-se a escala dos tempos para melhor visualizar o formato da tensão elétrica resultante no final do terminal da linha de transmissão, em aberto.

As formas de ondas apresentadas nas Figuras 20 e 21 têm formatos semelhantes, exceto pelo valor da grandeza no eixo representativo do tempo.

Aplicando-se os mesmos sinais de excitação no cabo contrapeso com o parâmetro resistividade variando, as figuras seguintes mostram os gráficos da tensão no final mesmo.

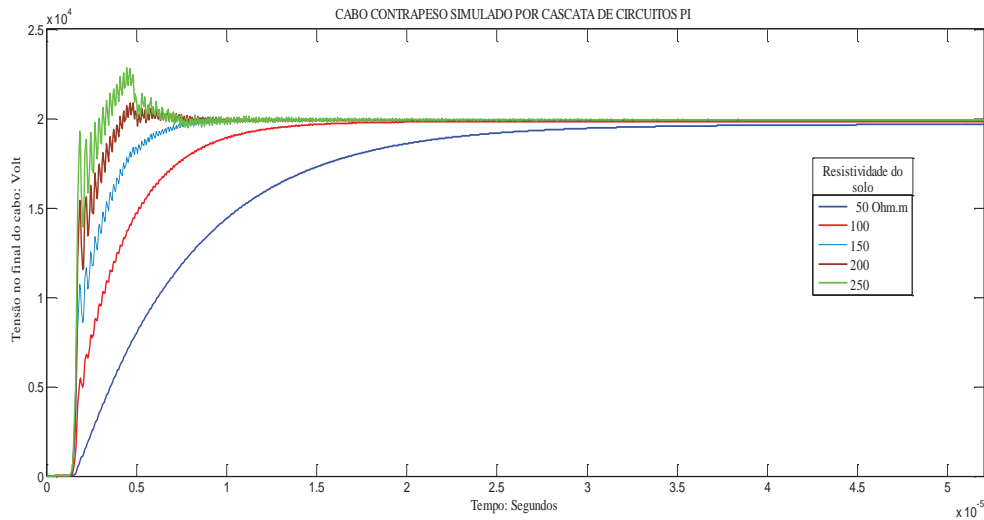
Na Figura 23 a resposta é proveniente da aplicação do sinal mostrado na Figura 18. Os gráficos apresentados na Figura 24 a Figura 27 mostram os resultados de aplicação do sinal da Figura 19.

**Figura 22 - Tensão elétrica no final do cabo contrapeso em função da resistividade do solo.**



Fonte: Elaboração do próprio autor.

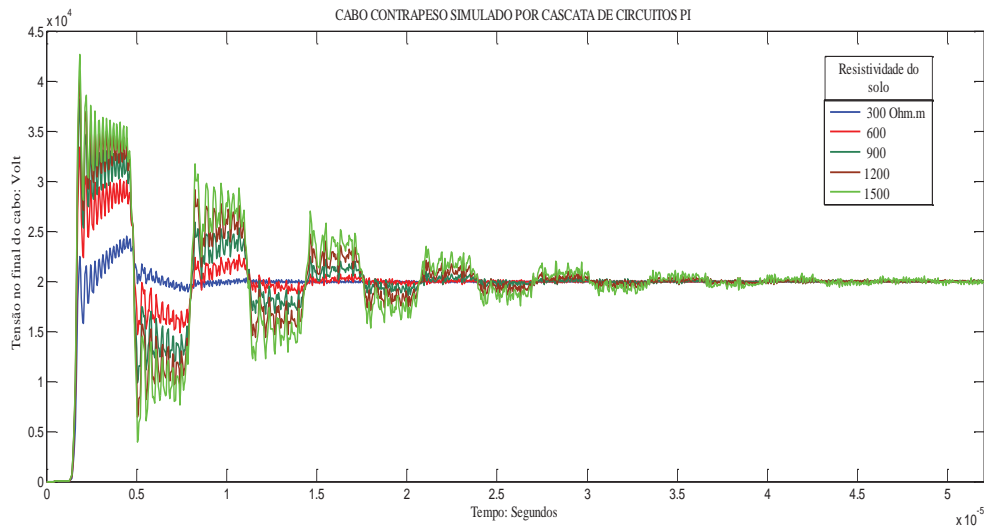
**Figura 23 - Tensão elétrica no final do cabo contrapeso em função da resistividade do solo.**



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os demais gráficos seguintes é o resultado da aplicação dos sinais de excitação por tensão elétrica parametrizado na variação da resistividade do solo.

**Figura 24 - Tensão elétrica no final do cabo contrapeso em função da resistividade do solo.**



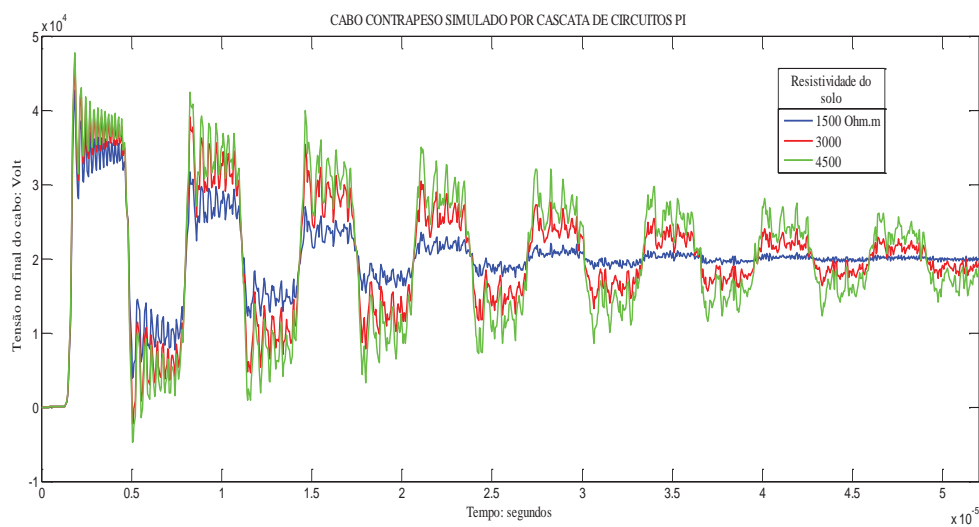
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Mostra-se no gráfico da Figura 24 e Figura 25 a situação para resistividade do solo entre 300 e 1500 Ohm.m. Na última figura da série, com a resistividade do solo da ordem de 30 k Ohm e tensão elétrica de excitação estabilizada em 20 kV, o comportamento da resposta do sinal da tensão elétrica tende a formatos próximos do gráfico inicial mostrado na Figura

20. Para resistividades do solo acima de 1500 Ohm.m os sinais de resposta à excitação aplicada no cabo contrapeso são mostrados nas Figuras 25 a 27 e os gráficos apresentam conformação de resposta semelhante a uma linha de transmissão em aberto excitada por tensão elétrica.

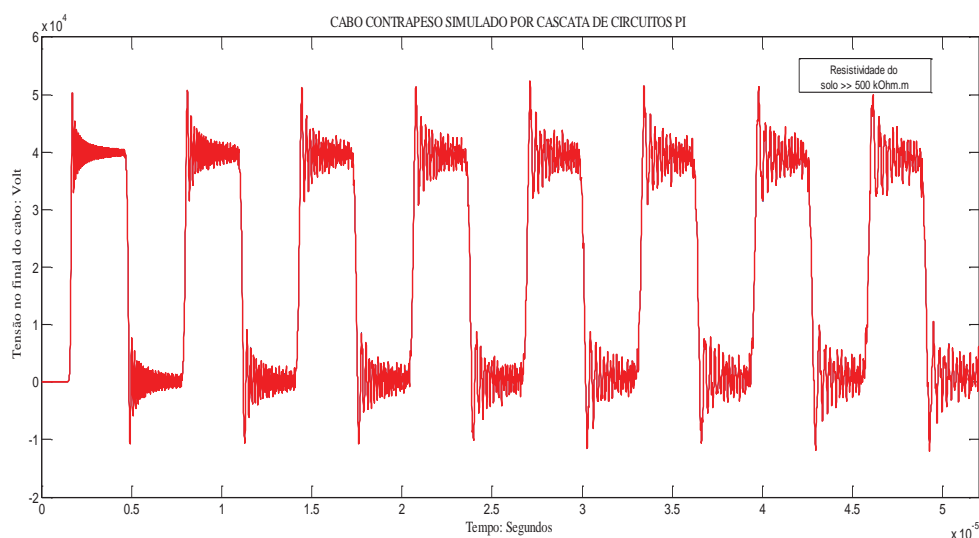
Esta condição atesta a proposição inicial para aplicação do método modelado por linhas de transmissão e permite-nos deduzir que os programas utilizados exibem resultados coerentes.

**Figura 25 - Sinal no final da linha em aberto em função da resistividade do solo.**



Fonte: Elaboração do próprio autor.

**Figura 26 - Sinal no final da linha em aberto em função da resistividade do solo.**



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para valores de resistividade do solo acima de 150 kOhm.m as tensões elétricas no final do cabo contrapeso, assim que aplicado a tensão de teste, mostra um aumento muito rápido nos picos das tensões. Entende-se que com o menor escoamento da energia transportada pela onda de tensão esta gasta mais tempo para ser drenada ao elemento terra resultando as ondas estacionárias defasadas que adicionadas atingem valores em torno de duas vezes do valor aplicado, exatamente como uma linha de transmissão de energia elétrica.

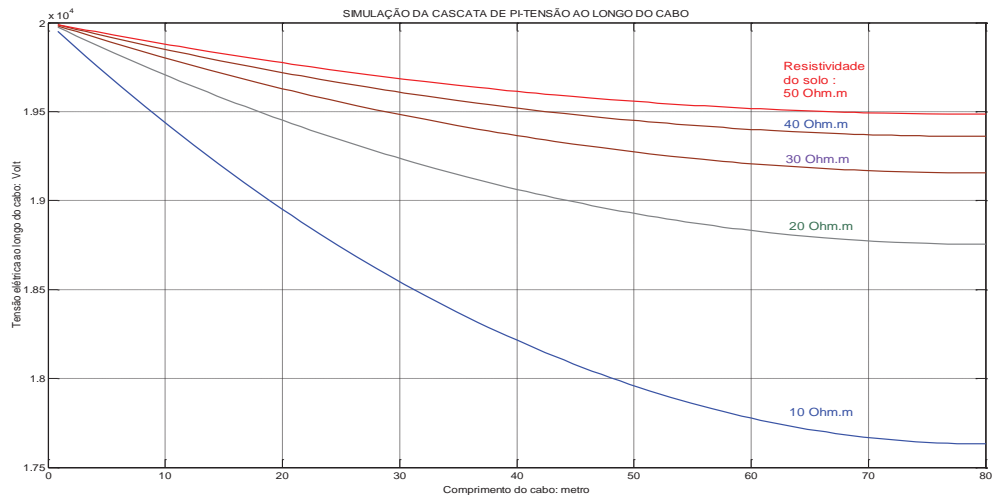
### **6.3 Análise de tensões elétricas ao longo do cabo contrapeso**

Outra condição explorada utilizada com os recursos do matlab é a implementação do programa fazendo a correspondente simulação entre a distância física do cabo contrapeso com o tempo utilizado, percorrido pela onda da tensão elétrica. Essa condição permite fazer análises dos valores envolvidos na avaliação da tensão elétrica de passo gerada por indução através do cabo, sobre o solo. A Figura 28 apresenta a curva de tensões elétricas desenvolvidas ao longo do cabo contrapeso após aplicação de uma onda de tensão como a da Figura 18, instalado em solo apresentando resistividade entre 25 e 125 Ohm.m.

Elevando a resistividade, a tensão desenvolvida nos eixos representativos resultou nos gráficos das Figura 27. Para valores de resistividades menores os gráficos apresentam curvaturas menos acentuadas, visto os gradientes de tensão tenderem a valores menores.

Através do programa implementado, seleciona-se determinado trecho do gráfico e analisa-se a diferença da tensão elétrica, para avaliação da tensão elétrica de passo, que deve estar abaixo do valor crítico na segurança a seres vivos, principalmente os humanos, da ordem de 150 V a 250 V, máximos.

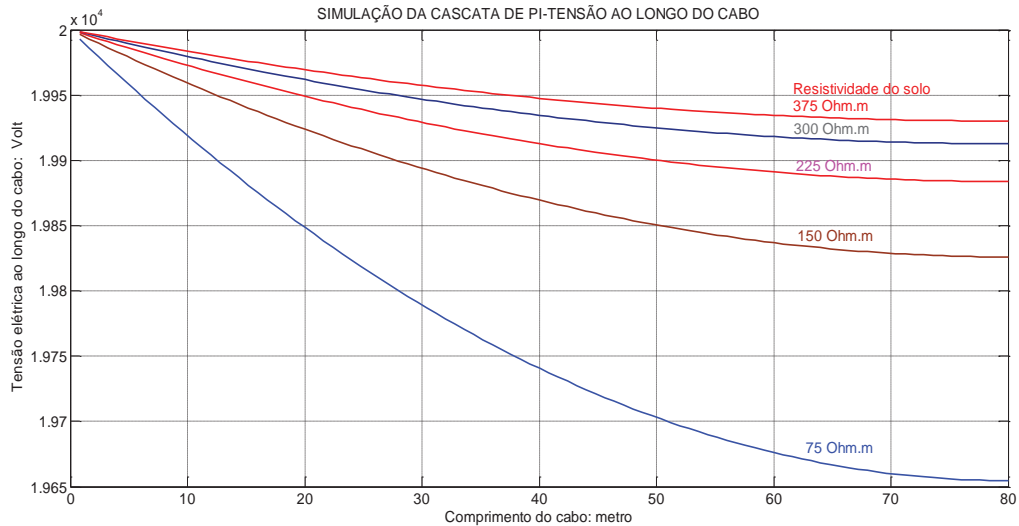
**Figura 27 - Tensões elétricas ao longo do cabo contrapeso**



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na Figura 29 estão mostradas as tensões elétricas ao longo do cabo contrapeso em função da resistividade do solo para maiores valores da resistividade elétrica..

**Figura 28 - Tensões elétricas ao longo do cabo contrapeso**



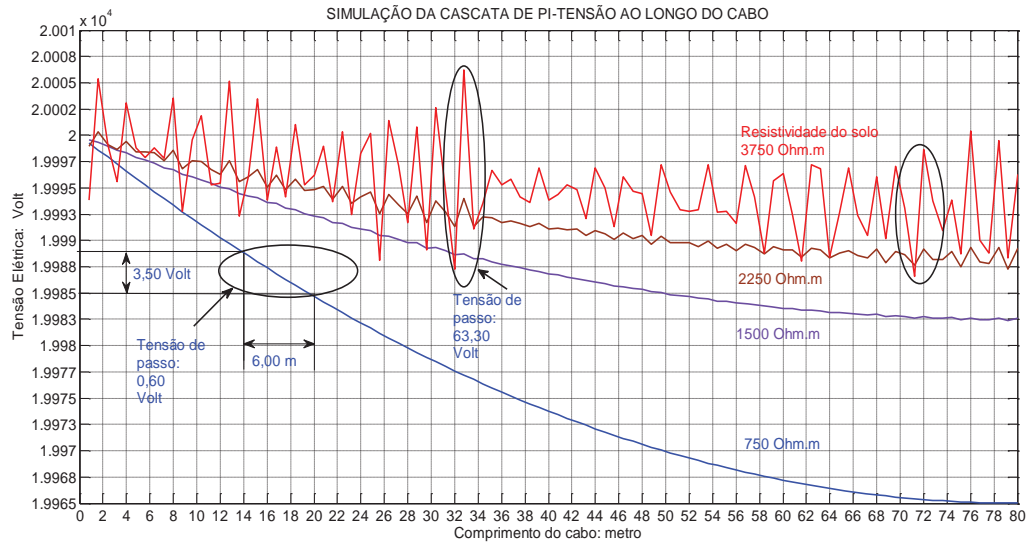
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Observe que a faixa das tensões elétricas diminui com o aumento na resistividade, o que resulta tensões maiores no mesmo.

No Figura 30 o gráfico mostra as tensões de passo calculadas para resistividades variando de 750 a 3.750 Ohm.m, valores hipotéticos, pois os valores reais para a maioria dos solos está compreendida entre 10 e 500 Ohm.m.



**Figura 29 – Tensões elétricas ao longo do cabo contrapeso**



Fonte: Elaboração do próprio autor.

No eixo do comprimento do cabo entre 32 e 34 m, resistividade de 3.750 Ohm.m, há diferença de potencial elétrico de 126 V que resulta em uma tensão de passo de 63 V/m, abaixo de 250 V que é considerado como limiar na segurança humana, Figura 30.

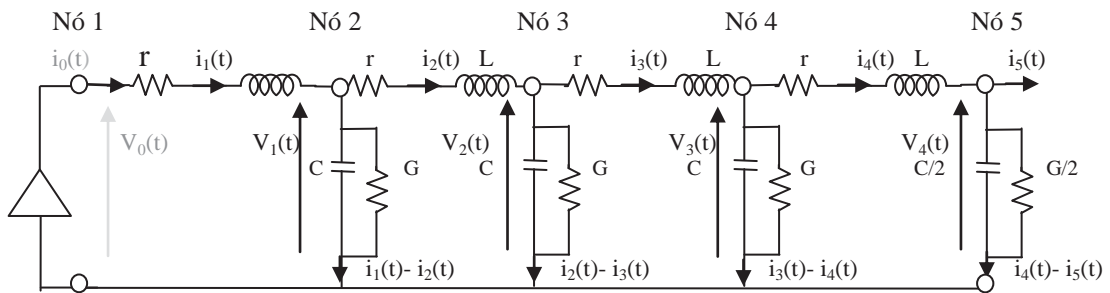
Observa-se que nas curvas onde a resistividade do solo tem valor menor, Figura 29, a diferença de potencial ao longo do cabo é pequena e seu valor cresce determinado pela inclinação da curva.

#### 6.4 Resultados gráficos da simulação do cabo contrapeso por cascata de circuitos $\pi$ aplicando onda de corrente elétrica

Agora no caso de uma excitação com onda inicial de corrente a sequencia no primeiro  $\pi$  seria corrente na entrada para tensão na saída deste primeiro circuito. Nos demais circuitos na sequência continua de encadeamento haverá tensão para corrente nas mesmas condições de procedimento nos cálculos para ondas de tensão. No ultimo circuito  $\pi$  a terminação permanece em aberto como em uma linha de transmissão sem carga na terminação final.

As grandezas do primeiro circuito, representados como parâmetros da matriz (32), na primeira linha e coluna serão diferentes. O circuito representativo do cabo contrapeso, simulado por linha de transmissão, para aplicação de uma onda de corrente está representado na Figura 31.

**Figura 30 - Circuitos em cascata  $\pi$  - corrente.**



Fonte: Elaboração do próprio autor.

No caso as grandezas do primeiro circuito terá os parâmetros da matriz (32) na primeira linha e coluna modificados como nas equações (34) e (35), ajustado para a corrente  $i_1(t)$  decorrente de  $i_0(t)$ , da aplicação de um sinal modelagem dupla exponencial. As equações serão as seguintes:

Para o nó 1

$$i_0(t) = 13.5 ( e^{-6000000t} - e^{-60000t} ) \text{ kA} \quad (33)$$

Na malha 1-2

$$0 - r i_0(t) - L \frac{d}{dt} i_0(t) = V_1(t) \quad (34)$$

Dividindo (6.2) por  $L$ , e rearranjando toda a expressão:

$$\frac{d}{dt} i_0(t) = - \frac{r}{L} i_0(t) - \frac{1}{L} V_1(t) \quad (35)$$

Com o programa computacional Matlab calcula-se o valor da tensão  $V_1(t)$  em função de  $i_0(t)$ ,  $-\frac{r}{L}$  e  $\frac{1}{L}$ , todos conhecidos.

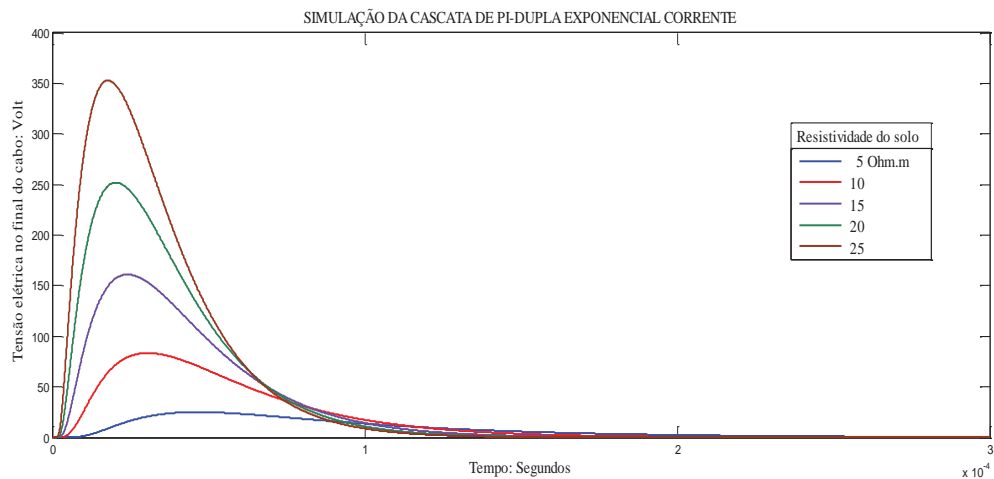
Para o nó 2

A partir deste nó o circuito comporta-se exatamente como no caso de excitação da cascata de  $\pi$  por sinal de tensão elétrica, Figura 17.

Utilizando o conceito de dualidade entre corrente e tensão elétrica da Lei de Ohm converte-se a corrente de entrada  $i_0(t)$  na sua conseqüente tensão elétrica  $V_1(t)$  em função dos parâmetros  $r$ ,  $L$ ,  $C$  e  $G$  e continua-se a simulação para o numero das células  $\pi$  com uma unidade a menos,  $n' = n - 1$ . Implementado no matlab resultou os gráficos das figuras 32 a 37.

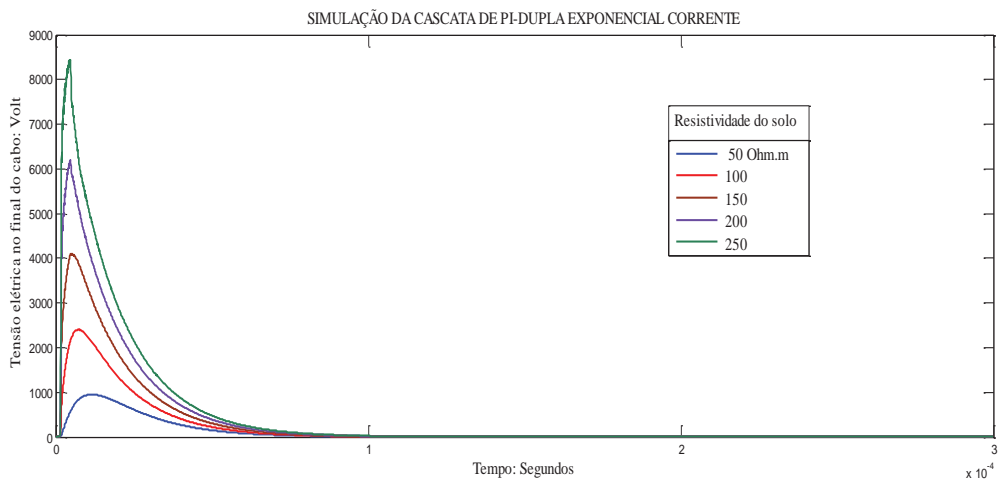
O período de tempo utilizado nas simulações têm valores entre 60 e 600  $\mu\text{s}$  para os gráficos das tensões elétricas no final do cabo e de 120 a 600  $\mu\text{s}$  nos gráficos de simulações das tensões ao longo do mesmo.

**Figura 31 - Tensões elétricas no terminal do cabo contrapeso por corrente.**



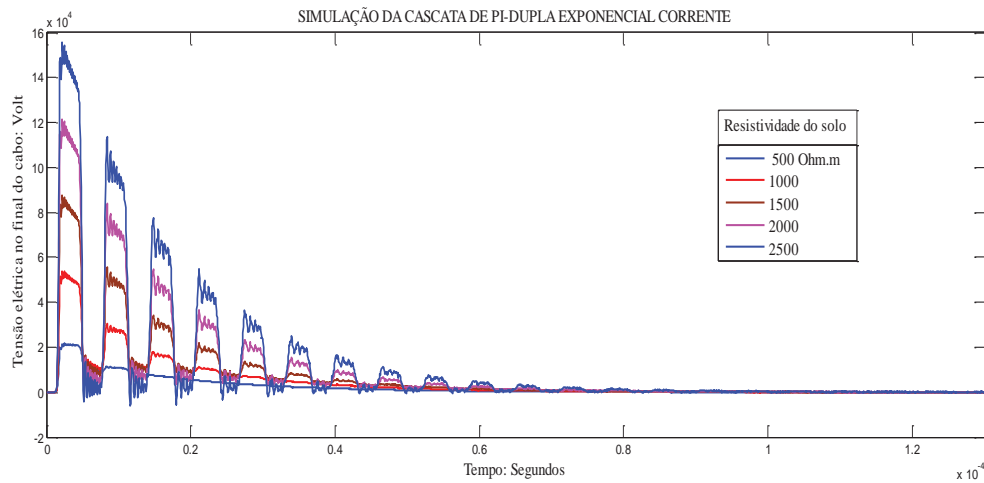
Fonte: Elaboração do próprio autor.

**Figura 32 - Tensões elétricas no terminal do cabo contrapeso por corrente.**



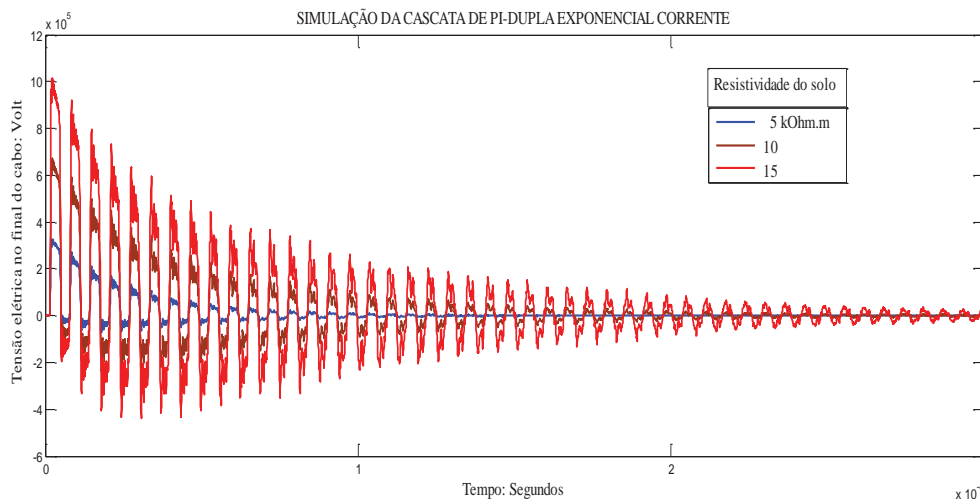
Fonte: Elaboração do próprio autor.

**Figura 33 - Tensões elétricas no terminal do cabo contrapeso por corrente.**



Fonte: Elaboração do próprio autor.

**Figura 34 - Tensões elétricas no terminal do cabo contrapeso por corrente.**

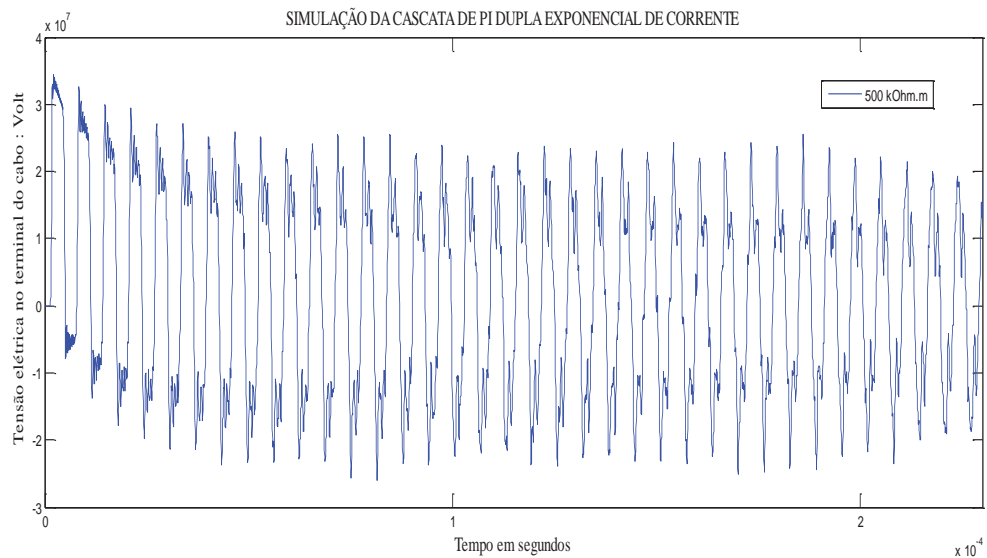


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Nas Figuras 35 e 36, quando a resistividade do solo atinge valores elevados, percebe-se que os valores das tensões elevam-se bastante devido a falta de escoamento da energia que permanece em transito ao longo do cabo gerando ondas estacionárias defasadas e sobrepostas.

O formato da resposta, independente do tipo da excitação, tende ao formato da mesma de uma linha de transmissão com terminação final em aberto como apresentado na Figura 36.

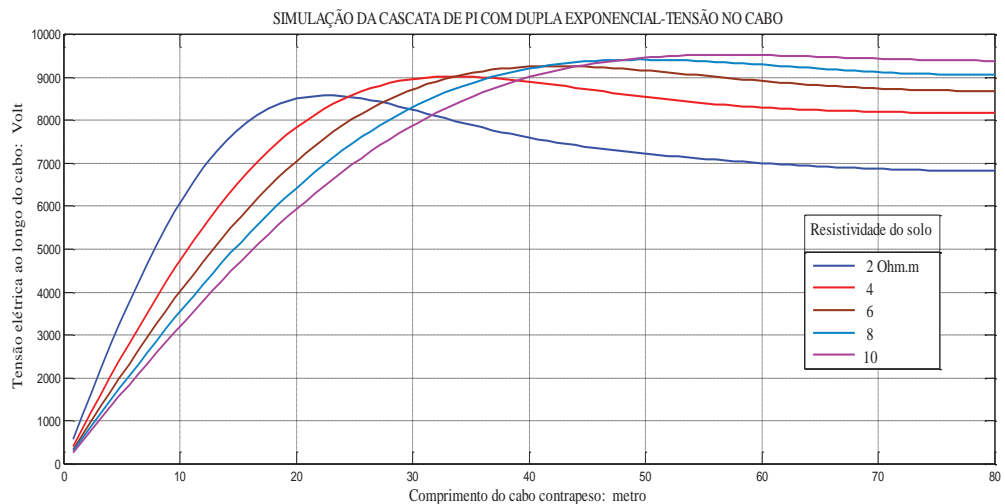
**Figura 35 - Tensões elétricas no final do cabo contrapeso por corrente.**



Fonte: Elaboração do próprio autor.

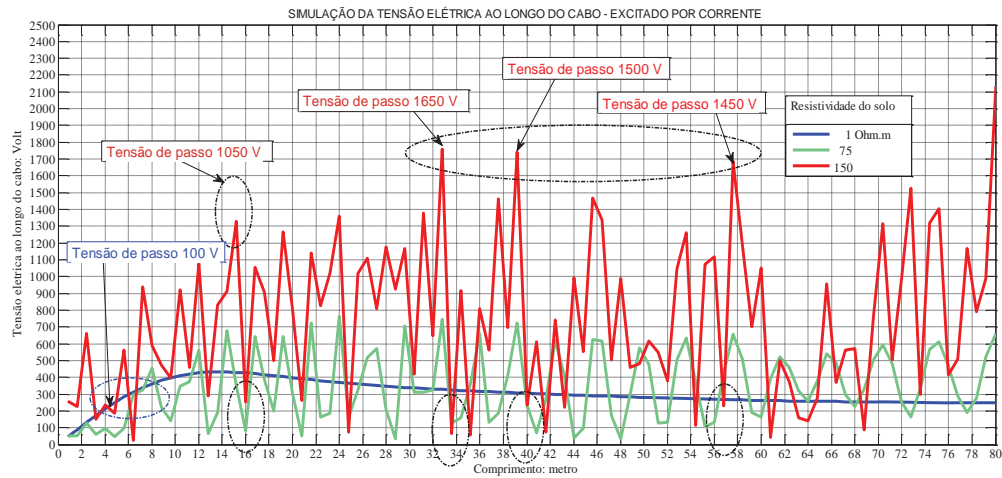
Similarmente aos resultados da cascata de  $\pi$  excitada por tensão, os gráficos apresentados nas Figuras 37 a 39 mostram as tensões elétricas ao longo do cabo, excitado por corrente na forma de dupla exponencial, em função da resistividade do solo.

**Figura 36 - Tensões elétricas ao longo do cabo contrapeso por corrente.**



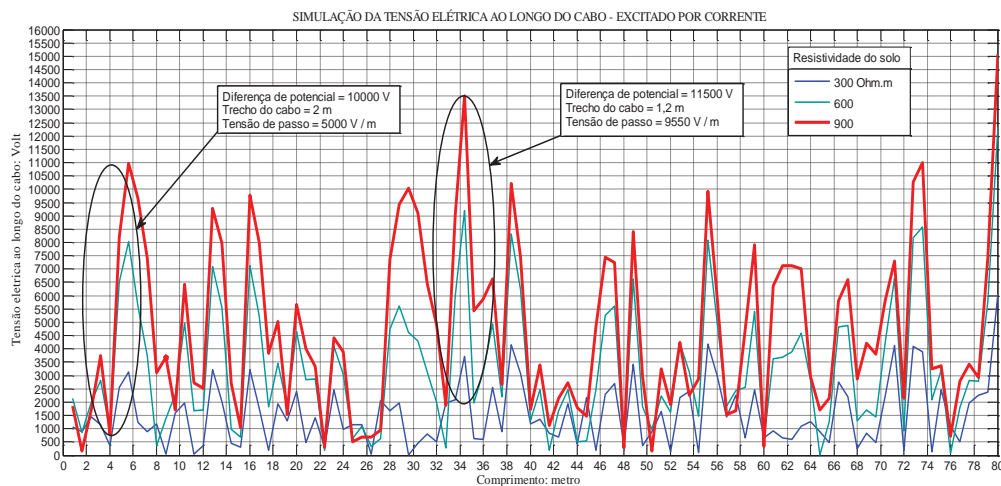
Fonte: Elaboração do próprio autor.

**Figura 37 - Tensões elétricas ao longo do cabo contrapeso por corrente.**



Fonte: Elaboração do próprio autor.

**Figura 38 - Tensões elétricas ao longo do cabo contrapeso excitado por corrente**



Fonte: Elaboração do próprio autor.

## 6.5 Conclusão sobre o resultado das análises de tensões elétricas no cabo contrapeso

Nesta etapa foi implementado o programa em matlab e com os parâmetros da linha de transmissão de energia elétrica conhecidos, efetuado uma primeira simulação, para testá-lo comparou-se os resultados com dados em literatura existente. Mostrou-se nas figuras contendo os gráficos das tensões elétricas no final e ao longo do cabo, representado por uma linha de transmissão com terminação em aberto, o comportamento das ondas de corrente e tensão.

Apresentaram contexto próximo das expectativas da modelagem empregada na simulação por variação da resistividade do meio onde foi utilizado.

Nesses resultados foi analisado valores das tensões de passo que podem ocorrer em instalações próximas a linhas de energia elétrica chegando ou saindo de subestações de transformação, locais de ampla aplicação dos sistemas de aterramento, e demais instalações onde há probabilidade de permanência ou presença de seres vivos nas imediações.

## CAPITULO VII

---

### 7 CONCLUSÕES

O gráfico das tensões resultantes da aplicação de uma onda de tensão ou corrente elétrica no terminal externo do cabo contrapeso possui resposta progressiva mostrando um espaçamento das mesmas ao longo do eletrodo horizontal enterrado.

Partindo da premissa que o cabo contrapeso poderia ser representado por uma linha de transmissão simulada por circuitos  $\pi$  em cascata tendo como impedância de carga o valor da resistência do cabo mais a gerada pela contribuição da resistividade do solo e utilizando programas implementados na plataforma Matlab, constatou-se a praticidade do método.

O efeito da capacitância não chega a ser preponderante e os valores são de ordem entre pF e nF. A conclusão encontrada mais importante resume-se na constatação de que o emprego de programas Matlab utilizados para estudo de linhas de transmissão mostrou-se compatíveis com os resultados obtidos no estudo e análise do comportamento de cabos contrapesos empregados em sistemas de aterramento onde é necessário eficiência e bom desempenho para a neutralização de descargas atmosféricas diretamente ao elemento terra. Também a ferramenta permitiu avaliar condições da tensão de passo ao longo do cabo contrapeso necessária à proteção da vida humana nos diversos serviços no campo da transmissão, geração e distribuição da energia elétrica.

Nota-se ainda a diferença entre excitação por tensão elétrica e excitação por corrente elétrica. Na excitação por corrente elétrica os níveis de tensão, para valores da resistividade acima de 50 (cinquenta) Ohm.m, alcançam valores bem maiores se comparados à excitação por tensão elétrica. Do ponto de vista energético a descarga em nível de correntes tem maior densidade comparado à aplicação de tensões elétricas.

Nas simulações do comportamento de sistemas de aterramento utilizando o aplicativo Matlab demonstrou-se que é possível uma avaliação prévia dos resultados em função da qualidade do solo onde é empregado, usando como parâmetro a resistividade deste.

Para um futuro próximo seria de bom alvitre instalar o cabo contrapeso empregado nos moldes do que foi aqui apresentado e comparar os resultados entre o simulado e o real.

Obviamente haverá necessidade de utilização de equipamentos geradores e registradores de sinais elétricos de tensão e corrente juntamente com acessórios de instalação



e proteção adequados, face aos níveis elevados das grandezas em transito no sistema de aterramento.

Como trabalhos futuros, sugerem-se algumas alternativas nos itens seguintes.

## **7.2 Continuidade na implementação dos programas matlab.**

Continuação deste estudo refazendo as simulações apresentadas incluindo também o efeito da frequência. Trabalhos envolvendo a variação do comprimento do cabo contrapeso para a melhor eficiência, entre máximos e mínimos, na avaliação dos níveis de tensão elétrica desenvolvida ao longo dos mesmos.

## **7.3 Estudos sobre a implantação de um sistema real para aquisição de dados.**

Modelagem e análise do solo para um cabo contrapeso instalado que permita levantamento dos dados para determinação da resistividade e a resistência aparente.

Aplicação de sinais elétricos com registro das respostas ao longo e no final do cabo com sensores e equipamentos adequados.

Comparação entre a simulação e os resultados coletados de uma instalação real.

## **7.4 Estudos sobre o futuro no emprego do método.**

Maior ênfase na avaliação sobre as tensões elétricas de passo e de toque e até mesmo as tensões elétricas de potencial estendida em instalações de sistemas elétricos, nas construções de grande porte como edifícios de grande altura, construções metálicas industriais, subestações de transformação de energia elétrica, transporte ferroviário e outras anexas.

Analisar as normas técnicas vigentes no sentido de contribuir com o conhecimento para melhorá-las no que for possível.

Aplicação do método proposto para estudos de sistemas de aterramentos nas interligações entre as unidades de cogeração de energia elétrica na frequência industrial acoplados a outros sistemas alternativos dos tipos eólicos, solares, térmicos ou qualquer outro que se fizer disponível. Aplicar o estudo relacionado à interligação do potencial referência para sistemas complexos (“Smart-Grid”), necessário à eficiência no tráfego computacional em tempo real das informações no gerenciamento no fluxo de cargas.

## REFERÊNCIAS

- BARBOSA, C. F. **Campos eletromagnéticos produzidos por descargas atmosféricas**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, Maio de 2009.
- BELASCHI, P. L.; ARMINGTON, R. E. Impulse and 60-cycle characteristics of driven grounds: III - effect of lead in ground installation. **AIEE Transactions**, Piscataway, v. 62, p. 334-345, 1943.
- BEWLEY, L.V. Theory and tests of the counterpoise. **AIEE Transactions**, Piscataway, v. 53, p. 1163-1172, Aug. 1934.
- CECONI, V.; MATRANGA, A.; RAGUSA, A. New circuital models of grounding systems and PDS for EMI analysis during lightning strike. In: ANNUAL CONFERENCE OF IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY – IECON, 31., 2005, Raleigh. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2005. p. 1726-1731.
- CELLI, G.; PILO, F. A distributed parameter model for grounding systems in the PSCAD/EMTDC environment. In: IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY GENERAL MEETING, 2003, Toronto. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2003. v. 3, p.1650-1655.
- CHARANTOLA, D. J. **Representação de linhas de transmissão monofásicas por variáveis de estado: comparação das soluções numéricas e analíticas**. Ilha Solteira: Unesp/Fe, 2007.
- CONDUSPAR CONDUTORES ELÉTRICOS. **Catálogo de produtos: cabos de cobre nu**. São José dos Pinhais, 2011. Disponível em: <<http://www.conduspar.com.br>>. Acesso em: 24 ago. 2011.
- DALZIEL, C. **Effects of current on the human body**. Centralia: Hubbell Power Systems, 2010. section 5, p. 739-744. Disponível em: <<http://www.hubbellpowersystems.com/literature/encyclopedia-grounding/pdfs/07-0801-5.pdf>>. Acesso em: 24 ago. 2011.
- DESCARGAS atmosféricas (raios). **Informativo Areia**, [s.l.], ano1, n. 4, nov. 2000. Disponível em: <<http://www.agr.feis.unesp.br/raios.htm>>. Acesso em: 24 ago. 2011.
- ELETRIC GROUND. Apresenta textos e produtos sobre sistemas de proteção contra descargas elétricas atmosféricas (para-raios). São Paulo, 2011. Disponível em: <[www.eletricground.com.br](http://www.eletricground.com.br)>. Acesso em: 17 ago. 2011.
- FAZ FÁCIL. **O para-raios**. [S.l.]: Faz Fácil, 2011. Disponível em: <[http://www.fazfacil.com.br/reforma\\_construcao/eletricidade\\_raios\\_2.html](http://www.fazfacil.com.br/reforma_construcao/eletricidade_raios_2.html)>. Acesso em: 24 ago. 2011.
- FIREGAS. **Sistema contra descargas atmosféricas - para raios (SDCA)**. Palhoça, 2011. Disponível em: <<http://www.firegas.com.br>>. Acesso em: 24 ago. 2011.
- FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS. **Relatório anual**. Rio de Janeiro, 1992.

GAZZANA, D. S. et al. Comparative analysis of EMC methodologies applied on transients studies of impulse grounding systems. In: IEEE INTERNATIONAL INDUSTRIAL TECHNOLOGY – ICIT, 2010, Vina del Mar. **Proceedings...** Piscataway: IEEE, 2010. p. 710-716.

GUPTA, B. R.; THAPAR, B. Impulse impedance of grounding grids. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Piscataway, v. PAS-99, n. 6, p. 2357-2362, 1980.

HUYGENS, C. **Tratado da luz**. Lisboa: Sociedade Portuguesa de Matemática, 2007. Disponível em: <<http://www.spm.pt/catalogo/item/81>>. Acesso em: 24 ago. 2011.

HUNT, B. R.; LIPSMAN, R. L.; ROSENBERG, J. M. **A guide to MATLAB for beginners and experienced users**. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.

KARRIS, S. T. **Circuits analysis II with MATLAB applications**. Fremont: Orchard Publications, 2003.

KNIGHT, A. **Basics of MATLAB and beyond**. Washington, D.C.: Chapman & Hall/CRC, 1961.

SALARI FILHO, J. C.; DART, F. C. **Aterramento à frequência industrial: equações básicas e eletrodo pontual**. Rio de Janeiro: CEPEL, 1997. (Relatório Técnico DPP/TEQ, n. 425).

SALARI FILHO, J. C.; PORTELA, C. Grounding systems modeling including soil ionization. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Piscataway, v. 23, n. 4, p. 1939-1945, Oct. 2008.

SALARI FILHO, J. C.; SANTOS, L. A. A.; NASCIMENTO, J. M. L. **Resistência de aterramento e diferença de potencial de passo e de toque para sistemas de aterramento empregados em redes de distribuição rural**. Rio de Janeiro: CEPEL, 2000. (Relatório Técnico ADG-A/PER n°. 889/2000).

SHOENE, J. et al. Test of transmission line model and the travelling current source. **Journal of Geophysical Research**, Washington, D. C., v. 108, n. D23 4737, p-10-3, 2003.

SILVA, J. M.; RIBAS, R. M. Desenvolvimento de um eletrodo de terra com baixíssima resistência para serem instalados em solos de alta resistividade. In: ENCUENTRO REGIONAL IBEROAMERICANO DE CIGRÉ – ERIAC, 13., 2009, Puerto Iguazu. **Anales...** Puerto Iguazu: Cigré, 2009. Trabajo B2-07.

SILVA, R. C. et al. **Análise de alguns métodos numéricos que podem ser utilizados em simulações de transitórios eletromagnéticos**. Ilha Solteira: Unesp/FE, [200-?]. p. 1-6.

SILVEIRA, F. H. **Modelagem para cálculos de tensões induzidas por descargas atmosféricas**. Belo Horizonte: UFMG, 2006.

SITELCO RÁDIO COMUNICAÇÃO. **Descargas atmosféricas**. Salvador, 2011. Disponível em: <<http://www.sitelco.com.br/para-raios/descargas-atmosfericas.html>>. Acesso em: 24 ago. 2011.

SMIT, J. **Linhas de comunicação**. São Paulo: Editora Érica, 1987. p. 12-17.

TELECOMUNICAÇÕES BRASILEIRAS – TELEBRAS. **Procedimento de projeto de sistemas de aterramento para a rede externa de telecomunicações**: prática 565-510-004-STB, 235-600-003. dez 1995. Brasília, DF, 1995. p. 2-19. (Relatório Furnas).

VERMA, R.; MUKHEDKAR, D. Impulse impedance of buried ground wire. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Piscataway, v. PAS-99, n. 5, p. 2003-2007, sep. 1980.

WEDTEC PÁRA-RAIOS. **Proteção Franklin**. São Paulo, 2011. Disponível em: <<http://www.wedtec.com.br/Servicos.htm>>. Acesso em: 24 ago. 2011.

## APENDICE A

Descrição: expressões analíticas envolvendo os fenômenos de impulsos elétricos em cabos nus enterrados (VERMA; MUKHEDKAR, 1980, p. 2003-2007).

A1.1 Parâmetros de um condutor nu horizontal, enterrado.

$$\text{Resistência de aterramento: } R = \frac{\rho_{\text{solo}}}{2\pi l} \ln\left(\frac{2l}{a_0}\right) \Omega ; \quad (36)$$

$$\text{Indutância: } L = 2l \cdot \ln\left(\frac{2l}{a_0}\right) \cdot 10^{-7} \text{ H}; \quad (37)$$

$$\text{Constante de tempo indutiva: } T_L = 4 \cdot \pi \frac{l^2}{\rho} \cdot 10^{-7} \text{ s}; \quad (38)$$

$$\text{Constante de tempo capacitiva: } T_C = \frac{\rho_{\text{solo}} k}{4\pi} \cdot \frac{1}{9 \cdot 10^9} \text{ s}, \quad (39)$$

$l$  é o comprimento do cabo,  $a_0$  raio do condutor,  $\rho_{\text{solo}}$  resistividade do solo e  $k$  o coeficiente de ondas estacionárias sobre o mesmo.

A1.2 Impedância de impulso de um condutor horizontal enterrado, para impulsos de forma cossenóides, exponencial ou quadrada, dados empíricos.

Caso I -  $l \leq l_e$ , no caso do comprimento físico ser menor que o comprimento elétrico

Impedância de impulso  $Z(x_0, t_0) = A R$ , onde  $x_0$  é o ponto inicial do cabo contrapeso e  $t_0$  o tempo zero da incidência da descarga. Os coeficientes  $A$  e  $R$  são definidos por:

$$A = e^{[0,333 \left(\frac{l}{l_e}\right)]^{2,3}}; \quad (40)$$

$$l_e = 1,4 \sqrt{\rho_{\text{solo}} \tau}; \quad (41)$$

$R$  = resistência na frequência de operação para o comprimento  $l$ , em  $\Omega$ ;

$\rho_{\text{solo}}$  = resistividade aparente do solo;

$\tau$  = tempo da frente de onda em  $\mu\text{s}$ .

Caso II -  $l \geq l_e$

Neste caso a impedância de impulso é numericamente igual à resistência na frequência de operação para o comprimento  $l_e$ .

A1.3 Impedância de fim de onda resultante da aplicação de uma função unitária no cabo contrapeso (BEWLEY, 1934, p.73-81).

$$Z_c(t) = \frac{1}{G.l \left\{ 1 - \sum_{k=1}^{\infty} \frac{8 e^{-at}}{(2k-1)^2} \left[ \cos \omega_k t + \left( \frac{G}{4\omega_k C} - \frac{\omega_k L}{G} \right) \sin \omega_k t \right] \right\}} \quad (42)$$

onde  $l = \epsilon$  é o comprimento do cabo contrapeso enterrado em metros;

$G$  = condutância de dispersão, por metro;

$L$  = indutância, por metro;

$C$  = capacitância, por metro;

$R = 0$ ; desprezada a resistência ôhmica do cabo;

$\omega_k$  = frequência angular de ordem  $k$ ;

$k$  = índice da fundamental e ou harmônicas.

A1.4. Tensão elétrica desenvolvida nos terminais finais por unidade de corrente aplicada.

$$V_0 = \frac{I}{G} \left[ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{\pi^2 n^2}{G.L} t} \right] \text{ onde} \quad (43)$$

$I$  = corrente elétrica no cabo contrapeso;

$G$  = dispersão elétrica total em Siemens;

$L$  = indutância total do cabo contrapeso em Henry;

$n$  = índice do somatório para instantes de  $t$ .

A1.5. Potencial elétrico desenvolvido no terminal de carga para uma corrente de dupla exponencial da forma  $I(o, t) = I (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$  (BELASCHI; ARMINGTON, 1943, p. 334-345).

$$V_0 = I \left[ \frac{\sqrt{\frac{L\alpha}{G}} e^{-\alpha t}}{\tan \sqrt{G L} \alpha} - \frac{\sqrt{\frac{L\beta}{G}} e^{-\beta t}}{\tan \sqrt{G L} \beta} + \frac{\alpha - \beta}{G^2 L} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\pi^2 n^2 e^{-\frac{\pi^2 n^2}{G L} t}}{\left( \alpha - \frac{\pi^2 n^2}{G L} \right) \left( \beta - \frac{\pi^2 n^2}{G L} \right)} \right] \quad (44)$$

Desprezadas as resistências ôhmicas de hastes que existirem, as variáveis são:

- L = indutância total do condutor de cobre (mH);
- C = capacitância total, de valores desprezíveis (pF);
- G = dispersão total para terra, em Siemens;
- n = índice do somatório, para cada instante de tempo.

A1.6 - Expressões para o calculo da resistividade aparente de um cabo contrapeso.

Para o calculo da resistência de aterramento, um dos métodos bastante utilizado emprega os conceitos e diretrizes do Método de Wenner, (FURNAS, 1992, p. 10-12), empregando as equações abaixo.

A1.7 – Resistividade aparente do solo, modelado por estratificação de camadas do solo terrestre.

$$\rho_a = \rho_1 \left\{ 1 + 4 \sum_{i=1}^{\infty} \left[ \frac{k^i}{\sqrt{(1+2ip/a)^2}} - \frac{k^i}{\sqrt{(4+(2ip/a))}} \right] \right\} \quad (45)$$

onde:  $k = \frac{(\rho_1 - \rho_2)}{(\rho_1 + \rho_2)}$  coeficiente de reflexão ou relação de ondas estacionárias;

$\rho_a$  = resistividade aparente do solo;

$\rho_1$  = resistividade da primeira camada do solo;

$\rho_2$  = resistividade da segunda camada do solo;

p = profundidade do cabo enterrado em relação à superfície do solo;

a = parâmetro de afastamento dos eletrodos de medição em metros;

n = índice do somatório, para cada medida efetuada no solo.

A1.8 Determinação do valor da resistência ôhmica de um eletrodo horizontal, utilizado em aterramentos.

A equação básica abaixo leva em consideração a modelagem do solo com o cabo terra enterrado na horizontal e outro condutor na vertical de comprimentos  $l_c$  e  $l_h$ , diâmetros  $d_h$  e  $a_0$  respectivamente, aplicada para cada medição efetuada. (TELEBRAS, 1995, p. 1213).

$$R = \frac{\rho_a}{\pi l_c} \left\{ \ln \left[ \frac{2l_c}{\sqrt{a_0 p}} \right] - 1 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{\infty} k^i \left[ \ln \left( \frac{1 + \sqrt{(2ih/l_c)^2 + 1}}{(2ih/l_c)} \right) + 8 \cdot \frac{ih}{l_c} \cdot 4 \sqrt{\left( \frac{2ih}{l_c} \right)^2 + 1} \right] \right\} \quad (46)$$

onde:

$h$  = a profundidade da primeira camada do solo com resistividade  $\rho_1$  ;

$l_c$  = comprimento do condutor horizontal;

$a_0$  = diâmetro do condutor horizontal;

$p$  = profundidade do condutor em relação ao nível do solo;

$\rho_1$  = resistividade da primeira camada;

$k$  = coeficiente de reflexão de ondas estacionárias (equação anterior).



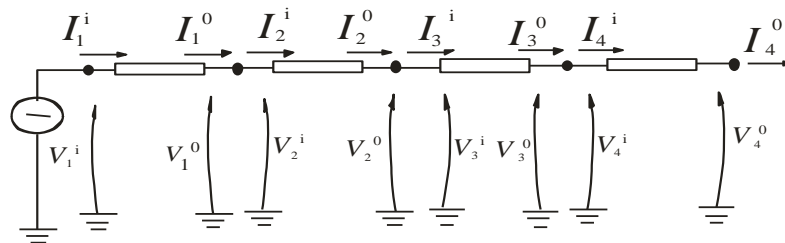
## APENDICE B

Descrição: modelo básico da divisão do cabo contrapeso em circuitos  $\pi$ .

O modelo utiliza um programa implementado em “Matlab” usando os circuitos com as células  $\pi$ , aplicando os valores abordados nos itens anteriores.

Os valores de tensões e correntes em cada célula estão representados pelos conjuntos de equações no domínio da frequência. Para conhecer a resposta no domínio do tempo aplica-se a transformada inversa de Laplace.

**Figura 39 - Tensões e correntes no cabo contrapeso em segmentos**



Fonte: Celli e Pilo (2003, p. 1653).

Admitir como condições limitadoras, nas conexões dos nós intermediários, que as correntes e tensões da saída de um segmento são respectivamente as de entrada do segmento adjacente (CELLI; PILO, 2003, p. 1651-1653). Seja, então, o sistema de equações apresentando os parâmetros do circuito segmentado, Figura 39.

$$\begin{aligned}
 I_1^i &= I_{\max} (s) & V_1^i &= V_{\max}(s) \\
 I_1^0 &= I_2^i & V_1^0 &= V_2^i \\
 I_2^0 &= I_3^i & V_2^0 &= V_3^i \\
 I_3^0 &= I_4^i & V_3^0 &= V_4^i \\
 I_4^0 &= 0 & V_4^0 &= V_4^i
 \end{aligned} \tag{47}$$

Resolvendo esse sistema linear de oito equações com suas condições de contorno, as tensões nos cinco nós da Figura A2.1 serão os conjuntos seguintes:

$$\begin{aligned}
 V_1^i(s) &= \frac{A^4 + 6.B.C^2 + B^2.C^2}{4.A.C.(A+B.C)} I_{\max} (s) \\
 V_1^0(s) = V_2^i(s) &= \frac{A^2 + 3.B.C}{4.C.(A^2 + B.C)} I_{\max} (s) \\
 V_2^0(s) = V_3^i(s) &= \frac{1}{4.A.C} I_{\max} (s)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_3^0(s) &= V_4^i(s) = \frac{1}{4.C.(A^2+B.C)} I_{\max}(s) \\
 V_4^0(s) &= \frac{1}{4.A.C.(A^2+B.C)} I_{\max}(s).
 \end{aligned} \tag{48}$$

Para as correntes intermediárias nos nós

$$\begin{aligned}
 I_1^0(s) &= I_2^i(s) = \frac{3.A^2+B.C}{4.A.C.(A^2+B.C)} I_{\max}(s) \\
 I_2^0(s) &= I_3^i(s) = \frac{1}{2.(A^2+B.C)} I_{\max}(s) \\
 I_3^0(s) &= I_4^i(s) = \frac{1}{4.A.(A^2+B.C)} I_{\max}(s).
 \end{aligned} \tag{49}$$

Os coeficientes A, B, C e D são os parâmetros (SMIT, 1987, p. 2-17) definidos por:

$$\begin{aligned}
 B &= Z_c \sinh(\gamma \ell) \\
 A &= D = \cosh(\gamma \ell) \\
 C &= \left( \frac{1}{Z_c} \right) \sinh(\gamma \ell) \\
 Z_c &= \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{[(R + sL)/(G + sC)]} \\
 \gamma &= \sqrt{Z \cdot Y} = \sqrt{[(R + sL) \cdot (G + sC)]}
 \end{aligned} \tag{50}$$

Onde  $\gamma$  é a constante de propagação,  $Z_c$  a impedância característica,  $Z$  as impedâncias série e  $Y$  a admitância transversal do eletrodo.

Das equações, obtêm-se as expressões de  $V_1(s)$  e  $V_2(s)$ .

$$\begin{aligned}
 V_1(s) &= \left( \frac{A}{C} \right) I_1(s) \\
 V_2(s) &= \left( \frac{1}{C} \right) I_2(s)
 \end{aligned} \tag{51}$$

Aplicando a transformada inversa de Laplace, tem-se a forma da onda do sinal no domínio do tempo.

## APENDICE C

Descrição: síntese de encadeamento dos programas matlab.

- A3.1 Programa para cálculo dos parâmetros resistência aparente, indutância própria, condutância e capacitância do cabo contrapeso em função da resistividade do solo.
- A3.2 Programa para cálculo dos parâmetros concentrados do cabo contrapeso.
- A3.3 Programa de cascata em  $\pi$  usando os parâmetros  $r$ ,  $L$ ,  $C$  e  $G$  do cabo contrapeso excitado por tensão elétrica com função no formato de rampa, estabilizada em 0 kV.
- A3.3 Programa de cascata em  $\pi$  usando os parâmetros  $r$ ,  $L$ ,  $C$  e  $G$  do cabo contrapeso excitado por tensão elétrica com função no formato de rampa, estabilizada em 20 kV.
- A3.4 Programa de cascata em  $\pi$  usando os parâmetros  $r$ ,  $L$ ,  $C$  e  $G$  do cabo contrapeso excitado por tensão elétrica com função em forma de rampa, estabilizada em 20 kV.
- A3.5 Programa de cascata em  $\pi$  usando os parâmetros  $r$ ,  $L$ ,  $C$  e  $G$  do cabo contrapeso excitado com função dupla exponencial de corrente elétrica, 13,5 kA.
- A3.6 Programa de cascata em  $\pi$  para calculo das tensões elétricas ao longo do cabo contrapeso, excitação por dupla exponencial de corrente elétrica, 13,5 kA.

## ANEXO A

**Pára-raios de Curitiba estão inadequados**

Arquivo / O Estado



Capital está entre as cidades com maior ocorrência de raios.

O Brasil é campeão mundial em descargas atmosféricas, registrando em média 100 mortes anuais causadas por raios. E Curitiba, pelo índice isoceráunico, que calcula o número de tempestades, estaria entre as 10 cidades com maior ocorrência de raios. A capital paranaense registra cerca de 70 tempestades por ano, ou seja, quase um terço do ano. "O número dobrou nos últimos cinco anos, como em todo o país, em função do El Niño, desmatamento, agressão ambiental e alteração climática", explica o engenheiro eletricitista e especialista em descargas atmosféricas Rui Carlos Braga.

Segundo o coordenador da Comissão de Segurança e Edificações (Cosedi), Hermes Peyerl, do aumento da concentração humana e mitos em torno da segurança contra descargas também ajudam as estatísticas. "A idéia de que qualquer coisa atrai raios não é verdadeira. Por isso, apenas um pedaço de metal apontado para cima no topo dos prédios é ineficiente", afirma. Por isso o Cosedi está intensificando o trabalho de orientação e divulgação de informações sobre os novos Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA).

Para Braga, os problemas não estão apenas na falta de sistemas, mas no uso de para-raios inadequados ou incompletos. "Em Curitiba, mais de 90% dos para-raios estão incompletos ou inoperantes, ou seja, são ineficientes como sistemas de proteção. E cerca de 30% destes são sistemas radioativos, nocivos à saúde." Os SPDA precisam de um bom sistema de descida das descargas e aterramento.

Um sistema completo, explica Braga, custa aproximadamente 1% do valor da obra. Caso opte também por instalar supressores de surtos (sistemas que protegem os eletroeletrônicos), cada um custa em torno de 3% do valor do equipamento a ser protegido. "O País gasta cerca de US\$ 4 milhões anuais com prejuízos causados por descargas atmosféricas", revela.

A Cosedi está fazendo fiscalizações em clubes, áreas de lazer, campos de futebol e canchas. Estima-se que 70% desses locais não têm SPDA corretamente instalados. "Estamos alertando e notificando quem não está dentro das normas", diz Peyerl.

Fonte: **Jornal O Estado do Paraná**, Curitiba, 27 ago. 2005 (atualizado em 19 jul. 2008), Cidades / Notícias. Disponível em: < <http://www.parana-online.com.br/editoria/cidades/news/136564/?noticia=PARA+RAIOS+DE+CURITIBA+ESTAO+INADEQUA DOS>>. Acesso em: 24 ago. 2011.