

Marcel Ayres de Araújo

**Projeto de um Sistema de Proteção Contra
Descargas Atmosféricas para uma Linha
de Transmissão de 69 kV**



Orientador:
Prof. Dr. José Carlos de Melo Vieira Júnior

**São Carlos
2010**

Marcel Ayres de Araújo

**Projeto de um Sistema de Proteção
Contra Descargas Atmosféricas para
uma Linha de Transmissão de 69 kV**

Trabalho de Conclusão de
Curso apresentado à Escola
de Engenharia de São Carlos
da Universidade de São
Paulo

Curso de Engenharia Elétrica
com ênfase em Sistemas de
Energia e Automação

Orientador:
Prof. Dr. José Carlos de Melo
Vieira Júnior

**São Carlos
2010**

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

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

A663p Araújo, Marcel Ayres de
Projeto de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas para uma linha de transmissão de 69 KV / Marcel Ayres de Araújo; orientador José Carlos de Melo Vieira Júnior. -- São Carlos, 2010.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2010.

1. Transmissão de energia elétrica. 2. Descargas atmosféricas. 3. Pára-raios. 4. SPDA. I. Título.

Dedicatória

Aos meus pais, ao meu
irmão, a minha namorada e
aos meus amigos.

Agradecimentos

Ao professor José Carlos de Melo Vieira Júnior, pela orientação, atenção, apoio e incentivo no desenvolvimento do meu projeto de iniciação científica e elaboração deste trabalho.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica, que participaram e colaboraram com a minha graduação nesta universidade.

Ao Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) - Universidade de São Paulo.

Ao Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica – LSEE e aos seus membros, pela participação e fornecimento de todas as condições necessárias para o desenvolvimento deste trabalho.

Sumário

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xvii
Lista de Siglas, Símbolos e Abreviaturas	xix
Resumo	xxi
Abstract	xxiii
Capítulo 1	25
Introdução	25
Capítulo 2	29
Levantamento Bibliográfico	29
2.1 - Organização do Estudo Bibliográfico	29
2.2 - Sistemas de Proteção Contra Descargas Atmosféricas, Pára-Raios e Aterramento.....	29
Capítulo 3	37
Descargas Atmosféricas	37
3.1 - Conceitos Básicos	37
3.2 - Formação das Cargas nas Nuvens	38
3.3 - Formação do Raio.....	39
3.4 - Descarga Elétrica Nuvem/Terra	41
3.4.1 - Precursor	41
3.4.2 - Último Salto	43
3.5 - Descarga	43
3.6 - Incidência de Raios	44
Capítulo 4	45
Sistema de Proteção Contra Descarga Atmosférica	45
4.1 - Funções e Definições de SPDA.....	45
4.2 - Composição dos SPDAs	46
4.3 - Pára-Raios	46
4.3.1 - Tipos de Pára-Raios.....	47
4.3.2 - Pára-Raios a Óxido de Zinco	48
4.3.2.1 - Características Construtivas dos Pára-Raios a ZnO.....	49
4.3.2.2 - Características dos Resistores a ZnO.....	50
4.3.2.3 - Envelhecimento e Deterioração dos Resistores a ZnO.....	51
4.3.2.4 - Desempenho Frente a Surtos Atmosféricos	54
4.4 - Aterramento.....	55
4.4.1 - Conceitos Relevantes.....	55
4.4.2 - Finalidades	56
4.4.3 - Requisitos.....	57
4.4.4 - Fatores que Influenciam o Aterramento	57
Capítulo 5	59
Levantamento e Modelagem da Linha de Transmissão	59

5.1 - Características da Linha Real Seleccionada.....	59
5.2 - Modelos Matemáticos.....	62
5.3 - Modelagem da Linha Real Seleccionada no <i>Software</i> ATPDraw.....	63
Capítulo 6	67
Análise e Simulação das Sobretensões Causadas pela Ocorrência de Descargas Atmosféricas	67
6.1 - Simulação de Descargas Atmosféricas	67
Capítulo 7	81
Modelagem e Validação de Pára-Raios no <i>Software</i> ATPDraw	81
7.1 - Modelagem do Pára-Raios	81
7.1.1 - Modelo Proposto por Pinceti e Giannetoni (1999).....	82
7.2 - Seleção do Pára-Raios para Linha Seleccionada.....	84
7.2.1 - Seleção das Características Elétricas do Pára-Raios	86
7.3 - Validação do Modelo Proposto por Pinceti e Giannetoni (1999).....	88
Capítulo 8	93
Análise e Simulação da Proteção Realizada pelos Pára-Raios na Linha frente à Ocorrência de Descargas Atmosféricas.....	93
8.1 - Simulações para Determinação do Número e Localização dos Pára-Raios..	93
8.1.1 - Adição de Conjuntos de Pára-Raios nos Extremos da Linha	94
8.1.2 - Adição de 3 Conjuntos de Pára-Raios na Linha.....	98
8.1.3 - Adição de 5 Conjuntos de Pára-Raios na Linha.....	104
8.2 - Análise da Eficiência da Proteção da Linha com 3 Conjuntos de Pára-Raios	111
Capítulo 9	115
Conclusão.....	115
Capítulo 10	119
Referências Bibliográficas	119

Lista de Figuras

Figura 3-1: Nuvem carregada eletricamente.	39
Figura 3-2: Descarga elétrica entre a nuvem e a terra.	41
Figura 3-3: Precursor ou piloto descendente e ponto de impacto da descarga na terra.	42
Figura 3-4: Descarga descendente, com piloto ascendente (à direita) para um ramo lateral da descarga.	43
Figura 4-1: Característica tensão x corrente para o SiC e o ZnO.	48
Figura 4-2: Vista em corte de um pára-raios para sistemas de distribuição.	49
Figura 4-3: Regiões condutoras da característica tensão versus corrente de um resistor a óxido metálico.	51
Figura 4-4: Característica potência consumida versus tempo para resistores a óxido metálico de primeira, segunda e terceira geração.	52
Figura 4-5: Fator de correlação da corrente de fuga com o número de descargas para um resistor a óxido de zinco típico para um surto de $8 \times 20 \mu\text{s} - 400 \text{A}/\text{cm}^2$	53
Figura 4-6: Fator de correlação da corrente de fuga com o número de descargas para um resistor a óxido de zinco típico para um surto de $500 \times 1500 \mu\text{s} - 35 \text{A}/\text{cm}^2$	54
Figura 5-1: Estrutura do Tipo G.	60
Figura 5-2: Estrutura do Tipo A.	60
Figura 5-3: Estrutura do Tipo B.	60
Figura 5-4: Estrutura do Tipo E.	61
Figura 5-5: Estrutura do Tipo HS.	61
Figura 5-6: Estrutura do Tipo HT.	61
Figura 5-7: Tela inicial do componente LCC.	64
Figura 5-8: Entrada dos dados dos condutores do sistema simulado.	65
Figura 5-9: Modelo simplificado da linha.	65
Figura 6-1: Modelo simplificado da linha para simulações de descargas atmosféricas.	68
Figura 6-2: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 2,5kA com resistência do canal de ionização de 1k Ω , aplicada no ponto 2 e medida no ponto 2 da linha.	71
Figura 6-3: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 2,5kA com resistência do canal de ionização de 1k Ω , aplicada no ponto 5 e medida no ponto 2 da linha.	71

Figura 6-4: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 2,5kA com resistência do canal de ionização de 1k Ω , aplicada no ponto 8 e medida no ponto 2 da linha.....	72
Figura 6-5: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 2,5kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 2 e medida no ponto 2 da linha.....	72
Figura 6-6: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 2,5kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 5 e medida no ponto 2 da linha.....	73
Figura 6-7: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 2,5kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 8 e medida no ponto 2 da linha.....	73
Figura 6-8: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 4,5kA com resistência do canal de ionização de 1k Ω , aplicada no ponto 2 e medida no ponto 2 da linha.....	74
Figura 6-9: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 4,5kA com resistência do canal de ionização de 1k Ω , aplicada no ponto 5 e medida no ponto 2 da linha.....	74
Figura 6-10: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 4,5kA com resistência do canal de ionização de 1k Ω , aplicada no ponto 8 e medida no ponto 2 da linha.....	75
Figura 6-11: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 4,5kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 2 e medida no ponto 2 da linha.....	75
Figura 6-12: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 4,5kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 5 e medida no ponto 2 da linha.....	76
Figura 6-13: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 4,5kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 8 e medida no ponto 2 da linha.....	76
Figura 6-14: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 1k Ω , aplicada no ponto 2 e medida no ponto 2 da linha.....	77
Figura 6-15: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 1k Ω , aplicada no ponto 5 e medida no ponto 2 da linha.....	77

Figura 6-16: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 1k Ω , aplicada no ponto 8 e medida no ponto 2 da linha.....	78
Figura 6-17: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 2 e medida no ponto 2 da linha.....	78
Figura 6-18: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 5 e medida no ponto 2 da linha.....	79
Figura 6-19: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 8 e medida no ponto 2 da linha.....	79
Figura 7-1: Modelo recomendado pelo IEEE.....	82
Figura 7-2: Modelo proposto por Pinceti e Giannetoni (1999).	83
Figura 7-3: Característica Vxl do modelo Pinceti e Giannetoni (1999).	84
Figura 7-4: Nível Ceraúnico do Estado de São Paulo.	85
Figura 7-5: Curva de parametrização do resistor não-linear A0.	89
Figura 7-6: Curva de parametrização do resistor não-linear A1.	90
Figura 7-7: Resposta do modelo de Pinceti e Giannetoni (1999) para forma de onda 1,2x50 μ s e corrente de descarga 10 kA.....	90
Figura 8-1: Modelo simplificado da linha com pára-raios instalados nos extremos.....	94
Figura 8-2 Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 5 e medida no ponto 2 da linha com 2 pára-raios instalados.....	95
Figura 8-3: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 5 e medida no ponto 5 da linha com 2 pára-raios instalados.....	95
Figura 8-4: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 5 e medida no ponto 8 da linha com 2 pára-raios instalados.....	96
Figura 8-5: Corrente nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 5 e medida sob o pára-raios 1 da linha.	96
Figura 8-6: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 5 e medida sob o pára-raios 1 da linha.	97

Figura 8-7: Corrente nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 5 e medida sob o pára-raios 2 da linha.	97
Figura 8-8: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 5 e medida sob o pára-raios 2 da linha.	98
Figura 8-9: Modelo simplificado da linha com pára-raios nos pontos 1, 5 e 9.....	98
Figura 8-10: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 5 e medida no ponto 2 da linha com 3 pára-raios instalados.....	99
Figura 8-11: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 5 e medida no ponto 5 da linha com 3 pára-raios instalados.....	100
Figura 8-12: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 5 e medida no ponto 8 da linha com 3 pára-raios instalados.....	100
Figura 8-13: Corrente nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 5 e medida sob o pára-raios 1 da linha.	101
Figura 8-14: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 5 e medida sob o pára-raios 1 da linha.	101
Figura 8-15: Corrente nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 5 e medida sob o pára-raios 2 da linha.	102
Figura 8-16: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 5 e medida sob o pára-raios 2 da linha.	102
Figura 8-17: Corrente nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 5 e medida sob o pára-raios 3 da linha.	103
Figura 8-18: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 5 e medida sob o pára-raios 3 da linha.	103
Figura 8-19: Modelo simplificado da linha com pára-raios nos pontos 1, 3, 5, 7 e 9..	104

Figura 8-20: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 5 e medida no ponto 2 da linha com 5 pára-raios instalados.....	105
Figura 8-21: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 5 e medida no ponto 5 da linha com 5 pára-raios instalados.....	106
Figura 8-22: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 5 e medida no ponto 8 da linha com 5 pára-raios instalados.....	106
Figura 8-23: Corrente nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 5 e medida sob o pára-raios 1 da linha.	107
Figura 8-24: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 5 e medida sob o pára-raios 1 da linha.	107
Figura 8-25: Corrente nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 5 e medida sob o pára-raios 2 da linha.	108
Figura 8-26: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 5 e medida sob o pára-raios 2 da linha.	108
Figura 8-27: Corrente nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 5 e medida sob o pára-raios 3 da linha.	109
Figura 8-28: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 5 e medida sob o pára-raios 3 da linha.	109
Figura 8-29: Corrente nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 5 e medida sob o pára-raios 4 da linha.	110
Figura 8-30: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 5 e medida sob o pára-raios 4 da linha.	110
Figura 8-31: Corrente nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 5 e medida sob o pára-raios 5 da linha.	111

Figura 8-32: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 5 e medida sob o pára-raios 5 da linha. 111

Lista de Tabelas

Tabela 1-1: Cronograma de atividades.	27
Tabela 3-1: Principais Constantes Dielétricas.	40
Tabela 3-2: Correntes de descarga mínimas interceptadas nos quatro níveis de proteção normalizados.	42
Tabela 6-1: Valores máximos de tensão em decorrência da aplicação de descargas atmosféricas.	69
Tabela 7-1: Características dos resistores não-lineares do modelo Pinceti e Giannetoni (1999).	84
Tabela 7-2: Gama de Produtos ABB (ABB, 2004).	85
Tabela 7-3: Características de proteção garantidas do pára-raios EXLIM Q-E (ABB, 2004).	87
Tabela 7-4: Tabela para determinação do valor mínimo de U_r do pára-raios (ABB, 2004).	88
Tabela 7-5: Características de proteção e dos encapsulamentos dos pára-raios EXLIM Q-E (ABB, 2004).	88
Tabela 7-6: Características de A0 e A1 do pára-raios EXLIM Q-E.	89
Tabela 8-1: Valores máximos de tensão e corrente na linha com 2 conjuntos de pára-raios em decorrência da aplicação de descargas atmosféricas.	94
Tabela 8-2: Valores máximos de tensão e corrente na linha com 3 conjuntos de pára-raios em decorrência da aplicação de descargas atmosféricas.	99
Tabela 8-3: Valores máximos de tensão e corrente na linha com 5 conjuntos de pára-raios em decorrência da aplicação de descargas atmosféricas.	104
Tabela 8-4: Valores máximos de tensão e corrente na linha com 3 conjuntos de pára-raios em decorrência da aplicação de descargas atmosféricas.	112

Lista de Siglas, Símbolos e Abreviaturas

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
ATP - *Alternative Transients Program*
CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais
CEMIG D - CEMIG Distribuição S.A.
CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear
CPFL - Companhia Paulista de Força e Luz
DPS - Dispositivo de Proteção Contra Surtos
ELAT - Grupo de Eletricidade Atmosférica
GTMD - Grupo de Trabalhos de Melhoria de Desempenho
INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LD - Linha de Distribuição
LT - Linha de Transmissão
NBI - Nível Básico de Isolamento
ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico
OPGW - *Optical Ground Wire*
SEP - Sistema Elétrico de Potência
SiC - carboneto de silício
SLT - Sistema de Localização de Tempestades
SPDA - Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas
TL - *Transmission Lines*
UnB - Universidade de Brasília
USP - Universidade de São Paulo
ZnO - Óxido de Zinco

Resumo

Araújo, M. A. (2010). **Projeto de um Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas para uma Linha de Transmissão de 69 kV**. São Carlos, 2010. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Em países de dimensões continentais, como o Brasil, onde as principais fontes de energia elétrica são de origem hidráulica, é necessária a construção de extensas linhas de transmissão (LTs) que interliguem tais fontes aos principais centros consumidores. Desta forma, o percurso destas linhas pode compreender regiões com características orográficas bastante diversificadas e com constantes variações climáticas ocasionando interações com fenômenos eletromagnéticos indesejáveis, tais como as descargas atmosféricas, as quais são as principais responsáveis por desligamentos não programados de linhas aéreas de transmissão de energia, em virtude da sua incidência nos condutores ou nas torres de transmissão.

É neste contexto que se insere esta pesquisa por meio do desenvolvimento de um Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) para proteção de uma linha de transmissão real que conecta a uma usina de pequeno porte a uma subestação para distribuição de energia.

Ressalta-se que no decorrer deste trabalho de conclusão de curso a linha de transmissão mencionada foi modelada e simulada dispondo-se do programa computacional ATP (*Alternative Transients Program*), através da interface gráfica ATPDraw. Ademais, foi empregado o modelo JMarti para as simulações de descarga atmosférica e o modelo Pinceti para representar as características dinâmicas dos pára-raios e simulá-los, como será visto no decorrer deste relatório.

Além disso, para o desenvolvimento de um SPDA foram feitas simulações de descarga atmosféricas, cálculo das sobretensões causadas pelas mesmas e análise dos seus resultados, para que se pudesse realizar a modelagem computacional dos pára-raios no programa ATPDraw, o dimensionamento e localização dos mesmos ao longo linha, e promover novas simulações de descargas atmosféricas com o intuito de verificar e analisar o projeto de proteção dos pára-raios para a linha escolhida.

Palavras-chave: ATPDraw, Descargas Atmosféricas, Pára-Raios, SPDA, Transmissão de Energia Elétrica.

Abstract

Araújo, M. A. (2010). **Project of a Lightning Protection System of a 69 kV Transmission Line.** São Carlos, 2010. Course Conclusion Project – Engineering School of São Carlos, University of Sao Paulo.

In huge countries, as Brazil, where the main energy sources have hydraulic origin, it is necessary the construction of extensive transmission lines (TLs) that interconnect these sources with the main consumption centres. As a consequence, the route of these lines can embrace regions with diversified orographic characteristics and constant climatic variations causing interactions with undesirable electromagnetic phenomena, as atmospheric discharges, that are the main responsible for unscheduled outages of overhead energy transmission lines due to the incidence on conductors or on transmission towers.

It is in this context that this research is inserted through the development of a Lightning Protection System for the protection of a transmission line that connects to a small plant to a substation for power distribution.

It should be noted that during this conclusion course project, the mentioned transmission line has been modeled and simulated with the computational software ATP (Alternative Transients Program), through the graphic interface ATPDraw. Furthermore, the JMarti model was used for the simulations of atmospheric discharges and the model developed by Pinceti was used to represent the dynamic characteristics of lightning rod and simulate them, as will be seen throughout this report.

Moreover, for the development of a lightning protection system, simulations of atmospheric discharges were performed, as well as overvoltage calculations caused by them and analysis of their results, so that, it was possible to perform the computational modelling, using the software ATPDraw, the sizing and the location of the lightning rod along the transmission line, and promote new simulations of atmospheric discharges, with the objective of verify and analyse the protection project for the lightning rod for the chosen line.

Keywords: Atmospheric Discharge, ATPDraw, Electric Power Transmission, Lightning Rod.

Capítulo 1

Introdução

Cada vez mais os critérios de confiabilidade e continuidade do fornecimento de energia elétrica, apontados e requeridos nos procedimentos normativos do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) têm sido objeto de estudos e pesquisas tendo sua ênfase aumentada já que a dependência da qualidade de vida e do progresso econômico estão ainda mais atrelados à qualidade dos serviços relacionados à energia elétrica, tornando a mesma indispensável ao homem, e também pela sedimentação do novo modelo do setor elétrico, voltado para o desenvolvimento sustentável e a responsabilidade ambiental.

Muitos recursos têm sido investidos em estudos e desenvolvimento de técnicas para melhorar a qualidade do serviço público de energia elétrica, em particular, os estudos de proteção e coordenação de isolamento têm por finalidade adaptar a suportabilidade dos equipamentos das subestações, linhas de transmissão e linhas de distribuição frente às sobretensões as quais estão sujeitos. Contudo, os critérios econômicos têm sido de grande importância na tomada de decisão neste campo, pois se procura o melhor cenário entre a proteção dos sistemas elétricos e o respectivo custo.

É neste contexto que se insere o estudo e desenvolvimento dos sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (SPDAs) para proteção e coordenação de isolamento de linhas de transmissão, de distribuição e subestações contra desligamentos não programados em virtude, sobretudo, da incidência de descargas atmosféricas nos condutores ou nas torres de transmissão. Nesta conjuntura os SPDAs tradicionalmente têm sido designados por pára-raios, os quais têm como objetivo encaminhar a energia do raio, desde o ponto em que ele atinge a edificação, instalação ou equipamento, até o aterramento, da forma mais rápida e segura possível.

Não obstante, estima-se que as descargas atmosféricas causem ao Brasil atualmente um prejuízo de milhões de reais. Esta é a conclusão do Grupo de Eletricidade Atmosférica (ELAT) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), que realizou um estudo junto às empresas do setor elétrico, telecomunicações, seguro, equipamentos eletro-eletrônicos, construção civil, aviação, agricultura, pecuária, entre outras, concluindo que os raios causam prejuízos anuais de aproximadamente um bilhão de dólares. O maior

prejudicado é o setor elétrico com a queima de equipamentos, perda de faturamento, aumento das despesas de manutenção e penalizações. Seu prejuízo está avaliado em cerca de 600 milhões de reais, seguido pelas empresas de telecomunicações, com cerca de 100 milhões de reais, e as empresas seguradoras de eletro-eletrônicos, com cerca de 50 milhões de reais cada. Considerando que no país ocorram cerca de 60 milhões de raios por ano, em média cada raio representa um prejuízo de 10 reais ao setor elétrico.

Tendo em vista este contexto, destacam-se na proteção dos sistemas elétricos de potência (SEP), durante sobretensões causadas por descargas atmosféricas, os pára-raios, os quais desempenham um importante papel em limitar o nível de tensão, protegendo as subestações, linhas de transmissão e equipamentos elétricos, conduzindo o excesso de corrente do sistema para a terra. A capacidade de absorção de energia devido às sobretensões está diretamente relacionada com a vida útil do pára-raios e, por conseguinte, com a efetiva proteção oferecida ao sistema. O dimensionamento incorreto do equipamento pode levar a danos nos seus componentes como fissuras, quebra do resistor ou mesmo instabilidade térmica.

Posto isto, pode-se definir que o objetivo deste trabalho de conclusão de curso é estabelecer uma metodologia capaz de proteger linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas por meio da implantação de um SPDA baseado na utilização de pára-raios. Para tanto, serão realizadas simulações de descargas atmosféricas na linha de transmissão sob estudo a fim de determinar as máximas sobretensões na mesma; dimensionar os pára-raios a serem implementados a partir das sobretensões averiguadas; estudar qual a melhor localização dos mesmos ao longo da linha; analisar qual o número de pára-raios necessários; e avaliar o projeto do SPDA por meio da análise das simulações de descargas atmosféricas diretas realizadas após a inserção dos pára-raios na linha empregando-se o *software* ATPDraw.

Para atingir tais objetivos, o presente projeto foi dividido conforme o cronograma abaixo:

1. Estudo dos modelos de SPDA e levantamento bibliográfico sobre técnicas e normas para o seu desenvolvimento;
2. Estudo e levantamento bibliográfico dos modelos de pára-raios e seleção do modelo mais adequado à linha estudada;
3. Modelagem computacional dos pára-raios no programa ATPDraw e realização de simulações de descargas atmosféricas, cálculo das sobretensões causadas pelas mesmas e análise dos resultados;

de transmissão estudada, e por meio destas sobretensões definir qual a mais elevada e em que ponto ocorre para modelar os pára-raios a serem implementados.

No sétimo capítulo serão contemplados os requisitos necessários para modelar um pára-raios no *software* ATPDraw, além de uma visão sobre os varistores de óxido de zinco e da configuração do modelo de pára-raios proposto por Pinceti e Giannetoni (1999), para enfim determinar quais as características elétricas do pára-raios necessário a linha real selecionada e realizar a validação do mesmo.

No oitavo capítulo serão apresentadas as simulações de descargas atmosféricas na linha após a instalação dos pára-raios na mesma e por meio dessas simulações será determinado o número de pára-raios necessário para proteção da linha e a localização dos mesmos. Também serão avaliadas as sobretensões geradas pelas descargas frente à proteção realizada pelos pára-raios a fim de diagnosticar a eficiência dos mesmos.

No nono capítulo serão expostas as conclusões desta pesquisa de implementação de um SPDA na linha real escolhida por meio da instalação de pára-raios na mesma.

Por fim, no décimo capítulo será ilustrada a lista de referências bibliográficas utilizada para a realização deste trabalho de conclusão de curso.

Capítulo 2

Levantamento Bibliográfico

A seguir serão apresentados os principais resultados do estudo bibliográfico realizado no desenvolvimento deste projeto de conclusão de curso. Tal estudo foi de fundamental importância para que se pudesse aprimorar o conhecimento do tema principal do trabalho em questão e realizar a escolha das metodologias, abordagens e técnicas que deverão ser adotadas para o desenvolvimento do mesmo, procurando conciliá-las e adequá-las com os objetivos propostos.

2.1 - ORGANIZAÇÃO DO ESTUDO BIBLIOGRÁFICO

As pesquisas bibliográficas realizadas levaram à análise de vários temas relacionados à proteção de linhas de transmissão contra descargas atmosféricas e implantação de pára-raios de óxido de zinco (ZnO) em linhas aéreas de energia. Esses temas são os seguintes:

- Levantamento de estruturas que necessitam de SPDA e análise de seus efetivos sistemas de proteção;
- Aplicação e desempenho de linhas de transmissão que utilizam pára-raios de ZnO;
- Sistemas de proteção contra descargas atmosféricas e aterramento;
- Melhoria de desempenho de linhas de transmissão sob a ação de descargas atmosféricas.

2.2 - SISTEMAS DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS, PÁRA-RAIOS E ATERRAMENTO

Brittes e Ribeiro (1999) apresentam o resultado de um projeto de pesquisa e desenvolvimento para criação de uma metodologia a fim de determinar o desempenho de linhas de transmissão com utilização de pára-raios de ZnO, permitindo definir a quantidade desses equipamentos a serem utilizados e analisar a configuração mais adequada, e ainda

fornecem um roteiro de implantação do modelo na prática em uma linha de transmissão existente da CPFL. Com o objetivo de avaliar a metodologia e as ferramentas desenvolvidos neste projeto, que resultaram no programa de cálculo de desempenho de linhas, foi estudada a viabilidade de aplicação de pára-raios de ZnO, nas linhas de transmissão do sistema da CPFL com as seguintes características: LT 138 kV Viracopos - Trevo, circuito duplo, com pára-raios. Destaca-se que para a realização e execução deste projeto foi necessário avaliar os seguintes dados da linha em estudo: configuração dos condutores e pára-raios, se existentes, seções da torre e de meio vão; características dos condutores, pára-raios e cadeias de isoladores, tipo e geometria das torres; resistências de aterramento, caracterizando tipo, configuração e resistência dos eletrodos de terra; e os dados da região em que a linha se encontra, tais como nível cerâmico, ou densidade de descargas para terra, e perfil topográfico.

Para comparação com os índices de desligamento verificados no período de 1986 a 1992, conforme os registros disponíveis referentes ao desempenho da LT em questão foram realizadas simulações com e sem a instalação dos pára-raios empregando o *software* ATP, e verificada a eficiência dos mesmos na proteção da linha promovendo a redução de 50% a 70% dos desligamentos da LT em decorrência de impulsos atmosféricos. Sendo assim, as taxas de desligamentos de linhas, com a aplicação destes equipamentos, deverão ser reduzidas a níveis aceitáveis, avaliados de forma relativa, considerando-se os resultados dos casos em que não estão presentes os pára-raios de ZnO.

Silva e Junior (2004) abordam as diversas técnicas e modelos de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas e sistemas de aterramento, bem como métodos de otimização de seus resultados por meio de um embasamento teórico sólido e consistente. Discorre-se que para o bom funcionamento de um sistema elétrico, seja na área de potência ou na área de telecomunicação ou até mesmo em pequenos sistemas como uma sala com computadores em rede, é imprescindível um bom sistema de proteção contra descargas atmosférica e um bom sistema de aterramento. Embora aparentemente simples, os sistemas de proteção devem levar em consideração muitas variáveis, com o objetivo de garantir a continuidade do funcionamento dos sistemas onde são empregados. No decorrer desse trabalho são apresentados os conceitos de aterramento com sua finalidade, requisitos e pontos de aplicação, levando em conta o campo magnético, o potencial de passo e de toque, o escoamento da malha e os fatores que influenciam no aterramento. Também é estudada a resistividade do solo, os meios de medi-la e a influência da umidade e temperatura sobre a mesma a fim de se determinar qual melhor tratamento para diminuí-la. Não obstante, são apresentados os tipos de pára-raios com suas características relevantes, princípios de funcionamento, requisitos para instalação, dimensionamento e localização, e a resolução da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) proibindo o

uso de pára-raios radioativos. Com isso, através dos conceitos apresentados sobre pára-raios torna-se possível constituir em conjunto com um sistema de aterramento um SPDA robusto e eficiente frente à ocorrência de descargas atmosféricas.

Andrade et. al. (2005) apresentam as ações que vem sendo desenvolvidas pelo Grupo de Trabalhos de Melhoria de Desempenho de LTs (GTMD) da CEMIG no sentido de reduzir os impactos provocados pelas descargas atmosféricas no sistema elétrico da empresa. A CEMIG D possui cerca de 16.119 km de linhas de transmissão, nas tensões que variam de 34,5 a 161 kV. O elevado índice de descargas atmosféricas no estado de Minas Gerais, aliado a altas resistividades do solo, tem sido a causa principal do mau desempenho das linhas, sendo responsável por cerca de 75% de seus desligamentos. O GTMD de LTs da CEMIG vem, há mais de 10 anos, estudando e buscando implantar melhorias de desempenho em linhas de transmissão que sofrem acentuadamente a ação de descargas atmosféricas. No passado, as ações adotadas eram apenas medidas tradicionais de melhoria de desempenho, atuando na melhoria do aterramento, da resistividade do solo, da blindagem, no nível básico de isolamento (NBI) da cadeia, etc. Essas medidas nem sempre foram suficientes para conseguir a melhoria de desempenho almejada. Com o surgimento dos pára-raios de ZnO, de corpo polimérico, tornou-se possível a execução de melhorias significativas de desempenho por meio da limitação de sobretensão nos terminais da cadeia de isoladores. Foram instalados pára-raios de ZnO em 6 LTs da CEMIG, tendo sido obtidos resultados excelentes no desempenho dessas linhas. Os estudos para execução de melhoria de desempenho foram feitos buscando-se, em primeiro lugar, a adoção de medidas convencionais, as quais seriam: melhoria do aterramento através do redimensionamento dos cabos contrapesos e sistema de aterramento; melhoria da resistividade do solo na região dos cabos contrapesos, através da adição de redutor de resistividade, p. ex. bentonita; melhoria da blindagem, através do redimensionamento do sistema de pára-raios; e melhoria do sistema de isolamento; redimensionando as cadeias de isoladores. Em uma segunda fase, se as medidas convencionais não são suficientes para a melhoria desejada de seu desempenho, estudos e simulações são realizadas visando a instalação de pára-raios de ZnO, utilizando um enfoque técnico-econômico para sua aplicação. São levantados os trechos críticos da LT, considerando o perfil, a distribuição de resistências de aterramento, o levantamento do histórico de manchas de descargas atmosféricas através do Sistema de Localização de Tempestades (SLT) e a localização de faltas. São executadas simulações para os trechos críticos, visando uma otimização do número de pára-raios de ZnO/estrutura *versus* custo de melhoria de desempenho.

Na CEMIG já foram instalados pára-raios de ZnO em seis LTs, sendo que cada LT teve uma característica de instalação diferente. Somente uma LT, a LT3 Ouro Preto 2 -

Taquaril 138 kV, teve pára-raios de ZnO instalados em todas as fases e em todas as estruturas da linha, onde se pôde verificar a excelência na melhoria de seu desempenho.

Enfim, os estudos de melhoria de desempenho para linhas de transmissão sob a ação de descargas atmosféricas, realizados pela CEMIG, trouxeram excelentes benefícios para a operação do sistema e para a qualidade da energia fornecida aos consumidores atendidos pelas LTs onde as melhorias recomendadas pelos estudos foram implantadas. O GTMD recomenda que, nas ampliações de sistema previstas pelo planejamento para uma determinada região, deve-se procurar contemplar as ações relativas a melhorias de desempenho de LTs da região de abrangência das ampliações.

Miranda et. al. (2007) descrevem as ações desenvolvidas e executadas visando à melhoria de desempenho da LT Guilman Amorim – Ipatinga 1, 230 kV, e a eficiência da metodologia utilizada em termos de resultados e ganhos para a operação e manutenção da mesma frente à ocorrência de descargas atmosféricas.

A LT Guilman Amorim - Ipatinga 1, 230kV da CEMIG percorre uma região com alta resistividade do solo e alto índice de incidência de descargas atmosféricas. Com o objetivo de melhorar seu desempenho, desenvolveu-se uma série de ações: aplicação de metodologia não-convencional para seleção de estruturas críticas para o desempenho da linha, reconstituição do aterramento, reestricamento de cabo *Optical Ground Wire* (OPGW) e instalação de pára-raios de óxido de zinco em pontos críticos selecionados.

De 1998 a 2001, a LT Guilman Amorim apresentava um desempenho frente a descargas atmosféricas não satisfatório em virtude dos repetidos desligamentos. A cada ocorrência verificava-se um afundamento de tensão e conseqüente rejeição de carga na região leste do estado. Em função disso, os grandes consumidores atingidos apresentavam freqüentes reclamações junto à CEMIG. Além disso, desses desligamentos foi verificado que em 90% dos casos havia descargas atmosféricas ocorrendo no trecho da LT onde os desligamentos foram localizados.

A melhoria de desempenho da linha consistiu de várias medidas, sendo a principal a aplicação da metodologia do índice de severidade desenvolvida em pesquisa dentro de uma concepção moderna e inovadora, que utiliza informações de descargas atmosféricas providas pelo SLT e parâmetros da linha para determinar as torres mais críticas que requerem o foco na manutenção.

Tal projeto, que foi concluído com sucesso em setembro de 2005, teve foco principalmente na melhoria de aterramento de algumas torres da linha, reestricamento de um trecho de cabo OPGW e instalação de pára-raios de óxido de zinco em alguns pontos. Desde então, houve uma redução no número de desligamentos por descargas atmosféricas, melhoria de até 80% de alguns de seus índices de desempenho e redução de reclamações por parte dos consumidores. Nesse projeto, a localização e a disposição dos

pára-raios foram determinadas através de estudos específicos e simulações realizadas pela área de Planejamento de Operação da CEMIG com base nas informações históricas a respeito do desempenho da LT. Nesta informações, foi constatado que a taxa de desligamentos da linha com a aplicação de três pára-raios por estrutura seria baixa e associada somente à taxa de falhas do pára-raios.

Com a execução e análise do projeto implementado pela CEMIG averiguou-se que o desempenho da LT Guilman Amorim obteve considerável melhoria com os serviços executados em trechos críticos determinados pelo índice de severidade, que por sua vez mostrou-se eficiente e coerente com as informações do localizador de faltas, e nos trechos mais críticos onde foram instalados pára-raios de óxido de zinco até então não foram constatados desligamentos.

Delaiba et. al. (2009) expõem estudos nos quais são analisados os efeitos das sobretensões geradas por descargas atmosféricas incidentes diretamente nas linhas de alta (88kV) e média tensão (13,8kV). Os efeitos destes impactos são analisados nas regiões de média tensão nas quais está uma grande quantidade de consumidores industriais e residenciais. Nestas análises foram avaliadas a influência das resistências de aterramento no valor do nível da tensão de surto induzida, sendo que todas as modelagens e simulações do sistema estudado foram feitas através do *software* ATP. Neste artigo, optou-se por estudar casos considerando descargas atmosféricas com incidência direta nos circuitos em 13,8 kV, pois se tratam dos casos com sobretensões de surto mais severas e com maiores potenciais causadores de danos a equipamentos de consumidores. Quanto aos circuitos secundários, abaixo de 600 V, estes são posicionados em alturas inferiores às dos condutores da rede primária. Por isso, esta última normalmente funciona como blindagem, tornando rara a incidência direta de descargas atmosféricas nas redes de baixa tensão. De acordo com os resultados analisados, pode-se destacar que, em relação à descarga atmosférica incidente no cabo fase (88kV), os níveis de tensão de surto observados no primeiro e segundo transformadores não ultrapassaram a suportabilidade destes equipamentos. Entretanto, para o terceiro transformador fez-se necessária a inserção de pára-raios. Dado ao fenômeno de reflexão de onda, tal transformador, por estar alocado no final da linha de distribuição, teve seu nível básico de isolamento (NBI) ultrapassado, sendo assim, ressalta-se a necessidade de atenção especial com equipamentos alocados nesta situação. Em relação à descarga atmosférica incidente na linha de distribuição (13,8kV), no lado primário dos transformadores de distribuição, todos os níveis de tensão de surto ultrapassaram o NBI destes equipamentos, sendo necessária a inserção de pára-raios de proteção nos três transformadores. Para o lado da baixa tensão (220 V), verificou-se que, sem a adição de supressor de surto, os níveis de tensão de surto são demasiadamente elevados, apresentando piora para a resistência de 100 Ω . Contudo,

a adição do supressor de surto mostrou-se bastante eficaz, pois o nível de tensão de surto sofreu uma redução drástica, além de apresentar também uma tendência de crescimento conforme se aumenta o valor da resistência de terra. Para os casos apresentados, pode-se ressaltar que o valor da resistência de aterramento dos transformadores de distribuição possui influência direta no nível da tensão de surto que atinge a baixa tensão. Quanto maior o valor desta resistência maior será o nível da tensão de surto que reflete na baixa tensão devido à incidência de descargas atmosféricas.

Galvão et. al. (1997) mostram os estudos desenvolvidos num âmbito de cooperação científica entre Eletrobrás Furnas e USP para determinar as condições de aplicação, tipo e valores nominais de pára-raios de linha, visando a sua aplicação em algumas linhas de transmissão em 138 kV para melhorar o seu desempenho frente a surtos atmosféricos. Descrevem-se os cálculos efetuados para definir as características dos pára-raios, sua posição ao longo da linha e o desempenho operativo da linha antes e após a instalação de pára-raios. São apresentadas também algumas considerações com relação a custos e confiabilidade destes equipamentos. Dessa forma, no desenvolvimento do trabalho foram analisados os seguintes itens: determinação da influência do posicionamento dos pára-raios nas fases, ou em torres específicas, sobre os índices de desligamentos da linha e sobre os níveis de absorção de energia dos pára-raios; avaliação comparativa da utilização dos pára-raios de linha em relação aos métodos clássicos de controle dos desligamentos para as descargas atmosféricas; levantamento das características geométricas e elétricas das linhas de transmissão e topográficas da região; análise da utilização de pára-raios com ou sem centelhador e avaliação do desempenho da linha frente a descargas atmosféricas sem pára-raios nas cadeias de isoladores, englobando análises que identificam regiões críticas. Por meio de tais considerações concluiu-se que pára-raios instalados em uma torre não propiciam uma ajuda significativa a torres adjacentes sem pára-raios, a eficácia da aplicação de pára-raios para a redução do número global de desligamentos da linha diminui consideravelmente na hipótese de sua instalação em torres intercaladas, e tendo-se resistências de aterramento diferentes ao longo do trecho, os pára-raios devem ser prioritariamente instalados nas torres de maior resistência de aterramento. Quanto aos valores nominais dos pára-raios, verificou-se, para a faixa de 108 kV – 144 kV, influência não significativa nos índices de desligamento. A mesma conclusão foi obtida no que se refere à presença ou não de centelhador externo. Dessa forma, a definição do tipo e características do pára-raios não é influenciada por este aspecto. No artigo em questão, preferencialmente foi estudado o caso de pára-raios sem centelhador, e deste modo o pára-raios com centelhador foi analisado de modo simplificado. Quanto ao circuito duplo, apesar das simulações terem sido executadas para uma resistência de aterramento de valor baixo, verifica-se a grande contribuição que a instalação de apenas um pára-raios na fase inferior

de um dos circuitos pode trazer para reduzir principalmente o número de desligamentos simultâneos dos circuitos.

Capítulo 3

Descargas Atmosféricas

O acúmulo de cargas elétricas nas nuvens geralmente resulta em descargas à terra promovendo temor e medo aos seres humanos, porém é um fenômeno natural que ocorre em todas regiões do planeta, sobretudo nas regiões tropicais do mesmo, onde está localizado o Brasil.

Dessa forma, tendo como base Coutinho e Altoé (2003), no presente capítulo serão expostos os conceitos básicos sobre descargas atmosféricas, como ocorre a formação das cargas nas nuvens e dos raios, como acontecem as descargas elétricas nuvem/terra, o que é o efeito plasma, e em que tipo de solo há maior incidência de raios.

3.1 - CONCEITOS BÁSICOS

- Descarga atmosférica: descarga elétrica de origem atmosférica entre uma nuvem e a terra ou entre nuvens, consistindo em um ou mais impulsos de vários quiloampères.
- Raio: um dos impulsos elétricos de uma descarga atmosférica para a terra.
- Relâmpago: luz gerada pelo arco elétrico do raio.
- Trovão: ruído produzido pelo deslocamento do ar devido ao súbito aquecimento causado pela descarga do raio.
- Índice Ceraúnico (IC): é, por definição, o número de dias de trovoadas, em determinado lugar, por ano.
- Isoceraúnicas: são linhas (curvas) que ligam pontos (localidades) que têm o mesmo índice ceraúnico.
- Densidade de Raios (D_R): é a quantidade de raios que caem por ano em 1 km² de área, e é calculado pela fórmula da Equação 3.1:

$$D_R = 0,0024 \times IC^{1,63}$$

Equação 3.1

3.2 - FORMAÇÃO DAS CARGAS NAS NUVENS

Atualmente, apesar de todos os estudos sobre a formação das descargas elétricas a formação das cargas nas nuvens é um fenômeno ainda não totalmente experimentado e conhecido, entretanto desenvolveram-se várias teorias a respeito de tal tema.

Segundo Coutinho e Altoé (2003, p. 6), pondera-se que a Terra possui cargas negativas em excesso o que a torna um referencial negativo. Não obstante, é sabido que as correntes de ar ascendentes carregam consigo grande quantidade de umidade que ao encontrar-se com temperaturas mais baixas em regiões mais altas se condensa levando à formação de gotículas de água suspensas na atmosfera, as quais se agrupam até formar formarem gotas maiores. Em tais gotas são induzidas cargas positivas na sua parte inferior e cargas negativas na sua parte superior, tendo em vista o referencial negativo proporcionado pela Terra. Ao atingirem aproximadamente cinco milímetros de diâmetro essas gotas se tornam instáveis e se fragmentam em gotículas menores promovendo a distribuição dos seus íons positivos na parte inferior e dos íons negativos na parte superior.

Posteriormente os íons positivos e as gotículas de água carregadas pelas correntes de ar ascendentes colidem promovendo a entrega de elétrons das gotas neutras para os íons positivos neutralizando-os e tornando a gota ascendente positiva. Como estas gotas se movem ascendentemente com elevada energia cinética, elas conseguem chegar até a parte superior das nuvens, contudo, os íons negativos ficam aglomerados na parte inferior das nuvens em virtude da sua menor energia cinética como pode ser visto na Figura 3-1, sendo que aproximadamente 95% das nuvens ficam carregadas dessa forma.

Grande parte das nuvens, por serem muito amplas e vastas, podem formar vários conglomerados de cargas elétricas, podendo se partir em nuvens menores com cargas positivas e negativas, nuvens com cargas positivas, nuvens com cargas negativas, e nuvens com cargas positivas e negativas não equilibradas.

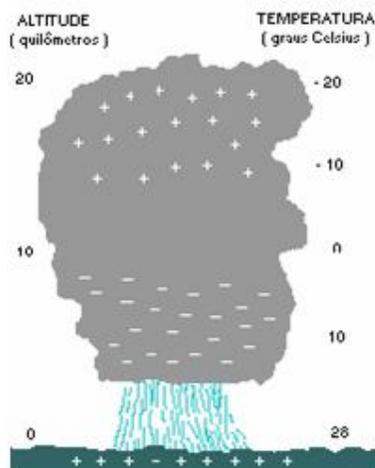


Figura 3-1: Nuvem carregada eletricamente.

Dessa forma, como já se conhece melhor como se formam as cargas nas nuvens, pode-se visualizar o processo de descarga e formação do raio.

3.3 - FORMAÇÃO DO RAIOS

Como visto anteriormente, a parte inferior da nuvem carrega-se negativamente, logo se induz uma concentração de cargas positivas no solo com área equivalente ao tamanho da nuvem carregada negativamente, e que acompanha o movimento da mesma ao ser arrastada pelo vento, fazendo com que as cargas positivas desloquem-se escalando árvores, prédios, pessoas, pontes, morros, pára-raios, e carros.

Não obstante, segundo Coutinho e Altoé (2003, p. 8) o ar é considerado um dos melhores isolantes entre os que existem quando submetido a baixas diferenças de potencial, entretanto, para altas diferenças de potencial o mesmo começa a conduzir eletricidade. Dessa maneira, se pode classificar o ar como um dielétrico, uma vez que não existe um isolante elétrico perfeito que nunca conduz eletricidade, já que todos os materiais podem ser isolantes ou condutores, uns melhores que outros, dependendo da tensão elétrica a eles aplicada. Cabe aqui lembrar que os dielétricos são substâncias que possuem alta resistência ao fluxo da corrente elétrica, pois não existem cargas livres na sua estrutura interna. A Tabela 3-1 apresenta algumas das constantes dielétricas mais utilizadas:

Tabela 3-1: Principais Constantes Dielétricas.

Material	Constante Dielétrica	Campo de Ruptura V/cm
Ar	1	3×10^4
Óleo	2,3	$1,5 \times 10^5$
Papel	3	2×10^5
Porcelana	7	2×10^5
Vidro	6	3×10^5
Parafina	2	3×10^5
Quartzo fundido	4	4×10^5
Polietileno	2,6	5×10^5
Mica	6	2×10^6

Além disso, de forma ilustrativa imagina-se a aplicação de um campo elétrico em um corpo isolante, que no caso em estudo é o ar, sobrepondo-o entre dois pólos eletrizados de sinais opostos, neste caso o chão e as nuvens. Assim, atuará sobre os elétrons do ar uma força elétrica tendendo a arrancá-los dos seus átomos. Segue então, que se o campo elétrico aplicado for intenso o bastante, os elétrons serão arrancados e se tornarão elétrons livres, de maneira que se criará um amplo número de íons positivos e negativos no ar. Dessa maneira, em virtude da existência destes íons, o ar se tornará condutor de eletricidade fazendo com que seja possível o aparecimento de corrente elétrica, que se apresentará na forma de raios.

Ademais, em condutores elétricos eletrizados as cargas elétricas se concentram nas suas pontas tornando o campo elétrico nessas regiões mais intenso do que nas demais. Com isso, a força de repulsão elétrica entre as cargas sofre significativo aumento acarretando a expulsão das cargas elétricas das pontas, as quais passam a escoar para fora do condutor e se deslocar livremente pelo o ar. É neste momento que a descarga elétrica se dá com a aproximação destes dois canais e o rompimento da resistência do ar fazendo com que ocorra maior ionização do mesmo ao longo do percurso da descarga e facilitando a condução de eletricidade entre nuvem e solo. Depois disso, ao chegar entre 20 m e 50 m a ponta do líder, ou seja, do raio principal da descarga acarreta o surgimento de outra descarga, chamada descarga de conexão, a qual parte do solo fechando o circuito que liga a terra à nuvem.

Outrossim, os acontecimentos acima descritos são tão rápidos que o olho humano não consegue distinguir suas etapas, uma vez que o raio piloto constituído descarrega parte da carga da nuvem no solo com velocidade de aproximadamente 1.500 km/s, e após essa descarga, um canal de ar ionizado de baixíssima resistência elétrica forma-se entre a nuvem e a terra, curtocircuitando-as e acarretando a descarga principal, ou descarga de

retorno, que vai da terra para a nuvem com velocidade de 30.000 km/s, como se vê na Figura 3-2.

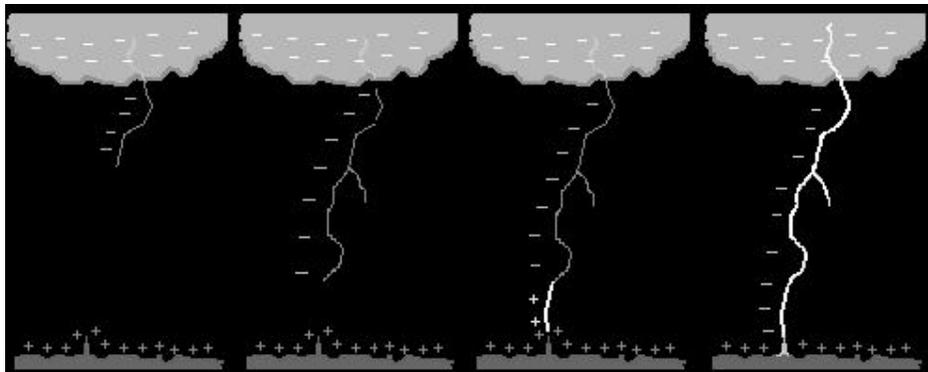


Figura 3-2: Descarga elétrica entre a nuvem e a terra.

Ressalta-se que no raio principal a amplitude dos picos de corrente pode alcançar valores entre 2.000 e 200.000 Ampères, sendo ainda possível a ocorrência de uma terceira descarga de curta duração com correntes entre 100 e 1.000 Ampères, completando, com as três descargas, a formação dos temidos raios.

Além disso, é sabido que próximo à Linha do Equador, da totalidade de raios de uma tempestade, a maioria ocorre entre nuvens, ou seja, paralelamente à superfície da terra, mas à medida que a latitude aumenta, essa tendência diminui.

3.4 - DESCARGA ELÉTRICA NUVEM/TERRA

3.4.1 - PRECURSOR

Segundo Coutinho e Altoé (2003, p. 13) um piloto descendente (precursor), ou seja, um canal condutor ionizado, que caminha por saltos sucessivos em direção à terra origina-se a partir da ruptura do dielétrico formado pelo ar no momento em que o potencial de uma nuvem carregada relativamente à terra ultrapassa determinado valor. Esta descrição só é possível através de uma técnica fotográfica adequada a qual mostra uma linha quebrada descendente de trechos retilíneos com orientações aleatórias, já que tais orientações dependem das heterogeneidades no entorno da cabeça de cada trecho precedente, como mostram a Figura 3-3 e a Figura 3-4.

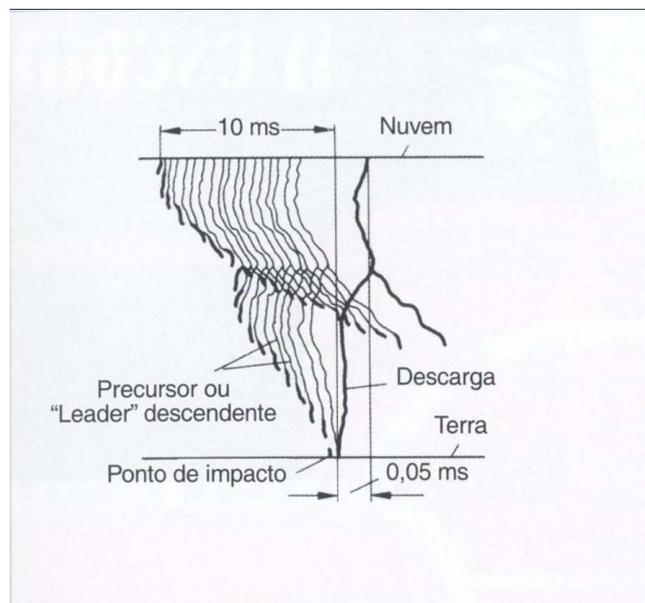


Figura 3-3: Precursor ou piloto descendente e ponto de impacto da descarga na terra.

De igual maneira, por meio do exame de fotos de várias descargas depreendeu-se que o comprimento de cada salto R é função da carga da nuvem que origina essa descarga, como pode ser visto na Tabela 3-2 que evidencia tais valores para correntes de descarga mínimas interceptadas nos quatro níveis de proteção normalizados. Salienta-se que os valores da porcentagem de raios captados resultaram de investigação de 2721 descargas ocorridas no hemisfério norte e realizada em 1945, logo no Brasil tais porcentagens devem ser diferentes.

Tabela 3-2: Correntes de descarga mínimas interceptadas nos quatro níveis de proteção normalizados.

Comprimento de cada salto R para as correntes de descarga mínima interceptadas nos quatro níveis de proteção normalizados			
Nível de Proteção	Corrente de Raio (kA)	Comprimento do Salto (m)	% de Raios Captados
I	3,7	20	-98
II	6,1	30	-80
III	10,6	45	-70
IV	16,5	60	-60

Por fim, tendo em mente que os raios avançam por saltos com direções aleatórias e com comprimentos de dezenas ou até centenas de metros, o seu ponto de impacto só é definido no último salto, portanto quanto maior a corrente do raio mais facilmente o mesmo é captado.

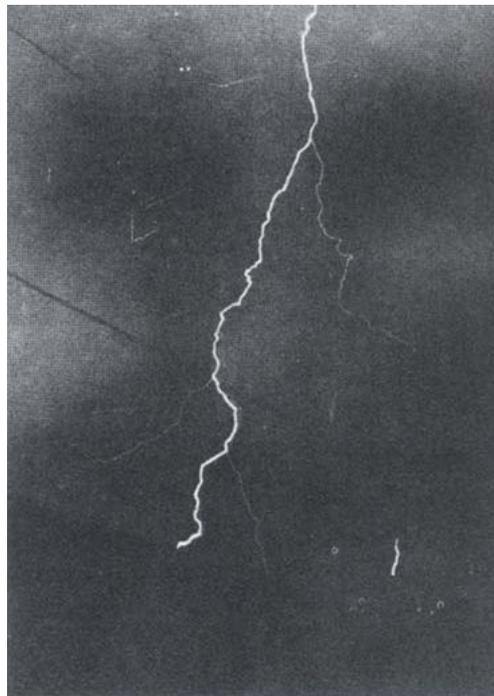


Figura 3-4: Descarga descendente, com piloto ascendente (à direita) para um ramo lateral da descarga.

3.4.2 - ÚLTIMO SALTO

Novamente, segundo Coutinho e Altoé (2003, p. 16) sabe-se que o último salto da descarga fecha o circuito entre a nuvem e o ponto de impacto na terra, o qual faz as vezes de captor de descarga, sendo que podem ocorrer descargas sucessivas pelo mesmo canal condutor em curtos espaços de tempo.

Em tempestades, por exemplo, durante o avanço do piloto descendente à terra, o campo elétrico existente na superfície do captor faz surgir um piloto ascendente aumentando a eficácia do mesmo ao fechar o circuito de descarga através do encontro dos dois pilotos.

Além disso, os captores geram pilotos ascendentes, os quais podem atingir metros ou até quilômetros de comprimento, quando da aproximação da descarga iminente fazendo que o ponto de fechamento do circuito se distancie do mesmo, o que também aumenta sua eficiência.

3.5 - DESCARGA

Os relâmpagos podem originar-se de uma ou várias descargas, chamadas descargas de retorno, sendo que no primeiro caso ele é chamado de relâmpago simples e, no segundo, de relâmpago múltiplo.

As descargas ou correntes de retorno são responsáveis por neutralizar as cargas aglomeradas nas nuvens, uma vez que partem da terra e são extremamente intensas, porém poderão ocorrer novas descargas se as cargas transferidas forem insuficientes. Dessa forma, a descarga, propriamente dita, ao contrário do precursor, se desenvolve da terra para a nuvem, como se vê na Figura 3-3, na qual a mesma corresponde ao último trecho de formação das descargas.

Além disso, estudos revelaram que cada descarga de retorno dura algumas centenas de microssegundos e, em relâmpagos múltiplos, o intervalo de tempo entre as descargas de retorno consecutivas é tipicamente de milissegundos.

3.6 - INCIDÊNCIA DE RAIOS

Ainda segundo Coutinho e Altoé (2003, p. 17) há maior incidência de raios em locais mais altos como torres, árvores e prédios, sendo que os raios tendem a incidir em regiões com terrenos maus condutores em virtude da formação de um “capacitor” entre a nuvem e o mesmo. Além disso, em terrenos maus condutores não há condições de escoamento dos raios o que faz com que os mesmos procurem caminhos de menor resistência para se distribuir. Como exemplo de terrenos maus condutores tem-se os granitos e os xistosos, e os calcários como exemplo de terreno bom condutor.

Ademais, uma forma de identificar terrenos mais propensos à incidência de raios é por meio da manifestação de um cheiro adocicado indicando a presença de ozônio em virtude da ionização do ar decorrente da diferença de potencial entre nuvem e solo, uma vez que essa ionização diminui a distância de isolamento entre os mesmos causando um aumento da probabilidade do raio piloto furar a camada de ar e incidir nessa região.

Ressalta-se que em regiões de muita precipitação e com fortes tempestades a incidência de raios também é maior.

Capítulo 4

Sistema de Proteção Contra Descarga Atmosférica

A partir dos estudos realizados a respeito dos diferentes métodos que podem ser utilizados para proteger e melhorar o desempenho de linhas de transmissão frente aos distúrbios provocados por descargas atmosféricas destacou-se o SPDA como um dos principais métodos empregados para este fim, mais precisamente empregando os pára-raios de óxido de zinco.

Sendo assim, baseando-se em Santos (2007) e em Silva e Junior (2004) a seguir será apresentada a função e composição dos SPDAs, bem como os conceitos básicos sobre pára-raios, especificando as características construtivas dos pára-raios a óxido de zinco, seu envelhecimento e degradação, desempenho frente a surtos atmosféricos, além de também serem mostrados os conceitos, finalidades, requisitos e fatores que influenciam na realização de aterramentos.

4.1 - FUNÇÕES E DEFINIÇÕES DE SPDA

O SPDA, sistema de proteção contra descargas atmosféricas, é um sistema designado a proteger diferentes tipos de estruturas contra os efeitos das descargas atmosféricas, e tem como objetivo evitar e/ou minimizar o impacto dos efeitos das mesmas. Sua composição e principais funções são as seguintes:

- Sistema externo de proteção: sistema que consiste em subsistema de captores, subsistema de condutores de descida e subsistema de aterramento.
- Sistema interno de proteção: conjunto de dispositivos que reduzem os efeitos elétricos e magnéticos da corrente de descarga atmosférica dentro do volume a proteger, sendo composto pelos dispositivos de proteção contra surtos (DPS).

A instalação de um SPDA tem duas funções, as quais são:

- Primeira Função: neutralizar, pelo poder de atração das pontas, o crescimento do gradiente de potencial elétrico entre o solo e as nuvens, através do permanente escoamento de cargas elétricas do meio ambiente para a terra.

- Segunda Função: oferecer à descarga elétrica que for cair em suas proximidades um caminho preferencial, reduzindo os riscos de sua incidência sobre as estruturas.

Cabe lembrar que a instalação de um SPDA não impede a ocorrência de raios e nem tão pouco atrai raios.

4.2 - COMPOSIÇÃO DOS SPDAS

O SPDA é formado pelos subsistemas de captação, descida e aterramento (Coutinho e Altoé, 2003), os quais são descritos abaixo:

Captação:

- Têm como função receber as descargas que incidam sobre o topo das estruturas e distribuí-las pelas descidas;
- Compõem-se por elementos metálicos, geralmente mastros ou condutores metálicos adequadamente dimensionados.

Descidas:

- Têm como função receber as correntes distribuídas pela captação encaminhando-as para o solo o mais rápido possível;
- As descidas deverão ser interligadas no nível do solo com cabo de cobre nu de seção 50 mm² no mínimo.

Aterramento:

- Tem a função de receber as correntes elétricas das descidas e dissipá-las no solo;
- Deve ser dimensionado para equalizar os potenciais das descidas e do solo observando-se os locais de freqüência de pessoas onde se deve procurar minimizar as tensões de passo.
- É necessário realizar a prospecção da resistividade de solo a fim de realizar o adequado dimensionamento da malha de aterramento.

4.3 - PÁRA-RAIOS

É necessária a instalação de dispositivos de proteção com a finalidade de prevenir e evitar que os equipamentos de um sistema elétrico ou de uma instalação industrial sejam danificados por sobretensões, sendo os pára-raios os equipamentos mais indicados para

esta finalidade. Tais dispositivos devem atuar como limitadores de tensão, impedindo que valores acima de um determinado nível pré-estabelecido possam alcançar os equipamentos para os quais fornecem proteção.

Os pára-raios são equipamentos habitualmente usados para proteger o isolamento de vários tipos de dispositivos elétricos, tais como transformadores reguladores de tensão, e linhas de transmissão e distribuição. Os mesmos funcionam como uma alta impedância sob tensão nominal de operação e como uma baixa impedância durante a condição de surto de tensão. Além disso, atuam na condução de corrente ao solo ao mesmo tempo em que limitam a solicitação de tensão imposta ao equipamento protegido ao valor da sua tensão residual acrescida à queda de tensão indutiva devido à corrente de descarga no condutor de descida para a terra (Santos, 2007).

Ademais, os pára-raios são empregados na proteção do isolamento de LTs e linhas de distribuição (LDs) contra descargas atmosféricas, e para anteparar falhas dielétricas evitando interrupções no fornecimento de energia elétrica. Para a seleção das tensões nominais dos pára-raios a serem usados nos projetos de proteção é preciso consultar as normas técnicas e os catálogos dos fabricantes de pára-raios.

Adverte-se que na proteção de equipamentos como cabos subterrâneos se faz necessária a escolha de pára-raios com os níveis de proteção reduzidos, mas para a proteção de linhas aéreas isto não é preciso já que os níveis de proteção dos pára-raios geralmente são inferiores aos níveis de isolamento das mesmas (Santos, 2007).

Ressalta-se que um pára-raios corretamente instalado reduz significativamente os perigos e os riscos de danos, pois captará os raios que iriam cair nas proximidades de sua instalação, contudo é preferível não ter pára-raios algum a ter pára-raios mal instalados.

4.3.1 - TIPOS DE PÁRA-RAIOS

Atualmente há diferentes tipos de pára-raios disponíveis como, por exemplo, pára-raios convencionais com centelhadores a carboneto de silício (SiC) e pára-raios a óxido metálico com ou sem centelhadores. Quando se analisa a proteção do isolamento de LTs e LDs realizada por estes dois tipos de pára-raios depreende-se que apresentam desempenho similar, porém considerando-se margens de segurança conservadoras as diferenças nos níveis de proteção levam a pequenas diferenças na qualidade da proteção oferecida ao isolamento.

A Figura 4-1 mostra as características não lineares dos dois materiais fundamentais para a construção dos blocos utilizados nos pára-raios, o ZnO e o SiC.

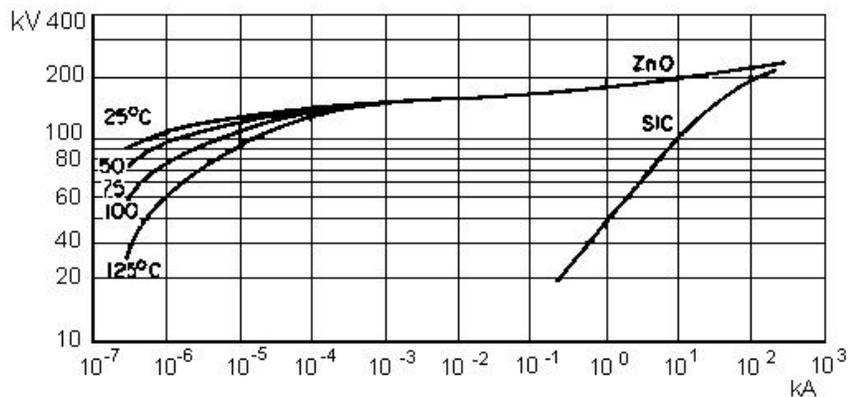


Figura 4-1: Característica tensão x corrente para o SiC e o ZnO.

Observa-se que o ZnO apresenta uma característica não linear superior à do SiC na região de intensidades de correntes mais baixas, o que o faz um melhor material para a construção dos pára-raios, uma vez que podem proporcionar melhores níveis de proteção. Além disso, analisando-se a expressão $I = k.V^n$, a qual representa a característica não linear dos resistores a ZnO e SiC verifica-se que o SiC tem expoente n na ordem de 4 enquanto que o ZnO apresenta um expoente n na ordem de 50. Devido a esta alta não linearidade do ZnO foi possível o abandono do centelhador antes necessário para os pára-raios convencionais, simplificando substancialmente a construção dos mesmos e aumentando a confiabilidade destes dispositivos. Ademais, tal variação permite de um ponto de vista geral que os pára-raios a ZnO sejam desenhados para conduzirem correntes de baixa amplitude ao serem submetidos a sobretensões de manobra ou atmosférica sem que percam a característica de também escoarem correntes de elevada amplitude.

Portanto, em decorrência da revisão bibliográfica e dos estudos necessários para o desenvolvimento deste trabalho constatou-se que os pára-raios de óxido metálico, ou ZnO, se adequam melhor a este projeto, e, conseqüentemente serão tratados com mais detalhes a seguir.

4.3.2 - PÁRA-RAIOS A ÓXIDO DE ZINCO

A seguir serão fornecidas as características construtivas, de envelhecimento e degradação, e de desempenho frente a surtos atmosféricos dos pára-raios a ZnO, além das características dos resistores de ZnO que compõem este tipo de pára-raios.

4.3.2.1 - CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DOS PÁRA-RAIOS A ZNO

Segundo Santos (2007, p. 68) os pára-raios a óxido de zinco, ou óxido metálico, geralmente são construídos por um ou mais resistores e habitualmente não têm a necessidade de utilização de centelhadores, como se vê na Figura 4-2, sendo também chamados de elementos válvula.

Observando-se a Figura 4-2 nota-se que a construção dos pára-raios a óxido de zinco é bastante semelhante à de um pára-raios a carboneto de silício, exceto pela ausência de centelhadores. Além disso, como os resistores a ZnO possuem dimensões menores que os a carboneto de silício são usados espaçadores internos em sua construção visando facilitar a manutenção das distâncias externas determinadas pelas condições exteriores de isolamento.

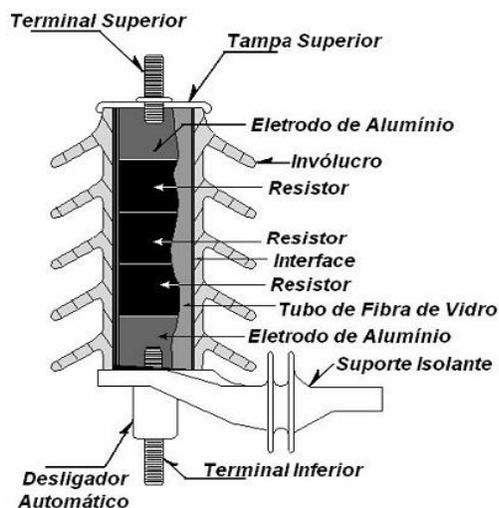


Figura 4-2: Vista em corte de um pára-raios para sistemas de distribuição.

Devido a sua alta não linearidade, os resistores dos pára-raios a óxido de zinco podem operar como se possuíssem um centelhador interno quando submetidos às solicitações normais de operação ou às sobretensões do sistema, ou seja, como se seus resistores tivessem um mecanismo interno de disparo, não havendo, portanto, a necessidade de centelhadores para este tipo de pára-raios, como dito anteriormente.

Dessa maneira, os pára-raios a ZnO possuem melhor desempenho que os a SiC frente a descargas, sobretudo de manobra, uma vez que apresentam comportamento ativo em relação ao sistema em que estão conectados, o que vem fazendo com que os mesmos substituam os pára-raios a SiC em sistemas de alta e extra alta tensão principalmente.

Além disso, a resistência apresentada pelos resistores a ZnO varia com a tensão de modo proporcionalmente muito maior que a dos resistores a SiC. No entanto, os resistores a ZnO permitem a passagem de uma pequena corrente de fuga resultando em perdas de potência ao circular pelos mesmos sob tensão e frequência industrial, sendo que esta perda é proporcional à tensão e à temperatura dos pára-raios.

Por fim, atualmente alguns tipos de resistores a ZnO produzidos no Brasil possuem uma grande tendência a aumentar a perda de potência com o decorrer do tempo resultando no aumento da temperatura dos mesmos. Em detrimento deste fato, os pára-raios a ZnO sem centelhadores podem sofrer um fenômeno de avalanche térmica conhecido por *Thermal Runaway*, que consiste no aumento descontrolado da temperatura, a qual pode subir rapidamente e danificar o pára-raios por meio da formação de pontos de superaquecimento, fusão e tensões devido aos elevados gradientes da mesma (Santos, 2007).

4.3.2.2 - CARACTERÍSTICAS DOS RESISTORES A ZNO

A partir de Santos (2007, p. 71) destaca-se que as principais características dos resistores não lineares a ZnO são as seguintes: resistores cerâmicos, cilíndricos, de alta densidade, usualmente da ordem de $5,4 \text{ g/cm}^3$ a $5,6 \text{ g/cm}^3$, obtidos por meio da moldagem a altas pressões e sinterização a altas temperaturas, geralmente sob atmosfera oxidante.

Em virtude do seu arranjo, as junções óxido de zinco - camada intergranular apresentam cargas fixas que formam regiões de depleção, o que faz com que ocorra a formação de barreiras simétricas ao redor dos grãos de ZnO e na camada intergranular que os envolvem conhecidas como *Barreiras de Schottky*. Estas barreiras simétricas causam o desempenho não linear destas junções e, conseqüentemente, dos resistores, o que torna possível afirmar que cada conjunto camada intergranular - grão de óxido de zinco - camada intergranular opera como um circuito ceifador, com tensão de corte em torno de 2,5 V a 3 V de crista.

Dessa forma, por meio da Figura 4-3 tem-se que a característica tensão *versus* corrente para um resistor a ZnO possui três regiões distintas, descritas da seguinte forma: uma região linear para baixas densidades de corrente (Região – I); uma região de transição, altamente não linear, (Região – II); e uma região linear para altas densidades de corrente, (Região – III).

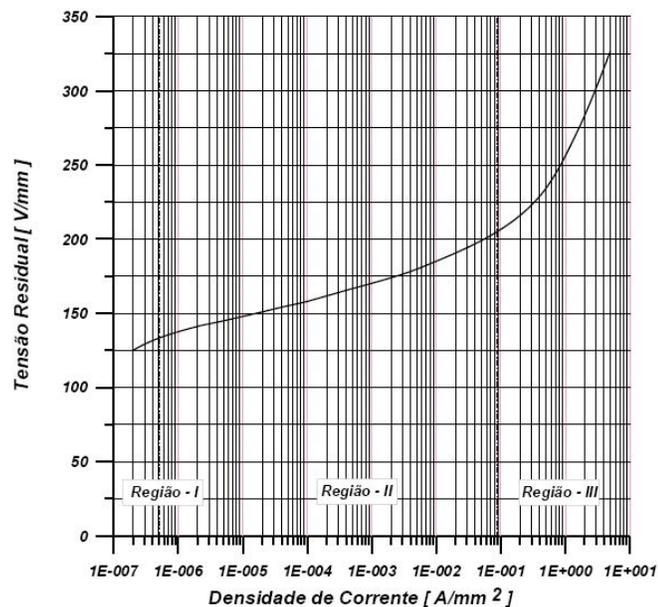


Figura 4-3: Regiões condutoras da característica tensão versus corrente de um resistor a óxido metálico.

Estas características podem ser explicadas por meio do mecanismo *Schottky*, sendo as três regiões anteriormente mencionadas descritas e definidas a seguir. A Região - I é definida como a região de baixa densidade de corrente, na qual a tensão aplicada resulta em um campo elétrico de baixa densidade, insuficiente para promover uma diminuição expressiva na altura das barreiras de potencial, fazendo com que o resistor a ZnO apresente comportamento característico de um resistor linear de alto valor. Já a Região - II é definida como a região de média densidade de corrente, em que o aumento da tensão aplicada acarreta um aumento do campo elétrico, e por conseguinte causa uma redução da altura das barreiras de potencial, obrigando que o resistor a ZnO passe a apresentar desempenho altamente não linear. Entretanto, há redução das barreiras de potencial até certo limite a partir do qual o resistor a ZnO volta a proporcionar um comportamento igual ao de um resistor linear de baixo valor, controlado pelo desempenho linear dos cristais de óxido de zinco, fazendo com que o resistor atue na Região - III, ou seja, na região de alta densidade de corrente.

4.3.2.3 - ENVELHECIMENTO E DETERIORAÇÃO DOS RESISTORES A ZNO

Novamente, segundo Santos (2007, p. 75) sabe-se que os resistores a ZnO ao serem expostos a sua tensão normal de operação em frequência industrial necessitam

consumir potência, estando esta profundamente relacionada à componente resistiva da corrente de fuga, a qual é crescente ao longo do tempo, constituindo um processo de envelhecimento.

Atualmente, há três gerações de resistores a óxido de zinco cujo desempenho frente a uma determinada tensão em frequência industrial sugere que os resistores mais modernos possuam uma tendência a se auto-estabilizarem quando submetidos a estas solicitações, como se vê na Figura 4-4.

Não obstante, como mostrado na Figura 4-4 a vida operacional de um resistor a ZnO pode ser decomposta em três regiões, as quais são definidas da seguinte maneira:

Região I: região estável na qual ocorre o envelhecimento do resistor;

Região II: região na qual acontece um pequeno acréscimo na taxa de crescimento da corrente de fuga tornando difícil a manutenção do equilíbrio térmico, evidenciando o início do processo de instabilidade;

Região III: região na qual se processa um grande aumento na taxa de crescimento da corrente de fuga e perda do equilíbrio térmico, ratificando o processo de instabilidade, e onde se averigua o acontecimento do fenômeno de *Thermal Runaway*.

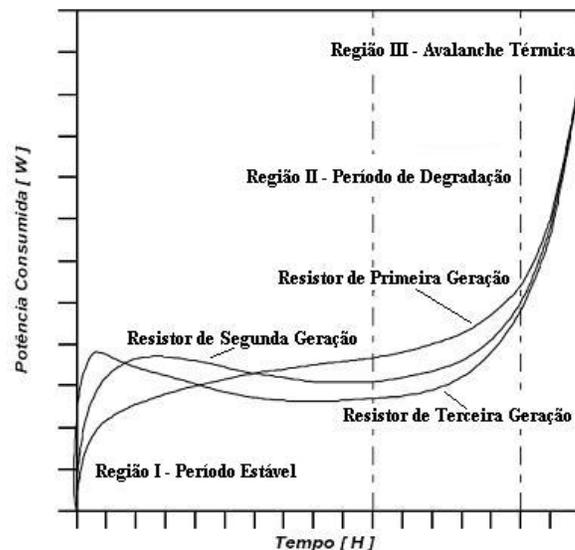


Figura 4-4: Característica potência consumida versus tempo para resistores a óxido metálico de primeira, segunda e terceira geração.

Além disso, a teoria de envelhecimento dos resistores a ZnO baseada nos Resistores de Primeira Geração, assim como a teoria empregada para examinar o envelhecimento dos dielétricos, é balizada na idéia de vida útil proposta pelo Método de Arrhenius – Dakin. Tal método fundamenta-se em determinar qual tempo necessário para que se tenha um consumo de potência duas vezes maior que o inicial, sendo que se deve

submeter os resistores a diferentes temperaturas e tensões para tanto. Salienta-se que compete especificamente ao fabricante definir o fim da vida útil dos pára-raios uma vez que a mesma é parâmetro intrínseco ao procedimento de manufatura e construção desses dispositivos.

Ademais, o envelhecimento dos resistores a ZnO também origina-se das descargas de surtos de corrente de origem atmosférica e de manobra, sendo que o mesmo é fundamentalmente condicionado à forma do impulso da descarga, densidade de corrente através do resistor, temperatura do resistor, polaridade dos surtos e número de descargas, como se vê na Figura 4-5 e na Figura 4-6. Estas se referem aos impulsos atmosféricos e aos impulsos de manobra respectivamente, e por meio das quais se conclui que quanto maior a densidade de corrente imposta aos resistores a ZnO maior será o aumento na corrente de fuga.

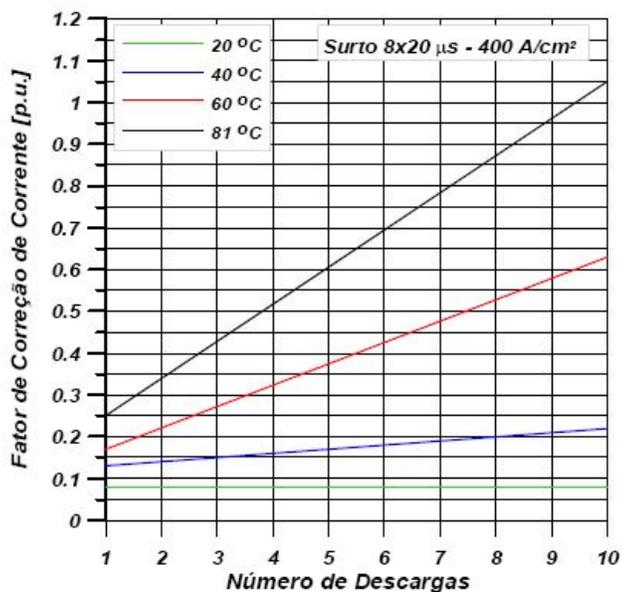


Figura 4-5: Fator de correlação da corrente de fuga com o número de descargas para um resistor a óxido de zinco típico para um surto de 8x20 μ s – 400A/cm².

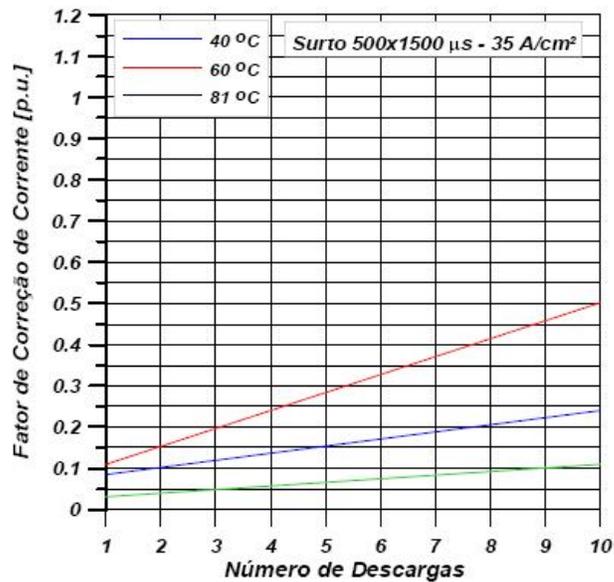


Figura 4-6: Fator de correlação da corrente de fuga com o número de descargas para um resistor a óxido de zinco típico para um surto de 500x1500 μ s – 35A/cm².

A partir do exposto depreende-se que o processo de envelhecimento dos resistores a óxido de zinco é decorrente da evolução da corrente de fuga em virtude da aplicação contínua de tensão em freqüência industrial e de descargas de surtos atmosféricos ou de manobra, sendo os surtos atmosféricos os mais importantes.

4.3.2.4 - DESEMPENHO FRENTE A SURTOS ATMOSFÉRICOS

A partir de estudos constatou-se que a interação entre as descargas e a impedância dos sistemas atingidos pelas mesmas, faz com que a amplitude e a forma da corrente de descarga tenham uma grande variação quando comparadas ao ponto em que incidiram as descargas. Dessa forma, o grau de dispersão estatística imposto aos pára-raios pelas sobretensões de origem atmosférica faz com que seja necessário dimensioná-los de maneira que os mesmos possam suportar todo o espectro possível de correntes de descargas.

Além disso, as correntes de descargas atmosféricas com duração não muito elevada através da sua amplitude e forma de onda solicitam os resistores não lineares dos pára-raios de modo quase uniforme, impedindo sua concentração em canais condutores responsáveis pelo fenômeno chamado *Tunneling*, o qual pode resultar em outro fenômeno conhecido por *Thermal Cracking*, que se caracteriza pela manifestação de solicitações

mecânicas originadas da expansão desigual de partes do resistor em virtude da distribuição não uniforme da temperatura (Santos, 2007).

Não obstante, as normas da ABNT definem que as solicitações impostas aos pára-raios a ZnO em virtude de descargas atmosféricas são delineadas por meios do ensaio do ciclo de operação combinado, com o qual são aplicadas aos pára-raios as diferentes solicitações sofridas pelos mesmos durante sua vida útil em um em curto espaço de tempo. Neste contexto, as normas responsáveis pela averiguação do comportamento dos pára-raios vêm sendo realizadas através de práticas de campo, ensaios e investigações em pára-raios removidos de operação sob condições normais e de falha, a fim de garantir uma taxa de falha admissível.

4.4 - ATERRAMENTO

Segundo Silva e Junior (2004, p. 7) um aterramento elétrico é definido como uma ligação elétrica proposital de um sistema físico ao solo, sendo constituído essencialmente pelos eletrodos de aterramento, conexões destes eletrodos ao sistema a ser protegido, e a terra que os envolve.

A finalidade de um sistema de aterramento é garantir a segurança das pessoas e animais, que de alguma forma são beneficiados pelo mesmo, uma vez que é projetado para impedir as correntes de modo comum, garantido tranquilidade para os operários que prestam manutenção nas LTs e LDs, aos usuários de uma instalação elétrica de uma casa, prédio e empresa, e também a segurança de quaisquer equipamentos ligados a uma fonte de energia elétrica.

Além disso, os SPDAs também são constituídos por sistemas de aterramento já que os mesmo são incumbidos e projetados para escoar as descargas atmosféricas diretamente para terra fornecendo às mesmas um caminho preferencial para condução das cargas elétricas das nuvens que necessitam descer e neutralizar as cargas opostas presentes na Terra.

4.4.1 - CONCEITOS RELEVANTES

Baseando-se em Silva e Junior (2004, p. 10) são definidos os seguintes conceitos básicos sobre aterramento.

Sistema de aterramento: compõe-se por um conjunto de condutores, cabos, hastes e conectores interligados, rodeados por elementos que dissipem as correntes impostas a esse sistema para a terra.

Resistência de aterramento: resistência com a qual se depara a corrente elétrica ao ser aplicada uma tensão a esse sistema, sendo a mesma composta pelos seguintes elementos:

- Primeiro elemento: resistência dos eletrodos, cabos, conexões e fiações;
- Segundo elemento: resistência de contato entre os eletrodos ou cabos e o ambiente circundante, que geralmente é terra;
- Terceiro elemento: resistência do material que circunda o eletrodo ou cabo, que novamente poderá ser a terra.

O primeiro elemento pode ser considerado desprezível ou até mesmo nulo se forem aumentadas as seções dos cabos e eletrodos, sendo que em detrimento dos efeitos de corrosão decorrentes do meio em que se encontra o sistema, principalmente nas conexões, varia com o tempo, degradando a qualidade dos contatos elétricos nos pontos de conexão.

O segundo elemento também pode ser considerado pouco relevante se o eletrodo e a terra circundante estiverem livres de gorduras, componentes orgânicos, pedras, pinturas, vernizes e óxidos, e do mesmo modo varia com o tempo em detrimento da oxidação do eletrodo ou cabo envolvido pelo meio circundante.

O terceiro elemento, na verdade, é quem define o valor da resistência de aterramento, pois depende do formato e dimensões do eletrodo ou cabo, e da natureza, umidade e temperatura do meio circundante, que na maioria das vezes é a terra.

Por fim, em casos de condução de descargas atmosféricas deve-se diminuir ao máximo o comprimento dos cabos de interligação entre o sistema ser aterrado e a malha de terra com o intuito de diminuir a reatância de cabo de forma a tornar mínimo o potencial sob o componente considerado, já que as descargas possuem elevadíssima frequência.

4.4.2 - FINALIDADES

Ainda segundo Silva e Junior (2004, p. 12) as principais finalidades dos sistemas de aterramento são as seguintes:

- Propiciar uma baixa resistência de aterramento;
- Conservar valores da tensão carcaça-terra e estrutura-terra dentro do nível de segurança para o pessoal, em caso de partes metálicas da carcaça ou estrutura acidentalmente energizadas;
- Fornecer um caminho preferencial de escoamento para a terra das descargas atmosféricas ou sobretensões devidas a manobras de equipamentos;

- Permitir aos equipamentos de proteção, fusíveis, e disjuntores, isolar o mais rápido possível as falhas à terra;
- Diminuir valores de tensão fase-terra do sistema, fixando a tensão de isolamento a valores determinados;
- Acomodar a passagem de eletricidade estática originada por equipamentos ou por indução a terra impedindo faiscamento.

4.4.3 - REQUISITOS

Também segundo Silva e Junior (2004, p. 12) para ser considerado perfeito um sistema de aterramento deve conter as seguintes características:

- Capacidade de condução de corrente: seu valor depende do material constituinte dos cabos e hastes empregados, do tempo de eliminação da falha, do tipo de conexão usada e das características do solo.
- Segurança: o índice de segurança de uma instalação está sujeito ao dimensionamento do sistema de aterramento, o qual deve ser feito para que os potenciais resultantes de correntes de falha estejam de acordo com os limites instituídos pelas normas técnicas.
- Estabilidade: para se ter um sistema de aterramento estável é imprescindível instalá-lo em um meio com resistividade constante em relação às condições climáticas, sendo que isto pode ser conseguido naturalmente ou artificialmente com tratamento do solo, por exemplo, com aplicação de bentonita.

4.4.4 - FATORES QUE INFLUENCIAM O ATERRAMENTO

Há vários fatores que podem influenciar um sistema de aterramento, dentre eles destacam-se o tipo de solo, a geometria das malhas de aterramento, a estratificação do solo em várias camadas, a umidade, compactação, composição química, granulometria, porosidade, e a temperatura do solo. Tais fatores intervêm nos valores finais do projeto de aterramento, ou seja, na resistência de malha da terra e no provável aumento do potencial dessa malha ao ser exposta a um curto-circuito de uma fase para a terra ou de uma fase para a malha.

Por fim, cabe lembrar que neste trabalho não foi projetado o sistema de aterramento da linha em estudo, pois foi admitido que o mesmo possui as características ideais para seu bom desempenho. Dessa forma, o foco deste trabalho foi à modelagem dos pára-raios no ATP e a análise do seu desempenho.

Capítulo 5

Levantamento e Modelagem da Linha de Transmissão

A partir dos estudos realizados a respeito de sistemas de proteção contra descarga atmosférica e tendo em vista que a técnica a ser adotada neste projeto é a de proteção por inserção de pára-raios em uma linha de transmissão, foram contempladas algumas linhas e modelos de linhas para que se pudesse escolher a mais apropriada a este trabalho de pesquisa. Posto isto, foi escolhida uma linha real que liga uma usina hidroelétrica de pequeno porte a uma subestação, a qual será descrita e modelada a seguir.

5.1 - CARACTERÍSTICAS DA LINHA REAL SELECIONADA

A linha de transmissão selecionada para este trabalho é responsável por transmitir a energia gerada por uma usina de pequeno porte até uma subestação que a distribui. Esta linha se localiza no interior do estado de São Paulo, mais precisamente na região de Campinas, possui um comprimento total de 8,9 km, foi considerada adequadamente aterrada, operava na classe de tensão de 34,5 kV, porém foi repotenciada para classe de 69 kV, tendo sido mantidas suas estruturas originais e condutores, e apenas seus isoladores foram substituídos para se adequar à nova classe de tensão.

Ademais, apenas para fins ilustrativos são apresentadas abaixo as diferentes estruturas existentes na linha de transmissão real empregada nesta pesquisa, nas quais se pode constatar que a mesma não possui nenhum pára-raios instalado.

A Figura 5-1 apresenta uma estrutura do tipo “G” (CPFL [a]), na Figura 5-2 observa-se a presença de uma estrutura do tipo “A” (CPFL [b]), na Figura 5-3 depara-se com uma estrutura do tipo “B” (CPFL [c]), na Figura 5-4 vê-se uma estrutura do tipo “E” (CPFL [d]), na Figura 5-5 nota-se uma estrutura do tipo “HS” (CPFL [e]), por fim, na Figura 5-6 visualiza-se uma estrutura do tipo “HT” (CPFL [f]).



Figura 5-1: Estrutura do Tipo G.



Figura 5-2: Estrutura do Tipo A.



Figura 5-3: Estrutura do Tipo B.



Figura 5-4: Estrutura do Tipo E.



Figura 5-5: Estrutura do Tipo HS.



Figura 5-6: Estrutura do Tipo HT.

Cabe agora a determinação do modelo matemático que será empregado na modelagem da linha e utilizado nas simulações pelo programa ATP, como será elucidado a seguir.

5.2 - MODELOS MATEMÁTICOS

Existem vários modelos matemáticos empregados para representação de linhas de transmissão, contudo, como para este projeto decidiu-se optar pelo programa ATP na realização das simulações deve-se ter em mente os modelos por ele fornecidos.

Constata-se que o programa ATP através de sua plataforma ATPDraw (EEUG, 1987) e de seu componente LCC (*Line/Cable Constants*) disponibiliza cinco métodos para a modelagem matemática de linhas de transmissão, os quais são:

- PI;
- JMarti;
- Bergeron;
- Noda;
- Semlyen.

Tendo em vista os cinco modelos mencionados e as particularidades da linha empregada no projeto, juntamente com o conhecimento adquirido com estudos anteriores, serão comentados abaixo os modelos PI e JMarti, dado que foi avaliada a melhor adequação dos mesmos para as simulações da linha real escolhida.

O modelo PI considera que a matriz de transformação modal é constante para todas as faixas de frequência, o que em geral não é verdade, mas ainda é uma aproximação boa o suficiente para linhas de transmissão balanceadas ou aproximadamente balanceadas. Entretanto, se a linha não é transposta e também uma configuração assimétrica da torre é considerada, o desempenho do modelo é questionável. Por outro lado, modelos de linha dependentes da frequência, como JMarti, são capazes de reproduzir não somente a frequência natural da linha de transmissão, mas também a distorção e atenuação devido ao efeito pelicular, produzindo resultados mais próximos da realidade.

Já o modelo PI é mais recomendado para linhas de transmissão curtas, até 15 km, nas quais o tempo de viagem da onda de tensão é menor que o tempo de integração da solução. No entanto, tal modelo é impróprio para linhas com comprimentos superiores a 15 km, e nestes casos a teoria de ondas viajantes é usada no desenvolvimento de modelos mais realistas (Watson, Arrillaga, 2003).

Ademais, como já explicado anteriormente, nas simulações implementadas neste projeto serão empregados os modelos JMarti e PI, quando necessário considerar ou não a

dependência da frequência, respectivamente. Esse fato se deve, primeiramente, ao comprimento da linha que é de 8, 915 km, o que configura uma linha curta e, portanto se adéqua ao modelo PI. Contudo, apesar deste modelo estar de acordo com o que indica Watson e Arrillaga (2003), ele não leva em consideração frequências diferentes da fundamental, o que leva a escolha do modelo JMarti, além do modelo PI, para realização das simulações de transitórios pertinentes ao estudo, posto que esse modelo é dependente da frequência.

Dessa maneira, tendo sido feita a escolha dos modelos matemáticos para realização das simulações, cabe agora apresentar tal linha modelada usando o programa ATP.

5.3 - MODELAGEM DA LINHA REAL SELECIONADA NO SOFTWARE ATPDRAW

Baseando-se em Biasotto (2009, p. 80) foram feitos estudos para representar a linha de transmissão pelo programa escolhido para esta pesquisa e tornaram-se necessárias algumas considerações a respeito da composição e disposição geométrica da mesma, tais como:

- Altura a meio vão;
- Distância entre os condutores e entre os condutores e o solo;
- Resistividade do solo;
- Potência de curto-circuito nas subestações;
- Tensão e comprimento da linha;
- Diâmetro do condutor.

Por meio das considerações acima descritas, a rede foi modelada usando o ATP, com a execução da rotina LCC para o cálculo dos parâmetros elétricos da linha baseados nos valores da tabela de condutores conforme encontrado em Fuchs (1979). Tais valores sustentaram a configuração da modelagem proposta e, viabilizaram as simulações dos transitórios eletromagnéticos para a determinação dos valores de tensão e corrente ao longo da linha frente a distúrbios de natureza interna e externa, como as descargas atmosféricas.

Na Figura 5-7, tem-se o componente LCC (*Line/Cable Constants*) fornecido pelo programa ATP por meio da interface ATPDraw e com o qual foram calculados os parâmetros acima mencionados. Evidencia-se também que com o componente LCC pode-se escolher o modelo matemático que será empregado, como mencionado na seção 5.2 anteriormente. Não obstante, também se pode inserir o valor da resistividade do solo, a

forma de cálculo dos parâmetros distribuídos variando com a frequência, o comprimento da linha, a transposição ou não da mesma e o número de fases do sistema a ser implementado (Biasotto, 2009).

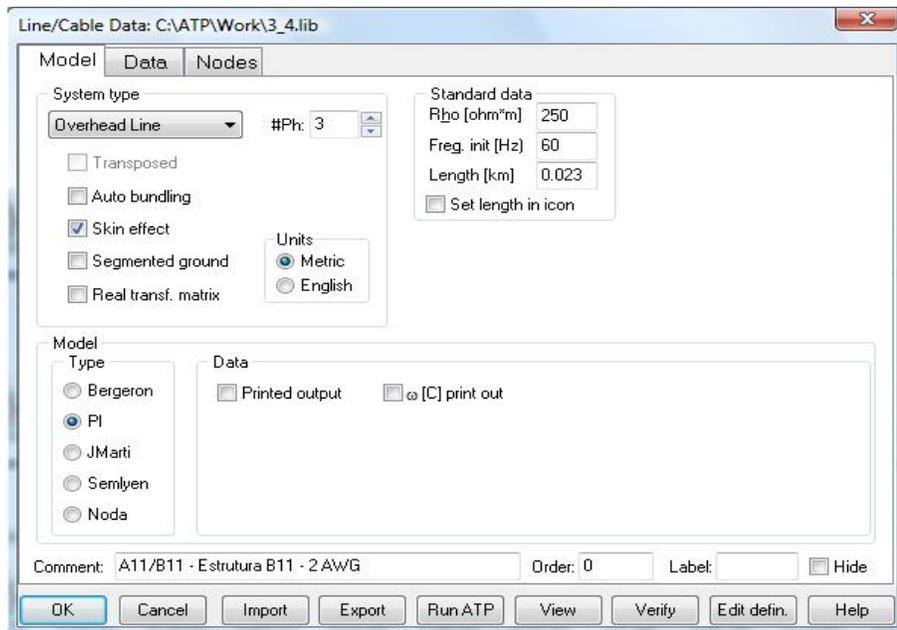


Figura 5-7: Tela inicial do componente LCC.

A Figura 5-8 demonstra que por meio do componente LCC inserem-se os dados que caracterizam os condutores do sistema em análise, tais como: o raio interno e externo do condutor, sua resistência, as distâncias horizontais e as alturas dos condutores, na torre e no meio vão, em relação ao solo (Biasotto, 2009).

Line/Cable Data: C:\ATP\Work\3_4.lib

Model		Data			Nodes		
#	Ph.no.	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]
1	1	0	0.2752	0.5425	-1.5	9.44	7.552
2	2	0	0.2752	0.5425	0	9.44	7.552
3	3	0	0.2752	0.5425	0.74	9.44	7.552

Buttons: Add row, Delete last row, Insert row copy, Move (up/down arrows), OK, Cancel, Import, Export, Run ATP, View, Verify, Edit defin., Help

Figura 5-8: Entrada dos dados dos condutores do sistema simulado.

A partir do exposto, os conceitos e ferramentas necessárias para a modelagem da linha já foram obtidos e, portanto faz-se necessária a apresentação da linha no seu modelo simplificado.

A Figura 5-9 demonstra o modelo simplificado da linha composto por oito componentes LCC que representam o agrupamento de trechos com estruturas semelhantes da mesma, os quais contêm sua composição e disposição geométrica, e na qual se tem os componentes USG e SOZ simulando a usina e a subestação respectivamente. Ressalta-se que para essa modelagem foram feitas algumas aproximações quanto às distâncias entre condutores levando em consideração a estrutura mais problemática referente às distâncias entre condutores e entre condutor e solo, uma vez que a linha apresenta estruturas diversificadas.

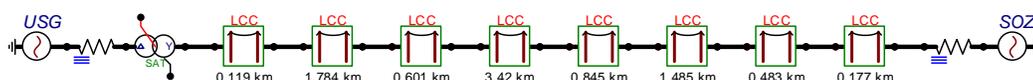


Figura 5-9: Modelo simplificado da linha.

Dessa forma, como a linha já foi devidamente modelada e seus parâmetros obtidos pelo componente LCC, além de definidos os modelos matemáticos mais adequados às configurações da mesma, resta então executar as simulações de descargas atmosféricas.

Capítulo 6

Análise e Simulação das Sobretensões Causadas pela Ocorrência de Descargas Atmosféricas

Neste capítulo serão apresentadas as simulações de descargas atmosféricas a fim de observar os diferentes níveis de sobretensão em alguns pontos específicos da linha de transmissão estudada, e por meio destas sobretensões definir qual a mais elevada e em que ponto ocorre para modelar os pára-raios a serem implementados.

6.1 - SIMULAÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Para realizar estas simulações os trechos da linha foram modelados segundo o modelo JMarti, dado que para este tipo de simulação a dependência da frequência é relevante, pois a atenuação e distorção sofridas são consideráveis e é necessário um refinamento das formas de onda de tensão para análise da ocorrência das descargas atmosféricas. Também cabe ressaltar que no caso de transitórios que envolvem altas frequências no seu sinal de tensão, tais como as descargas atmosféricas, a utilização do modelo PI causa uma superestimação dos valores de tensão, evidenciando a necessidade de um modelo que considera a impedância da linha para as várias faixas de frequência que constituem o transitório, como é o caso do modelo JMarti.

Outrossim, de acordo com Diesendorf (1974) 65% das descargas atmosféricas possuem uma corrente igual ou inferior a 10 kA, com um tempo de subida de 1,2 μ s e um tempo de descida de 50 μ s, os quais foram tomados como base para as simulações realizadas sobre a linha em análise. Dessa forma, as descargas atmosféricas simuladas possuem forma de onda com tempo de subida de 1,2 μ s, tempo de descida com 50 μ s, corrente de descarga variando entre 10 kA, 4,5 kA e 2,5 kA, impedância do canal de ionização do ar de 1 k Ω ou 3 k Ω , sendo os pontos 2, 5 e 8 da linha em estudo utilizados tanto como pontos de incidência de falta quanto como pontos de medição das sobretensões geradas pelas descargas.

Destaca-se que, como o interesse deste trabalho é analisar o comportamento da linha durante as simulações, as extremidades da mesma foram aterradas, desconsiderando-se dessa forma as fontes equivalentes de tensão que representavam a usina e a subestação.

A Figura 6-1 representa o modelo simplificado da linha composto por oito componentes LCC, os quais contêm a composição e disposição geométrica de cada trecho da mesma. Também se observa na Figura 6-1 uma fonte Heidler Type 15 responsável por conceber as diferentes amplitudes de descarga, um Splitter empregado para selecionar as fases de forma individual e uma resistência em paralelo representando o canal de ionização do ar (Diesendorf, 1974). Salienta-se que neste trabalho as simulações foram implementadas com as descargas sendo aplicadas na FASE C do condutor, porém poderiam ter sido aplicadas na FASE A e FASE B de igual maneira sem prejuízo algum para as simulações. Além disso, a mesma representa o caso de uma descarga atmosférica com incidência no ponto 2 e medição nos pontos 2, 5 e 8. Cabe aqui denotar que os pontos 2, 5 e 8 localizam-se entre os componentes LCC de comprimento 0,119 km e 1,784 km, 3,42 km e 0,845 km, 0,483 km e 0,177 km, respectivamente.

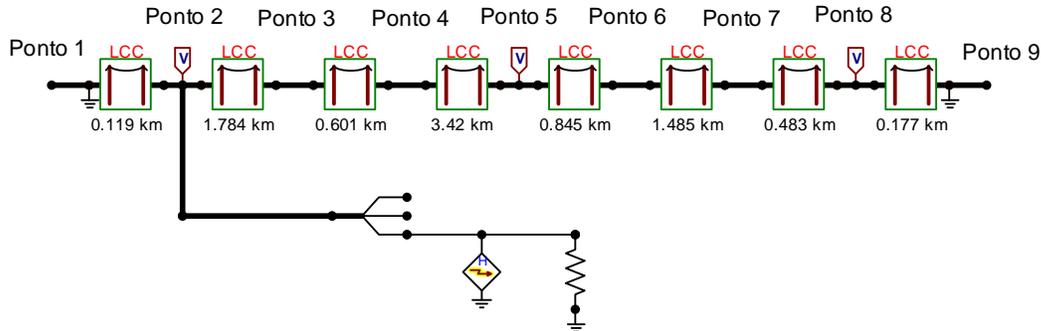


Figura 6-1: Modelo simplificado da linha para simulações de descargas atmosféricas.

Posto isto, para fins de comparação dos valores de pico de tensão após a aplicação de uma determinada descarga atmosférica em um ponto específico da linha, a Tabela 6-1 apresenta os valores máximos de tensão por fase obtidos com o auxílio do ATP, sejam estes positivos ou negativos, para cada tipo de corrente de descarga simulada, bem como para cada tipo de impedância do canal de ionização, ponto de incidência e ponto de medição. Ressalta-se que os pontos onde foram aplicadas e medidas as descargas e identificados na Tabela 6-1 como ponto 2, ponto 5 e ponto 8 representam respectivamente um ponto imediatamente após a usina, um ponto que equivale ao meio da linha aproximadamente, e um ponto imediatamente anterior à subestação.

Tabela 6-1: Valores máximos de tensão em decorrência da aplicação de descargas atmosféricas.

Descargas Atmosféricas					
Amplitude / Canal ionização	Ponto de Incidência	Ponto de Medição	Fase A (V)	Fase B (V)	Fase C (V)
10kA / 1000 ohms	2	2	736.744,74	872.733,45	1.906.407,00
10kA / 1000 ohms	2	5	389.603,60	383.816,17	688.947,37
10kA / 1000 ohms	2	8	404.425,85	322.787,59	321.994,93
10kA / 1000 ohms	5	2	364.127,14	348.705,84	626.381,87
10kA / 1000 ohms	5	5	-1.713.090,00	-1.494.640,00	-1.569.470,00
10kA / 1000 ohms	5	8	565.797,76	561.615,57	1.248.588,00
10kA / 1000 ohms	8	2	369.109,81	301.819,85	303.679,14
10kA / 1000 ohms	8	5	579.368,51	576.960,80	1.291.913,00
10kA / 1000 ohms	8	8	959.144,65	1.051.328,00	2.054.773,00
10kA / 3000 ohms	2	2	441.439,65	358.708,40	345.684,72
10kA / 3000 ohms	2	5	671.468,63	659.897,95	1.479.446,00
10kA / 3000 ohms	2	8	1.111.208,00	1.218.367,00	2.383.718,00
10kA / 3000 ohms	5	2	424.407,08	406.855,71	732.951,06
10kA / 3000 ohms	5	5	-2.102.250,00	-1.800.530,00	2.542.751,00
10kA / 3000 ohms	5	8	661.223,46	656.786,25	1.460.041,00
10kA / 3000 ohms	8	2	808.584,34	999.986,53	2.184.379,00
10kA / 3000 ohms	8	5	434.432,35	418.821,98	760.497,63
10kA / 3000 ohms	8	8	463.119,19	367.194,67	353.582,89
4,5kA / 1000 ohms	2	2	331.535,13	392.730,05	857.883,00
4,5kA / 1000 ohms	2	5	175.321,62	172.717,28	310.026,32
4,5kA / 1000 ohms	2	8	181.991,63	145.254,42	144.897,72
4,5kA / 1000 ohms	5	2	163.857,21	156.917,63	281.871,84
4,5kA / 1000 ohms	5	5	-770.892,32	-672.589,89	977.255,93
4,5kA / 1000 ohms	5	8	254.608,99	252.727,01	561.864,72
4,5kA / 1000 ohms	8	2	166.099,41	135.818,93	136.655,61
4,5kA / 1000 ohms	8	5	260.715,83	259.632,36	581.360,80
4,5kA / 1000 ohms	8	8	431.615,09	473.097,44	924.648,03
4,5kA / 3000 ohms	2	2	363.862,95	449.993,94	982.970,74
4,5kA / 3000 ohms	2	5	195.494,56	188.469,89	342.223,93
4,5kA / 3000 ohms	2	8	208.403,64	165.237,60	159.112,30
4,5kA / 3000 ohms	5	2	190.983,19	183.085,07	329.827,98
4,5kA / 3000 ohms	5	5	-946.011,49	-810.237,13	1.144.238,00
4,5kA / 3000 ohms	5	8	297.550,56	295.553,81	657.018,33
4,5kA / 3000 ohms	8	2	198.647,84	161.418,78	155.558,12
4,5kA / 3000 ohms	8	5	302.160,89	296.954,08	665.750,70
4,5kA / 3000 ohms	8	8	500.043,39	548.264,93	1.072.673,00
2,5kA / 1000 ohms	2	2	184.186,19	218.183,36	476.601,67
2,5kA / 1000 ohms	2	5	97.400,90	95.954,04	172.236,84
2,5kA / 1000 ohms	2	8	101.106,46	80.696,90	80.498,73
2,5kA / 1000 ohms	5	2	91.031,79	87.176,46	156.595,47
2,5kA / 1000 ohms	5	5	-428.273,51	-373.661,05	542.919,96
2,5kA / 1000 ohms	5	8	141.449,44	140.403,89	312.147,07

2,5kA / 1000 ohms	8	2	92.277,45	75.454,96	75.919,78
2,5kA / 1000 ohms	8	5	144.842,13	144.240,20	322.978,22
2,5kA / 1000 ohms	8	8	239.786,16	262.831,91	513.693,35
2,5kA / 3000 ohms	2	2	202.146,08	249.996,63	546.094,86
2,5kA / 3000 ohms	2	5	108.608,09	104.705,50	190.124,41
2,5kA / 3000 ohms	2	8	115.779,80	91.798,67	88.395,72
2,5kA / 3000 ohms	5	2	106.101,77	101.713,93	183.237,77
2,5kA / 3000 ohms	5	5	-525.561,94	-450.131,74	635.687,73
2,5kA / 3000 ohms	5	8	165.305,87	164.196,56	365.010,19
2,5kA / 3000 ohms	8	2	110.359,91	89.677,10	86.421,18
2,5kA / 3000 ohms	8	5	167.867,16	164.974,49	369.861,50
2,5kA / 3000 ohms	8	8	277.801,89	304.591,63	595.929,47

A partir da Tabela 6-1 depreende-se que os casos que apresentam maior pico de tensão em virtude das descargas atmosféricas aplicadas à linha são os que possuem corrente de descarga de 10 kA e resistência do canal de ionização de 3 k Ω . Também se averigua que as sobretensões provocadas pelas descargas são diretamente proporcionais à intensidade da corrente, ou seja, quanto maior a corrente da descarga, maiores serão os picos de sobretensão medidos na linha, e que quanto maior a resistência em paralelo à linha, representando o canal de ionização, maior será a parcela de corrente a percorrer a mesma causando uma maior sobretensão.

A seguir, são mostrados os gráficos das simulações com respeito às situações de descargas atmosféricas de interesse para o modelo simplificado da linha conforme apresentado na Figura 6-1, na qual nota-se uma ligação representando uma descarga em um ponto específico da linha, que neste caso é o ponto 2 da mesma. Dessa mesma forma, também serão feitas as ligações para descargas em outros pontos da linha, mudando, evidentemente, a posição da aplicação da descarga e da resistência que representa o canal de ionização do ar, quando necessário. Adverte-se que em todas as simulações deste trabalho a **FASE A** esta em cor **VERDE**, a **FASE B** em **AZUL** e a **FASE C** em **VERMELHO**, nos gráficos apresentados.

Da Figura 6-1 à Figura 6-7 são expostas as formas de onda das tensões em decorrência da aplicação de uma descarga atmosférica com corrente de 2,5 kA e resistência do canal de ionização de 1 k Ω e 3 k Ω , nos pontos 2, 5 e 8 respectivamente. Observando tais figuras infere-se que as sobretensões geradas em consequência das descargas são maiores para os casos em que a resistência do canal de ionização é maior, como foi constatado na Tabela 6-1.

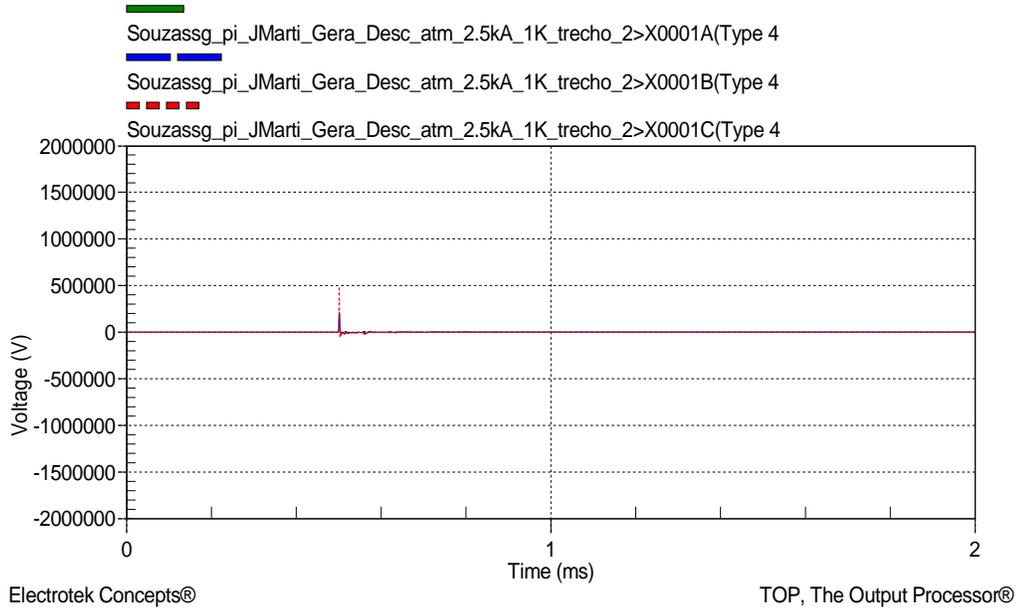


Figura 6-2: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 2,5kA com resistência do canal de ionização de 1kΩ, aplicada no ponto 2 e medida no ponto 2 da linha.

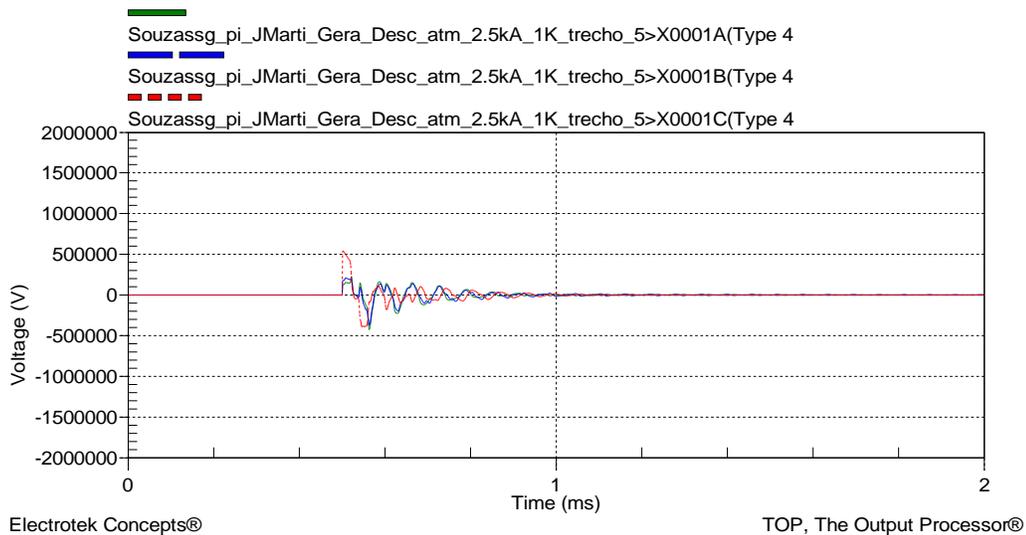


Figura 6-3: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 2,5kA com resistência do canal de ionização de 1kΩ, aplicada no ponto 5 e medida no ponto 2 da linha.

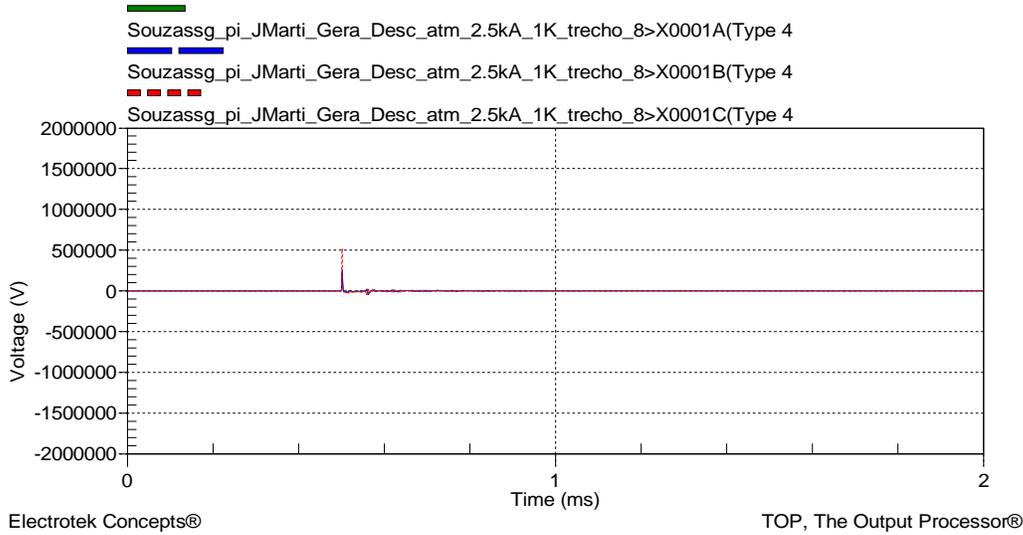


Figura 6-4: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 2,5kA com resistência do canal de ionização de 1kΩ, aplicada no ponto 8 e medida no ponto 2 da linha.

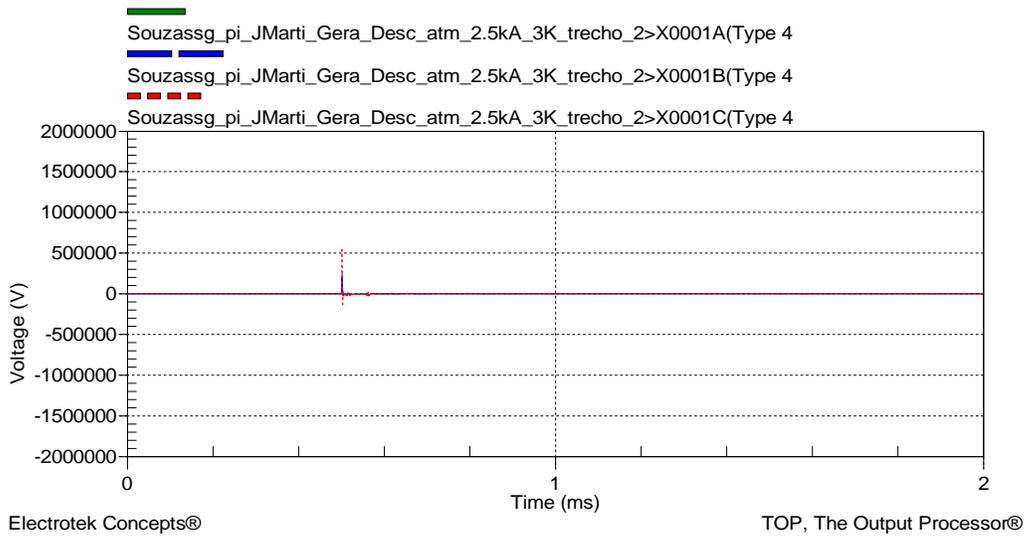


Figura 6-5: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 2,5kA com resistência do canal de ionização de 3kΩ, aplicada no ponto 2 e medida no ponto 2 da linha.

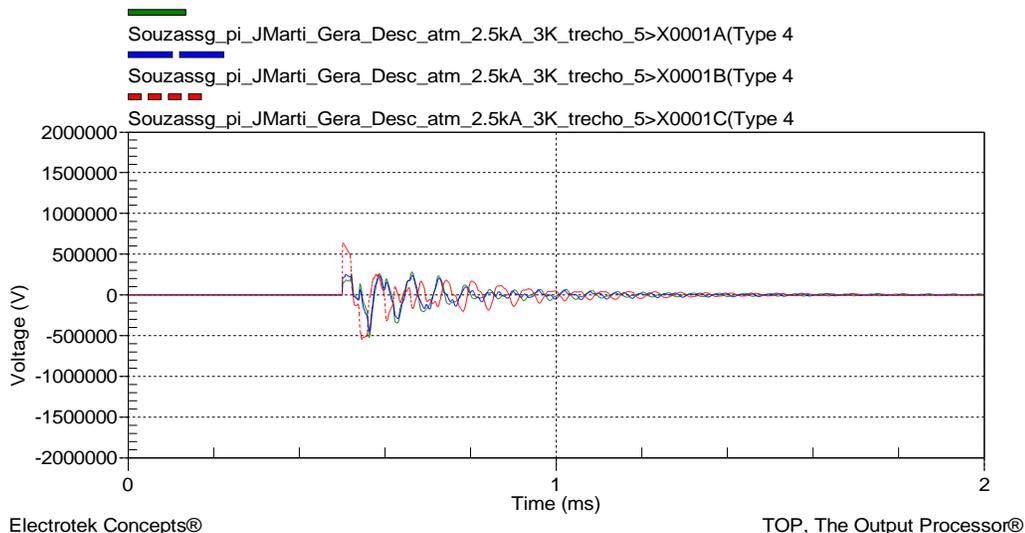


Figura 6-6: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 2,5kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 5 e medida no ponto 2 da linha.

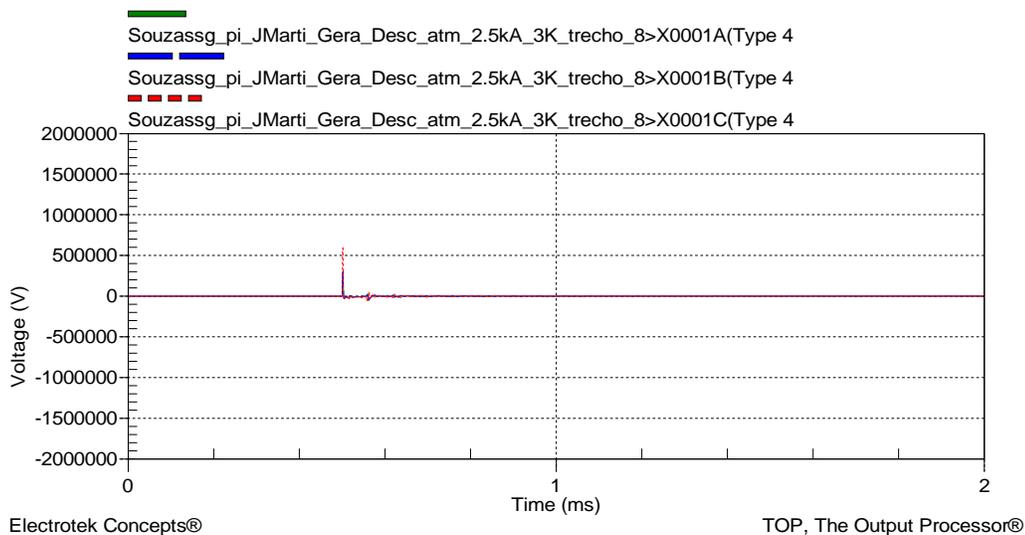


Figura 6-7: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 2,5kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 8 e medida no ponto 2 da linha.

Já da Figura 6-8 à Figura 6-13 vêm-se as formas de onda das tensões em decorrência da aplicação de uma descarga atmosférica com corrente de 4,5 kA e resistência do canal de ionização de 1 k Ω e 3 k Ω , nos pontos 2, 5 e 8 respectivamente. Analisando tais figuras nota-se que quanto maior a corrente da descarga, maiores serão os picos de sobretensão medidos na linha, uma vez que os picos de tensão para simulações com corrente de descarga de 4,5 kA são maiores que os para corrente de 2,5 kA, confirmando novamente os dados tabelados anteriormente.

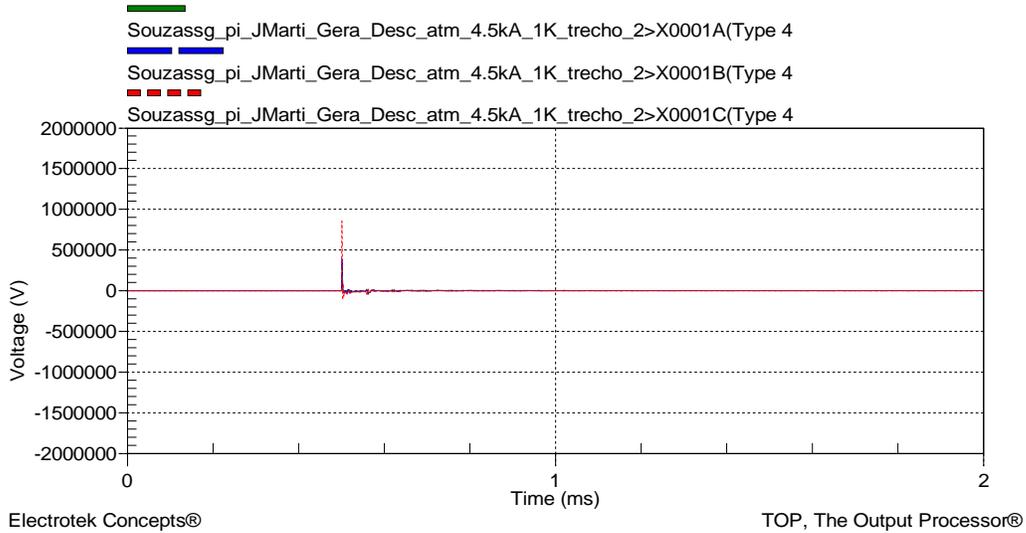


Figura 6-8: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 4,5kA com resistência do canal de ionização de 1k Ω , aplicada no ponto 2 e medida no ponto 2 da linha.

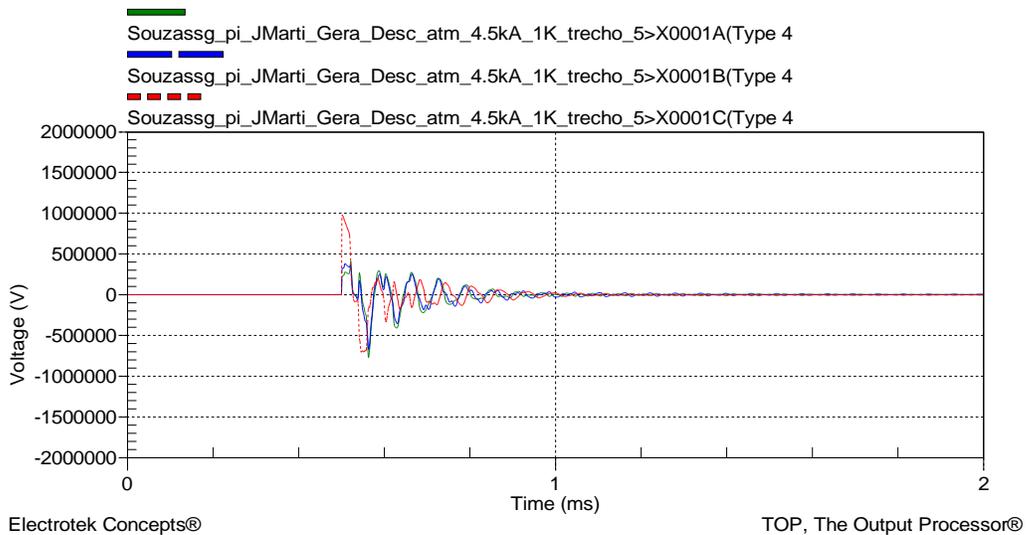


Figura 6-9: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 4,5kA com resistência do canal de ionização de 1k Ω , aplicada no ponto 5 e medida no ponto 2 da linha.

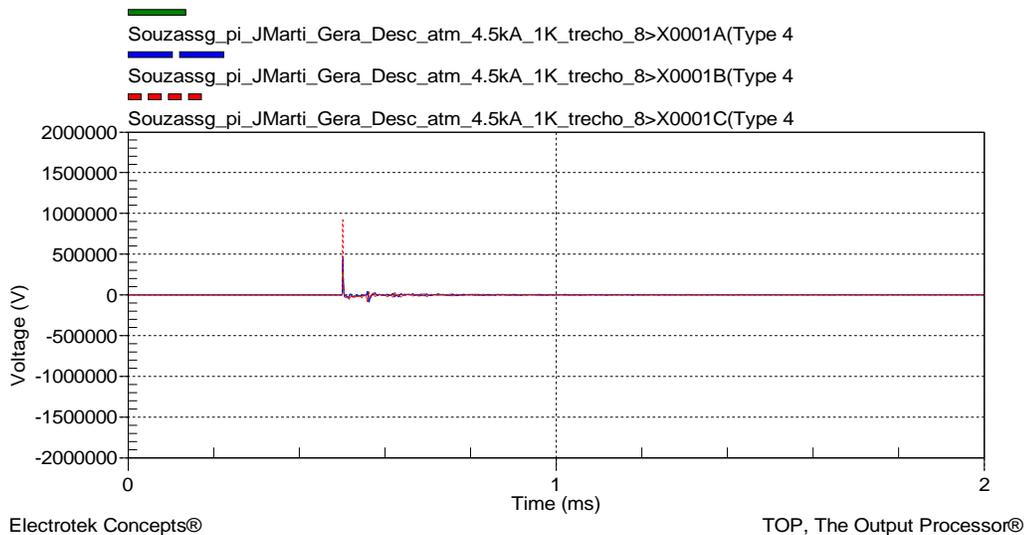


Figura 6-10: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 4,5kA com resistência do canal de ionização de 1kΩ, aplicada no ponto 8 e medida no ponto 2 da linha.

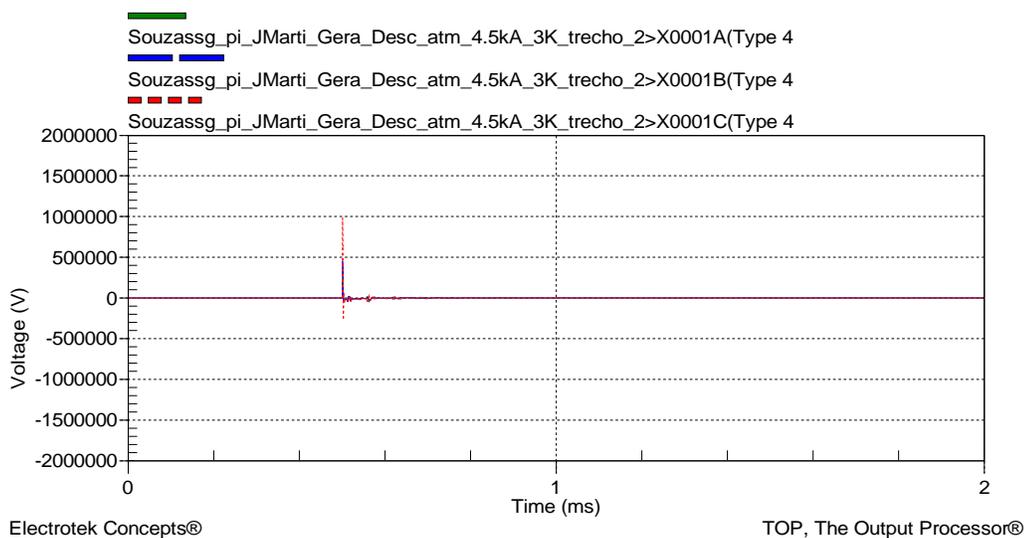


Figura 6-11: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 4,5kA com resistência do canal de ionização de 3kΩ, aplicada no ponto 2 e medida no ponto 2 da linha.

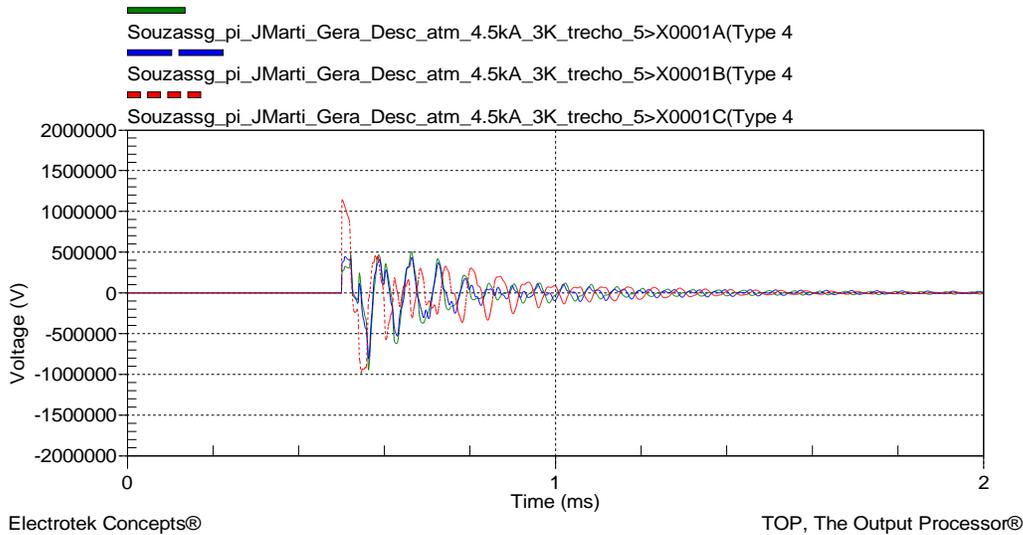


Figura 6-12: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 4,5kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 5 e medida no ponto 2 da linha.

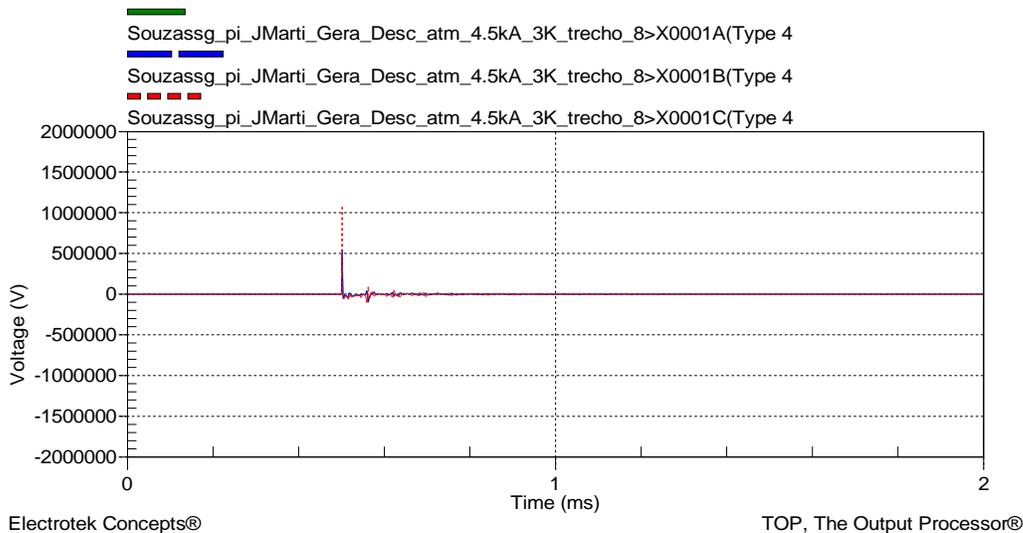


Figura 6-13: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 4,5kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 8 e medida no ponto 2 da linha.

Por fim, da Figura 6-14 à Figura 6-19 apresentam-se as formas de onda das tensões em decorrência da aplicação de uma descarga atmosférica com corrente de 10 kA e resistência do canal de ionização de 1 k Ω e 3 k Ω , nos pontos 2, 5 e 8 respectivamente. Avaliando tais figuras conclui-se que pico das tensões nas fases logo após o instante de aplicação da descarga atinge valores extremamente elevados, comprovando a importância das simulações de descargas atmosféricas em relação às sobretensões em linhas de subtransmissão. Além disso, na Figura 6-18 observa-se que o caso mais crítico para a linha

ocorre quando a mesma sofre a influência de uma corrente de descarga de 10 kA com resistência do canal de 3k Ω ratificando os dados tabelados.

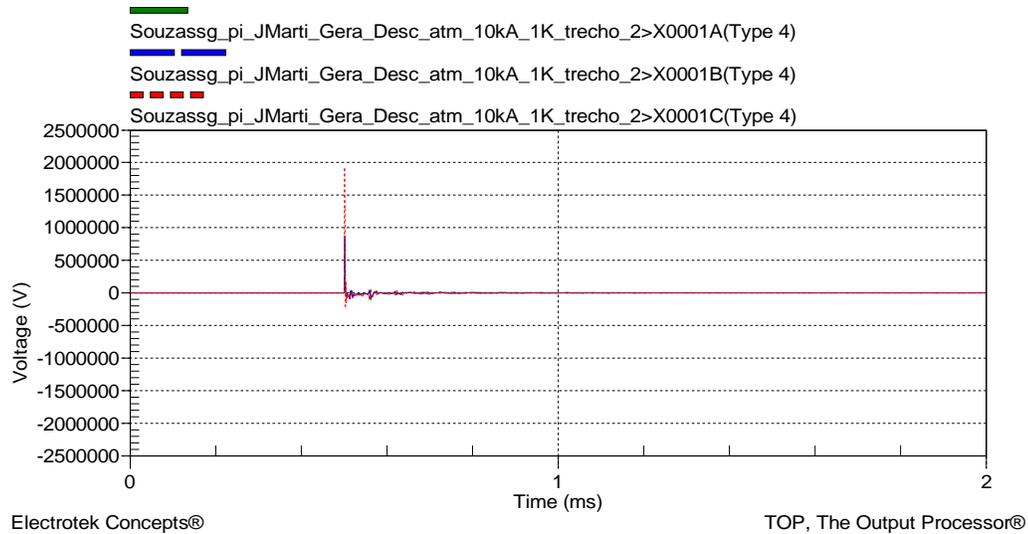


Figura 6-14: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 1k Ω , aplicada no ponto 2 e medida no ponto 2 da linha.

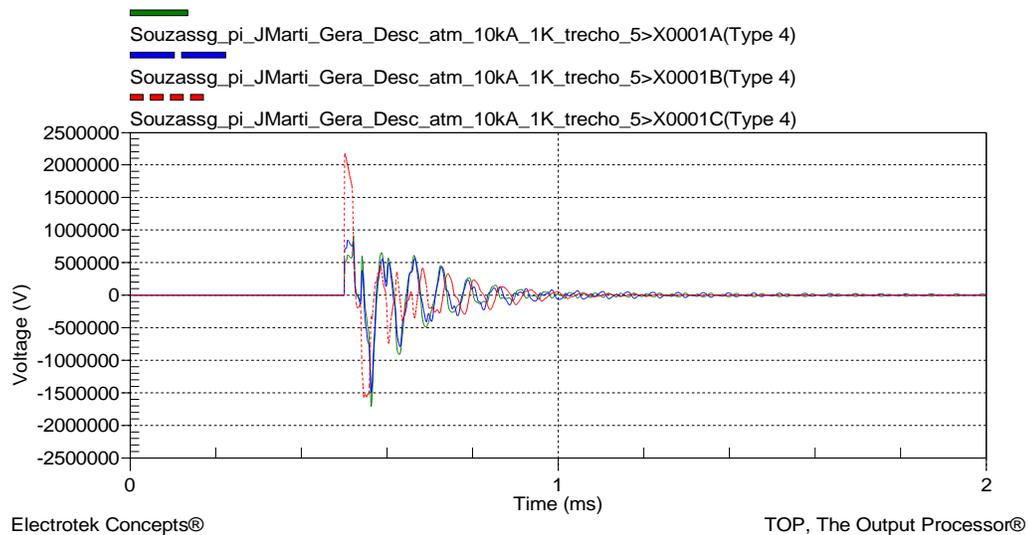


Figura 6-15: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 1k Ω , aplicada no ponto 5 e medida no ponto 2 da linha.

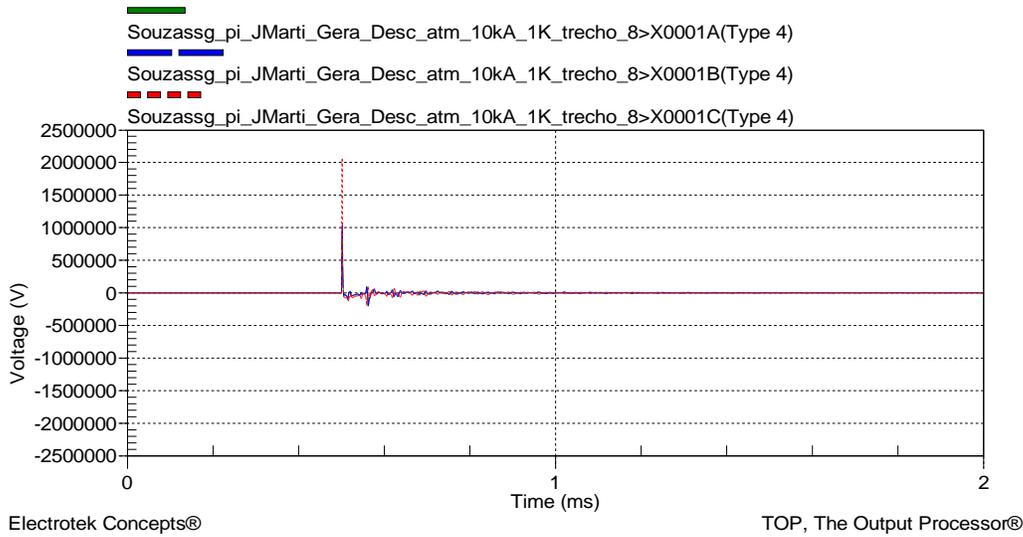


Figura 6-16: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 1k Ω , aplicada no ponto 8 e medida no ponto 2 da linha.

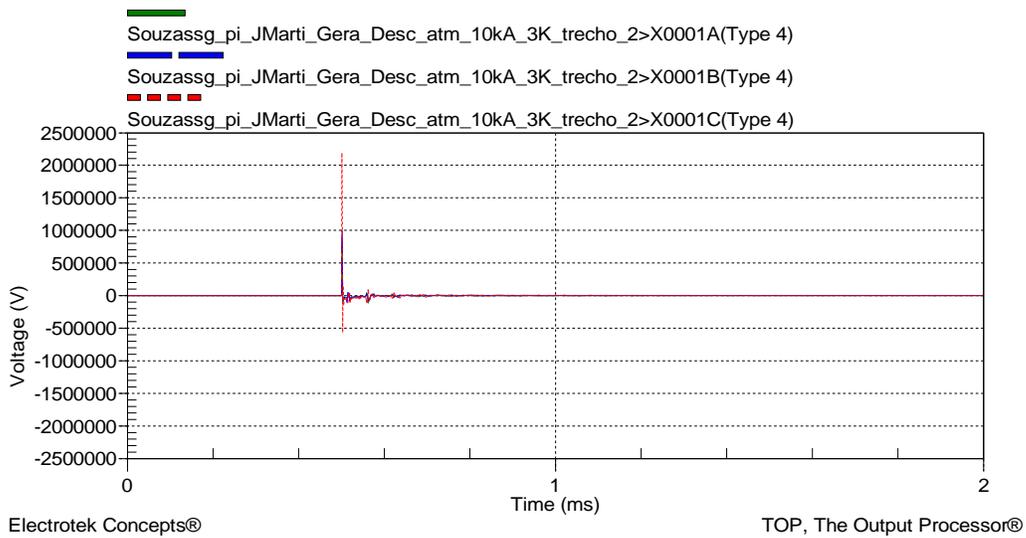


Figura 6-17: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 2 e medida no ponto 2 da linha.

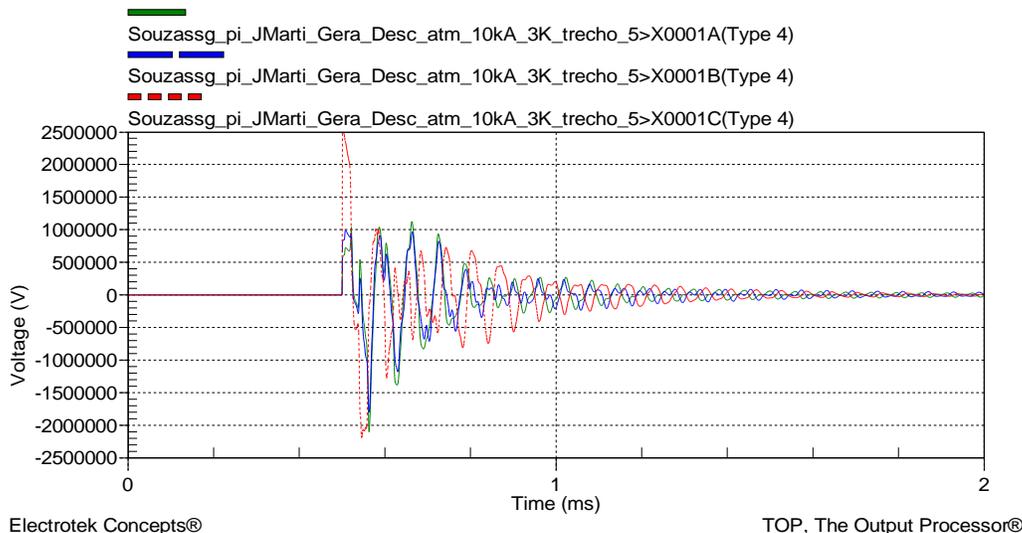


Figura 6-18: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 5 e medida no ponto 2 da linha.

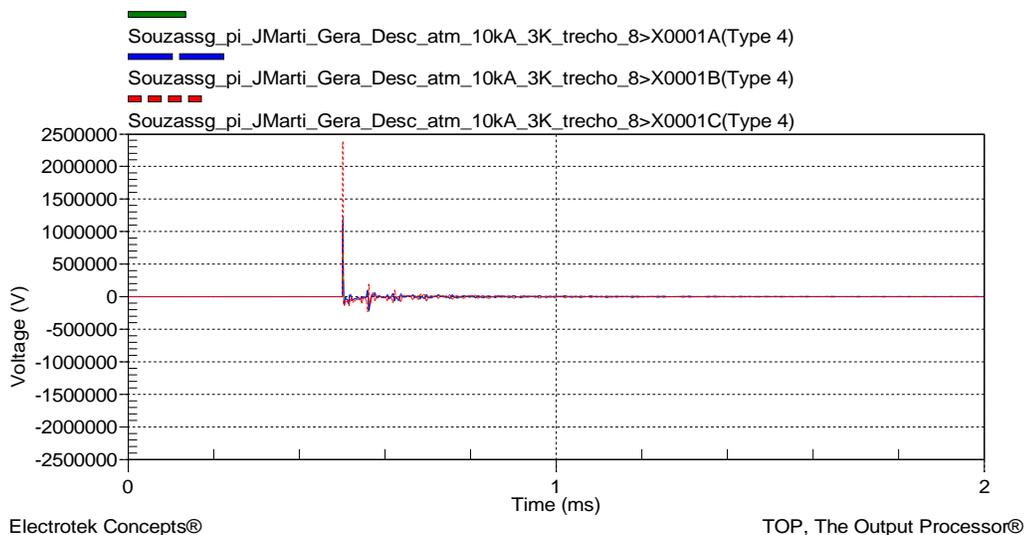


Figura 6-19: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 8 e medida no ponto 2 da linha.

Posto isto, analisando os dados da Tabela 6-1 e os gráficos das simulações realizadas, observa-se que o menor valor positivo e o menor valor negativo em módulo das sobretensões geradas pelas descargas atmosféricas simuladas são de 75,454 kV e -373,661 kV respectivamente, os quais ocorrem para o caso em que a corrente de descarga é de 2,5 kA e a resistência do canal de ionização é de 1 k Ω , e os valores máximos positivo e negativo em módulo das sobretensões geradas são de 2542,751 kV para tensão positiva e -2102,250 kV para tensão negativa, os quais ocorrem para o caso em que a corrente de

descarga é de 10kA, a resistência do canal de ionização é de 3k Ω e a descarga é aplicada e medida no ponto 5 da linha.

Dessa forma, deve-se buscar por um pára-raios que suporte a sobretensão de 2542,751 kV a fim de proteger esta linha contra descargas atmosféricas diretas, e para tanto a seguir será exposto e implementado o modelo de pára-raios proposto em Pinceti e Giannetoni (1999).

Capítulo 7

Modelagem e Validação de Pára-Raios no *Software* ATPDraw

Neste capítulo serão apresentados os requisitos necessários para modelar um pára-raios no *software* ATPDraw, além de uma visão sobre os varistores de ZnO e da configuração do modelo de pára-raios proposto por Pinceti e Giannetoni (1999), para enfim determinar quais as características elétricas do pára-raios necessário para a linha selecionada e realizar a validação do mesmo.

7.1 - MODELAGEM DO PÁRA-RAIOS

Em virtude de pesquisas sobre diversos tipos de materiais para substituição do carboneto de silício na fabricação dos varistores dos pára-raios descobriu-se no óxido de zinco um excelente material com características bastante não-lineares. No entanto, esta não linearidade fez com que fossem necessários estudos computacionais para que os mesmos fossem modelados adequadamente em programas disponíveis no setor elétrico. Neste contexto, existe no *software* *Alternative Transients Program* (ATP) a rotina *ZnO Fitter*, a qual fornece subsídio para o componente MOV Type 92, uma ferramenta computacional adequada para a modelagem deste dispositivo resistivo não-linear.

Dessa maneira, foram desenvolvidos e estudados diversos métodos para modelagem de pára-raios no *software* ATP com os quais foi possível simular o comportamento e a atuação dos mesmos frente a condições que exigissem sua atuação. Sendo assim, o grupo de trabalho 3.4.11 do IEEE foi um dos primeiros a reunir informações das características de varistores de óxido de zinco e propor métodos de simulá-las, averiguando que tais equipamentos possuíam uma significativa dependência da frequência quando expostos a sobretensões de cunho atmosférico (IEEE, 3.4.11-1992), as quais não eram representadas pelo modelo tradicional fornecido pelo componente MOV Type 92 do ATP. Posteriormente, surgiram diversos métodos propostos por diferentes grupos de

pesquisa recomendando a utilização de componentes capacitivos, indutivos e resistivos para representar a característica dependente da freqüência dos pára-raios.

7.1.1 - MODELO PROPOSTO POR PINCETI E GIANNETONI (1999)

O modelo proposto por Pinceti e Giannetoni (1999), escolhido para implementação neste trabalho, baseou-se em trabalhos apresentados em artigos e confrontados com o modelo convencional do ATP e com o modelo do grupo de trabalho 3.4.11 do IEEE (IEEE, 3.4.11-1992). Ressalta-se que este modelo foi escolhido porque representa muito bem as características dinâmicas dos pára-raios, além de somente necessitar de parâmetros elétricos para construir o circuito elétrico correspondente. Além disso, o modelo não precisa de correções iterativas durante o processo de simulação, o que o torna bastante atraente do ponto de vista de esforço computacional e disponibilidade de dados por parte dos fabricantes.

Pinceti e Giannetoni (1999) propuseram algumas modificações no modelo IEEE ilustrado na Figura 7-1 (IEEE, 3.4.11-1992), as quais consistem na eliminação da capacitância do circuito, uma vez que seu efeito é pouco relevante no desempenho do modelo, e substituição das duas resistências em paralelo com as indutâncias por uma única resistência entre os terminais de entrada de aproximadamente $1\text{ M}\Omega$. Esta resistência tem a finalidade de impedir problemas numéricos durante os cálculos computacionais.

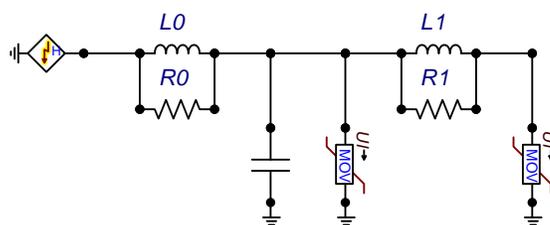


Figura 7-1: Modelo recomendado pelo IEEE.

A Figura 7-2 ilustra o modelo de Pinceti e Giannetoni (1999), na qual se pode ver na extrema esquerda uma Fonte 15 do tipo Heidler, responsável por representar a aplicação de uma descarga atmosférica no sistema. Além disso, existem dois elementos denominados MOV, os quais são responsáveis por representar os resistores não-lineares A0 e A1 através dos componente MOV Type 92, ou seja, representar o pára-raios.

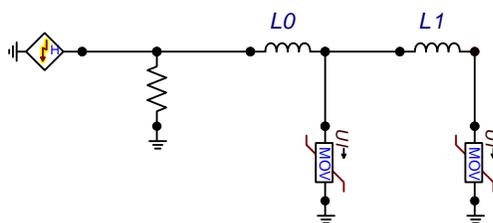


Figura 7-2: Modelo proposto por Pinceti e Giannetoni (1999).

Os parâmetros indutivos do circuito são calculados pela Equação 7.1 e pela Equação 7.2:

$$L0 = \frac{1}{12} \times \frac{V_{R1/T2} - V_{R8/T2}}{V_{R8/20}} \times V_n \quad [\mu H] \quad \text{Equação 7.1}$$

$$L1 = \frac{1}{4} \times \frac{V_{R1/T2} - V_{R8/T2}}{V_{R8/20}} \times V_n \quad [\mu H] \quad \text{Equação 7.2}$$

Nas quais se tem:

- V_n : tensão nominal do pára-raios;
- $V_{R1/T2}$: tensão residual frente a um surto de corrente de módulo 10 kA. O tempo de subida é 1,2 μs , enquanto que o tempo de descida não é explicitado, pois pode assumir diferentes valores para os diferentes fabricantes. Ainda segundo os autores, este fato não traz prejuízos ao modelo, uma vez que o pico de tensão ocorre com a subida do impulso;
- $V_{R8/T2}$: tensão residual para uma corrente com frente de onda de 8 μs ;
- $V_{R8/20}$: tensão residual para uma corrente de 10 kA e forma de onda de 8x20 μs .

As características dos resistores não-lineares A0 e A1 do modelo Pinceti e Giannetoni são baseadas nas curvas apresentadas na Figura 7-3, e explicitadas na Tabela 7-1.

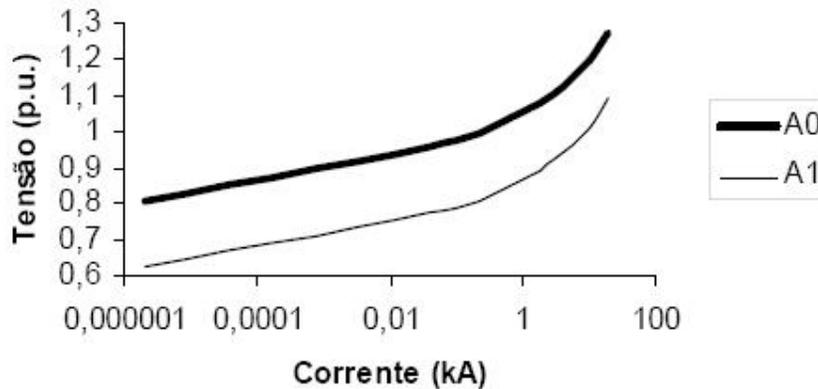


Figura 7-3: Característica V_{xl} do modelo Pinceti e Giannetoni (1999).

Tabela 7-1: Características dos resistores não-lineares do modelo Pinceti e Giannetoni (1999).

Corrente (kA)	A0 Tensão (pu)	A1 Tensão (pu)
2,00E-06	0,81	0,623
0,1	0,974	0,788
1	1,052	0,866
3	1,108	0,922
10	1,195	1,009
20	1,277	1,091

Cabe ressaltar que o modelo proposto leva em consideração apenas as características elétricas para sua modelagem, desconsiderando características físicas, como diâmetro do bloco e altura do pára-raios, tornando o desempenho do dispositivo diretamente associado ao comportamento das indutâncias do seu circuito elétrico.

7.2 - SELEÇÃO DO PÁRA-RAIOS PARA LINHA SELECIONADA

A partir dos dados de operação fornecidos da linha, das sobretensões averiguadas em virtude das simulações de descargas atmosféricas realizadas e expostas no Capítulo 6, e por meios dos dados contidos no Guia do Comprador da ABB (ABB, 2004), será possível verificar qual o melhor pára-raios para a linha em estudo.

Inicialmente, segundo o guia da ABB deve-se consultar a Tabela 7-2 para determinar qual família de pára-raios empregar na linha.

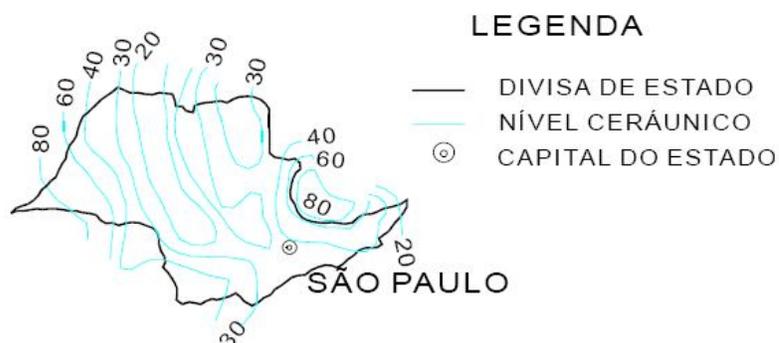
Tabela 7-2: Gama de Produtos ABB (ABB, 2004).

Família de Produtos	Classificação do Pára-Raios	Tipo	Tensão Max do Sistema Um (kVrms)	Tensão Nominal Ur (kVrms)	Requisito de Energia / Intensidade de Descarga Atmosférica	Resistência Mecânica (Nm)
PEXLIM: Pára-Raios Encapsulado em Polímero de Silicone	10 kA, IEC classe 2	PEXLIM R	24 - 170	18 - 144	Moderado	1.600
	10 kA, IEC classe 3	PEXLIM Q	52 - 420	42 - 360	Alto	4.000
	20 kA, IEC classe 4	PEXLIM P	52 - 420	42 - 360	Muito Alto	4.000

Como já se sabe, a tensão da linha é 69 kV, contudo deve ser instalado um pára-raios em cada fase da mesma, logo a tensão máxima de sistema a ser considerada é igual a tensão de fase da linha, ou seja, 39,837 kV. Assim, como se busca proteger a linha contra descargas atmosféricas de 10 kA o pára-raios a ser implementado deve ser do tipo PEXLIM R, como se vê na Tabela 7-2.

Normalmente, os pára-raios são classificados em diferentes classes de acordo com seus níveis de proteção, ensaios de durabilidade, existência ou não de dispositivos de alívio de pressão e tensões do sistema para as quais foram projetados. Dessa forma, por meio da Tabela 7-2 depreende-se que o pára-raios a ser usado neste trabalho deve ser de classe 2 já que a corrente de descarga simulada é de 10 kA e a tensão máxima do sistema 39,837 kV. Contudo, para determinar exatamente esta classe necessita-se saber qual a intensidade de descarga atmosférica.

Dessa maneira, sabendo que de acordo com Kindermann (1992), o índice cerâmico de Campinas, região onde se situa a linha de transmissão escolhida para esse estudo, é de 51, como se verifica na Figura 7-4, calcula-se a densidade de raios para esta região com Equação 3.1, do Capítulo 3.

**Figura 7-4: Nível Ceraúnico do Estado de São Paulo.**

Logo a densidade de raios para a região da linha de transmissão, é dada por:

$$D_R = 0,0024 \times I_c^{1,63} = 0,0024 \times 51^{1,63} = 1,457$$

Ou seja, a densidade de raios é de 1,457 raios por km² por ano na região onde se encontra a linha. Este valor é considerado moderado, o que leva a necessidade de um pára-raios de moderada intensidade de descarga atmosférica e portanto de classe 2, como averiguado anteriormente na Tabela 7-2 da ABB.

Desse modo, o modelo PEXLIM R se torna o mais recomendado para este projeto, sendo o mesmo indicado para proteção de linhas aéreas, comutadores, transformadores e outros equipamentos em sistemas de alta tensão contra sobretensões atmosféricas e de comutação, em áreas com alta densidade de descarga atmosférica e requisitos de energia elevados, e onde as condições de aterramento ou blindagem são deficientes ou insuficientes (ABB, 2004).

7.2.1 - SELEÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DO PÁRA-RAIOS

Após determinar o modelo PEXLIM R cabe agora determinar as características elétricas do mesmo, para que se possa modelá-lo utilizando o *software* ATPDraw. Para cada tensão de sistema, a Tabela 7-3 e a Tabela 7-5, com as características de proteção garantidas, apresentam uma série de tensões Um e Ur, as quais devem ser determinadas e são definidas a seguir.

- Tensão máxima de sistema (Um): é a tensão máxima entre fases durante serviço normal.
- Tensão nominal (Ur): para cumprir o padrão IEC, um pára-raios precisa suportar sua tensão nominal (Ur) durante 10 segundos após ter sido pré-aquecido a 60 °C e submetido a uma injeção de energia como definido no padrão. Ur deverá então igualar, pelo menos, os 10 segundos de capacidade de sobretensão temporária de um pára-raios. Além disso, a tensão nominal é usada como parâmetro de referência.

Para determinar Um deve-se adotar o valor igual ou imediatamente superior à tensão máxima de operação entre fases da linha, que neste caso é 39,837 kV, logo pela Tabela 7-3 adota-se Um = 52 kV.

Tabela 7-3: Características de proteção garantidas do pára-raios EXLIM Q-E (ABB, 2004).

Tensão Máxima de Sistema	Tensão Nominal	Capacidade TOV*	Tensão Residual Máxima com Onda de Corrente				
			1s	10s	5 kA	10 kA	20 kA
Um	Ur	Uc					
[kVrms]	[kVrms]	[kVrms]	[kVrms]	[kVrms]	[kVpico]	[kVpico]	[kVpico]
24	18	14,4	20,7	19,8	44	46,7	52,3
	21	16,8	24,1	23,1	51,3	54,4	61
	24	19,2	27,6	26,4	58,7	62,2	69,7
	27	21,6	31	29,7	66	70	78,4
36	30	24	34,5	33	73,3	77,7	87,1
	33	26,4	37,9	36,3	80,6	85,5	95,8
	36	28,8	41,4	39,6	88	93,3	105
	39	31,2	44,8	42,9	95,3	102	114
	42	34	48,3	46,2	103	109	122
	48	38	55,2	52,8	118	125	140
52	42	34	48,3	46,2	103	109	122
	48	38	55,2	52,8	118	125	140
	51	41	58,6	56,1	125	133	148
	54	43	62,1	59,4	132	140	157
	60	48	69	66	147	156	175
	66	53	75,9	72,6	162	171	192

*TOV – Sobretensões temporárias.

Já para determinar U_r precisa-se analisar a Tabela 7-4, por meio da qual se depreende que $U_r \geq 0,8 \times U_m$, uma vez que o aterramento da linha é considerado eficaz e $U_m \leq 100$ kV, ou seja, $U_r = 0,8 \times 52 = 41,6$ kV. Assim, pela

Tabela 7-3 novamente deve-se tomar o valor igual ou imediatamente superior ao encontrado para U_r e dessa forma adota-se $U_r = 42$ kV.

Tabela 7-4: Tabela para determinação do valor mínimo de U_r do pára-raios (ABB, 2004).

Aterramento do Sistema	Duração da Falha	Tensão do Sistema U_m [kV]	Tensão Nominal Mínima U_r [kV]
Eficaz	$\leq 1s$	≤ 100	$\geq 0,8xU_m$
Eficaz	$\leq 1s$	≥ 123	$\geq 0,72xU_m$
Não-eficaz	$\leq 10s$	≤ 170	$\geq 0,8xU_m$ $\geq 0,72xU_m$ EXLIM T
Não-eficaz	$\leq 2h$	≤ 170	$\geq 1,11xU_m$
Não-eficaz	$> 2h$	≤ 171	$\geq 1,25xU_m$

Posto isto, deve-se determinar os parâmetros V_n , $VR1/T2$, $VR8/T2$ e $VR8/20$, da Equação 7.1 e da Equação 7.2 para implementar o modelo de Pinceti e Giannetoni (1999). Com os dados da

Tabela 7-3 e Tabela 7-5, e fazendo as devidas correspondências tem-se $V_n = 42$ kV, $VR1/T2 = 310$ kV, e $VR8/T2 = VR8/20 = 109$ kV. Dessa forma, já se tem os dados para validação do modelo do pára-raios, a qual será realizada a seguir.

Tabela 7-5: Características de proteção e dos encapsulamentos dos pára-raios EXLIM Q-E (ABB, 2004).

Tensão Máxima de Sistema	Tensão Nominal	Encapsulamento	Distância de Fuga	Isolamento Externo			
				1,2/50 μs	50 Hz	60 Hz	250/2500 μs
U_m	U_r		mm	seco	úmido (60s)	úmido (10s)	úmido
[kVrms]	[kVrms]			[kVpico]	[kVrms]	[kVrms]	[kVpico]
24	18-27	YV024	1863	310	150	150	250
36	30-48	YV036	1863	310	150	150	250
52	42-60	YV052	1863	310	150	150	250
	66	YV052	2270	370	180	180	300

7.3 - VALIDAÇÃO DO MODELO PROPOSTO POR PINCETI E GIANNETONI (1999)

Por meio da Tabela 7-1 e da tensão residual medida para um impulso atmosférico de 10 kA com frente de onda de $1,2x50\mu s$ igual a 310 kV são determinadas as características dos resistores não-lineares A0 e A1, como exposto na Tabela 7-6.

Tabela 7-6: Características de A0 e A1 do pára-raios EXLIM Q-E.

Corrente [kA]	A0 Tensão [kV]	A1 Tensão [kV]
2,00E-06	251,1	193,13
0,1	301,94	244,28
1	326,12	268,46
3	343,48	285,82
10	370,45	312,79
20	395,87	338,21

Não obstante, utilizando a Equação 7.1 e a Equação 7.2 os parâmetros indutivos são determinados.

$$L1 = \frac{1}{4} \times \frac{V_{R1/T2} - V_{R8/T2}}{V_{R8/20}} \times V_n = \frac{1}{4} \times \frac{310 - 109}{109} \times 42 = 19,36 \mu H$$

$$L0 = \frac{1}{12} \times \frac{V_{R1/T2} - V_{R8/T2}}{V_{R8/20}} \times V_n = \frac{1}{12} \times \frac{310 - 109}{109} \times 42 = 6,45 \mu H$$

Dessa forma, com os parâmetros já determinados faz-se a modelagem dos pára-raios no ATPDraw por meio do componente MOV Type 92, gerando as curvas dos resistores não-lineares A0 e A1, mostradas na Figura 7-5 e Figura 7-6, respectivamente.

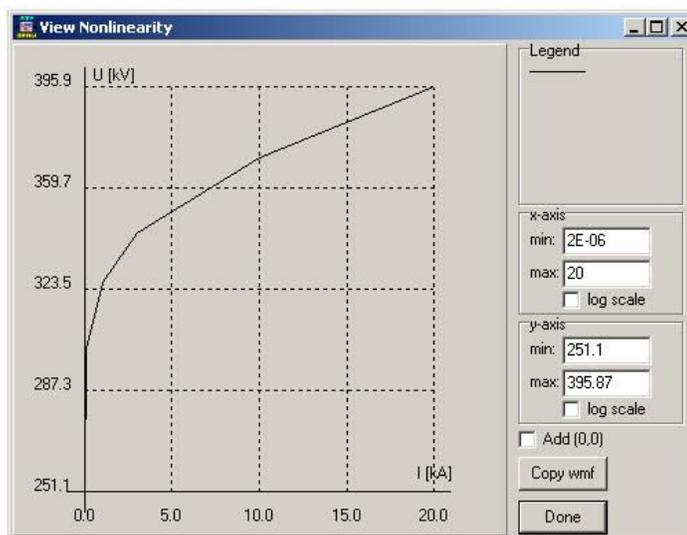


Figura 7-5: Curva de parametrização do resistor não-linear A0.

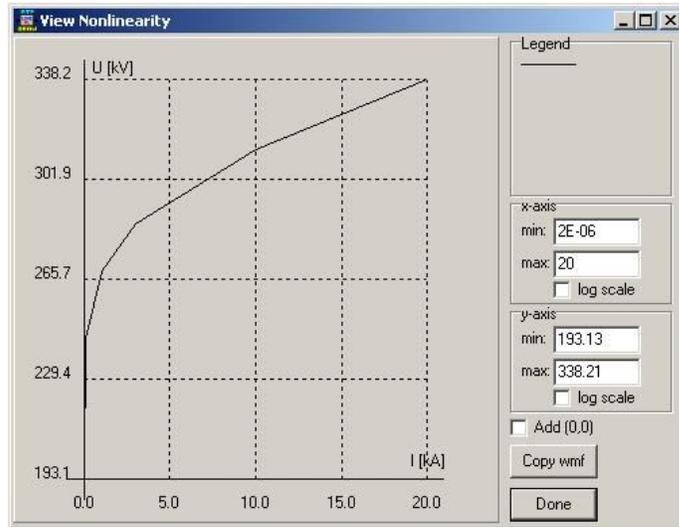


Figura 7-6: Curva de parametrização do resistor não-linear A1.

Por fim, montando o circuito da Figura 7-2 com os resistores não-lineares anteriormente parametrizados, utilizando o resistor de 1 M Ω para evitar má convergência nas simulações. Configurando a Fonte 15 do tipo Heidler para simular uma descarga atmosférica com forma de onda 1,2x50 μ s e corrente de descarga 10 kA obtém-se o resultado da Figura 7-7.

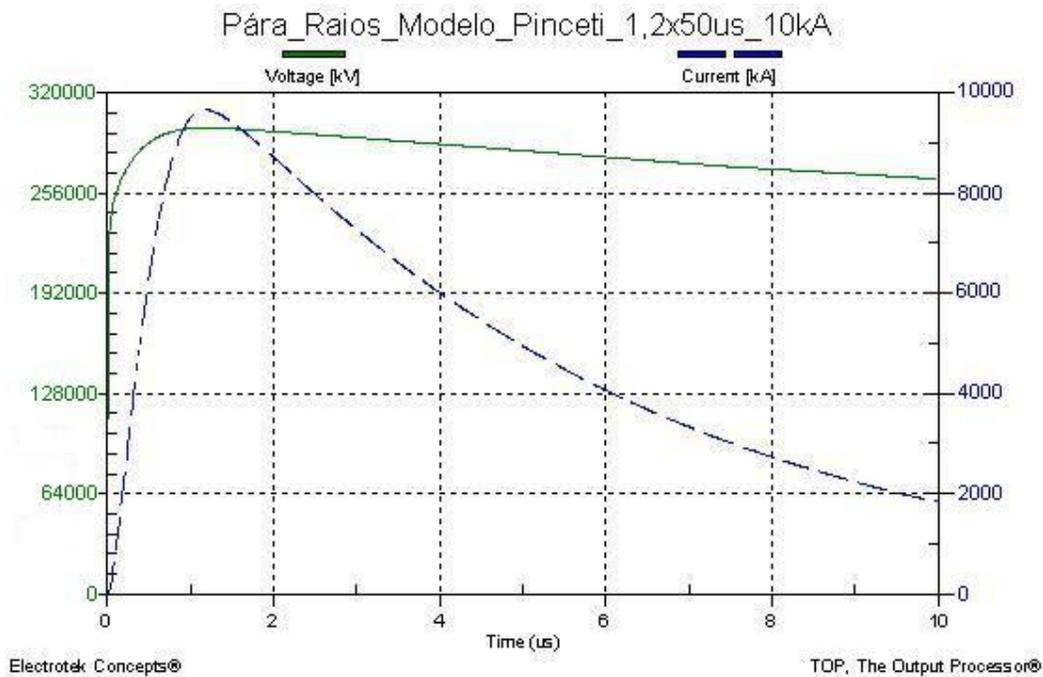


Figura 7-7: Resposta do modelo de Pinceti e Giannetoni (1999) para forma de onda 1,2x50 μ s e corrente de descarga 10 kA.

A partir da Figura 7-7 depreende-se que o modelo de Pinceti e Giannetoni (1999) implementado está operando corretamente, pois a partir do momento em que foi submetido a uma tensão superior a sua tensão nominal, sua impedância sofreu uma grande diminuição dissipando a corrente de impulso atmosférico, limitando o valor da sobretensão resultante e recuperando seu alto valor de impedância após o término da solicitação da tensão.

Posto isto, cabe agora determinar qual o número de pára-raios necessários, a localização dos mesmos e refazer as simulações de descarga atmosférica para avaliar o desempenho da linha sob proteção dos pára-raios.

Capítulo 8

Análise e Simulação da Proteção Realizada pelos Pára-Raios na Linha frente à Ocorrência de Descargas Atmosféricas

Neste capítulo serão apresentadas as simulações de descargas atmosféricas na linha selecionada após a instalação dos pára-raios na mesma. Por meio dessas simulações será determinado o número de pára-raios necessário para proteção da linha e a localização dos mesmos. Também serão avaliadas as sobretensões geradas pelas descargas frente à proteção realizada pelos pára-raios a fim de diagnosticar a sua eficiência.

8.1 - SIMULAÇÕES PARA DETERMINAÇÃO DO NÚMERO E LOCALIZAÇÃO DOS PÁRA-RAIOS

A partir dos dados obtidos no Capítulo 6 e demonstrados na Tabela 6-1, averiguou-se que os valores máximos em módulo das sobretensões geradas pela aplicação de descargas atmosféricas na linha são de 2542,751 kV para tensão positiva e -2102,250 kV para tensão negativa, os quais ocorrem para o caso em que a corrente de descarga é de 10kA, a resistência do canal de ionização é de 3k Ω e a descarga é aplicada e medida no ponto 5 da linha.

Dessa forma, a seguir serão realizadas simulações de descargas atmosféricas empregando o modelo simplificado da linha, como da Figura 6-1, adicionando 2, 3 ou 5 conjuntos de pára-raios do modelo proposto por Pinceti e Giannetoni (1999) como consta na Figura 7-2, e aplicando descargas de 10 kA e resistência do canal de ionização de 3k Ω , no ponto mais crítico da mesma, ou seja, no ponto 5. Um conjunto de pára-raios é composto por 3 pára-raios, sendo um por fase.

8.1.1 - ADIÇÃO DE CONJUNTOS DE PÁRA-RAIOS NOS EXTREMOS DA LINHA

Inicialmente foram feitas simulações com a adição de 2 conjuntos de pára-raios nos extremos da linha, ou seja, ponto 1 e ponto 9, como se vê na Figura 8-1, com as quais foram obtidas as sobretensões geradas na linha e as tensões e correntes averiguadas sob os pára-raios, expostas na Tabela 8-1. Os pontos onde são aplicadas e medidas as descargas atmosféricas são indicados na Figura 6-1.

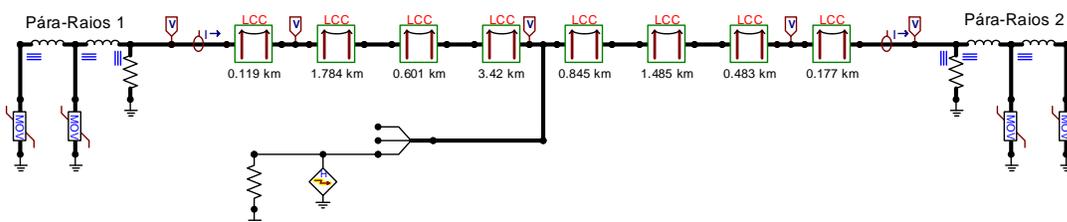


Figura 8-1: Modelo simplificado da linha com pára-raios instalados nos extremos.

Tabela 8-1: Valores máximos de tensão e corrente na linha com 2 conjuntos de pára-raios em decorrência da aplicação de descargas atmosféricas.

Linha com 2 Pára-Raios					
Equipamento		Ponto de Medição	Fase A	Fase B	Fase C
Pára-Raios 1	Corrente [A]	1	3.181,04	-3.049,42	8.754,64
	Tensão [V]	1	-232.843,75	-220.419,72	265.521,81
Pára-Raios 2	Corrente [A]	9	2.909,17	2.118,67	8.159,17
	Tensão [V]	9	-208.937,48	-184.492,75	241.752,51
Medidor de Tensão [V]		2	-818.458,85	-568.811,32	1.408.598,27
Medidor de Tensão [V]		5	-1.599.574,41	-1.441.783,17	2.586.807,41
Medidor de Tensão [V]		8	678.821,93	491.872,63	1.985.627,42

A partir da Tabela 8-1 depreende-se que apenas 2 conjuntos de pára-raios instalados nos extremos da linha não são suficientes para protegê-la uma vez que a máxima sobretensão medida no ponto 5 é de 2.586,807 kV. Entretanto, observa-se o adequado funcionamento dos pára-raios, pois a máxima tensão residual frente a um surto de corrente de módulo 10 kA e tempo de subida 1,2 μ s medida sobre os pára-raios é de 265,521 kV, a qual não ultrapassa o limite estabelecido pelo fabricante que é de 310 kV. Além disso, a maior corrente encontrada, que é de 8,754 kA, igualmente não excede o limite de 10 kA suportável pelos pára-raios.

Da Figura 8-2 à Figura 8-8 são apresentadas as formas de onda das tensões em decorrência da aplicação de uma descarga atmosférica na linha com 2 pára-raios

instalados. Observando tais figuras infere-se que apenas 2 pára-raios não satisfazem as necessidades de proteção da linha estudada, como foi constatado na Tabela 8-1.

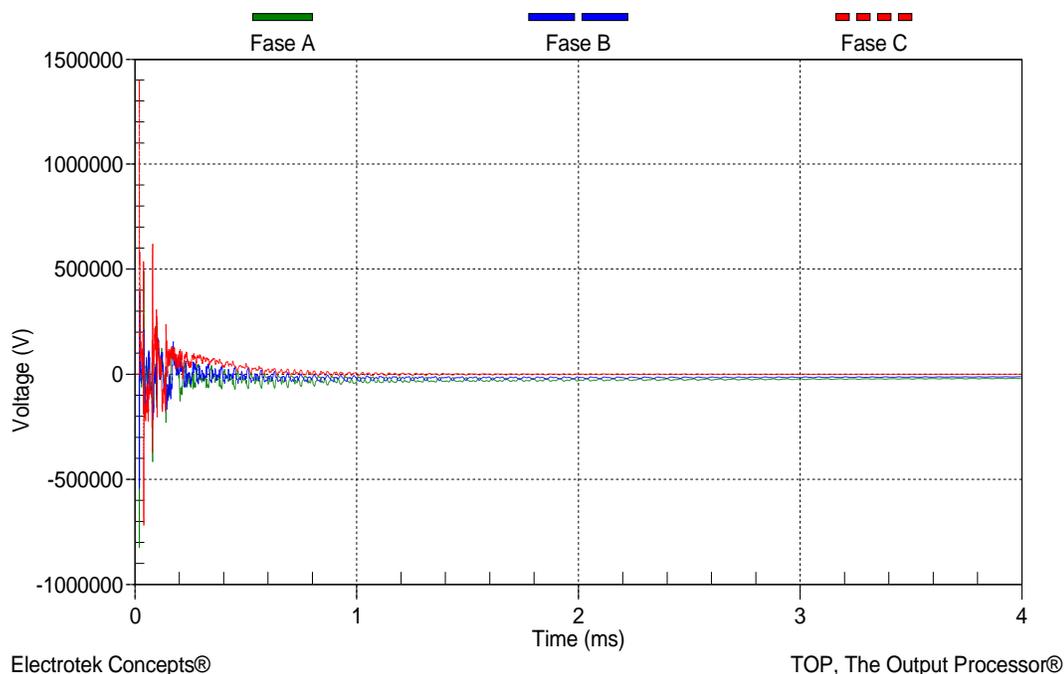


Figura 8-2 Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3kΩ, aplicada no ponto 5 e medida no ponto 2 da linha com 2 pára-raios instalados.

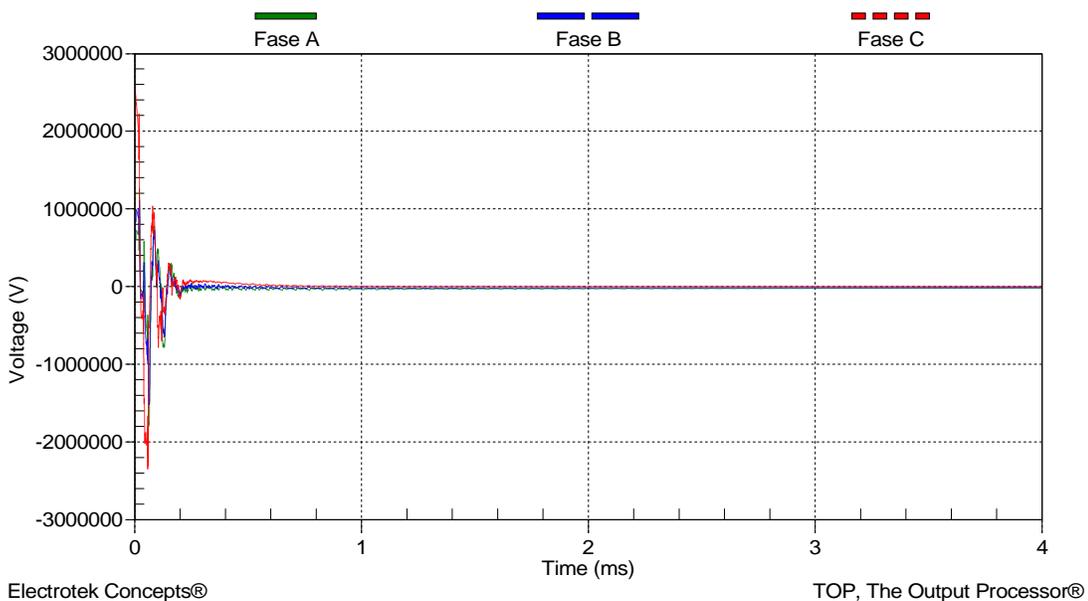


Figura 8-3: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3kΩ, aplicada no ponto 5 e medida no ponto 5 da linha com 2 pára-raios instalados.

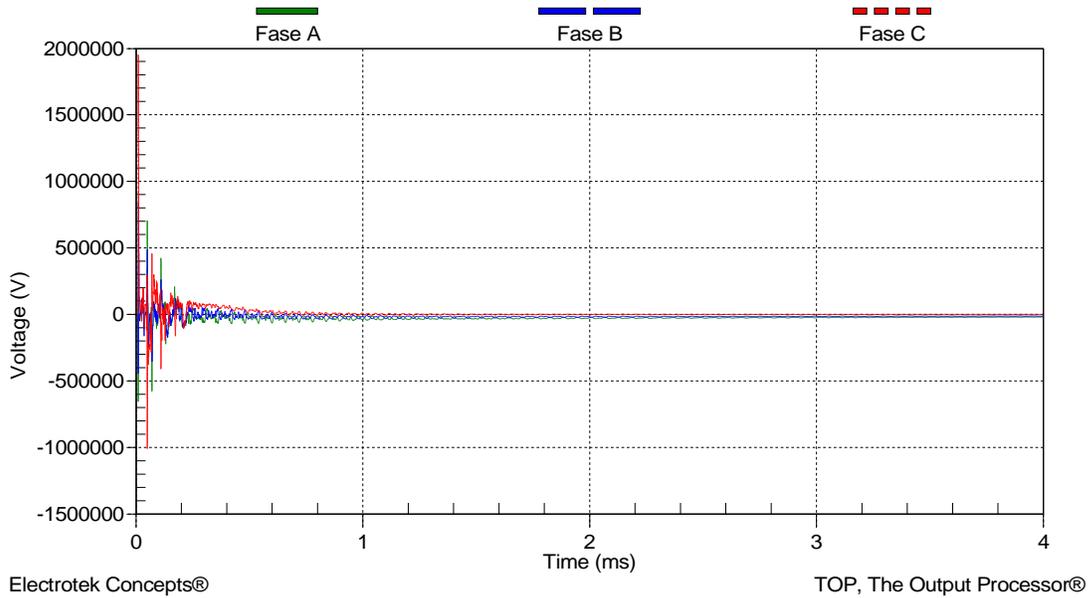


Figura 8-4: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3kΩ, aplicada no ponto 5 e medida no ponto 8 da linha com 2 pára-raios instalados.

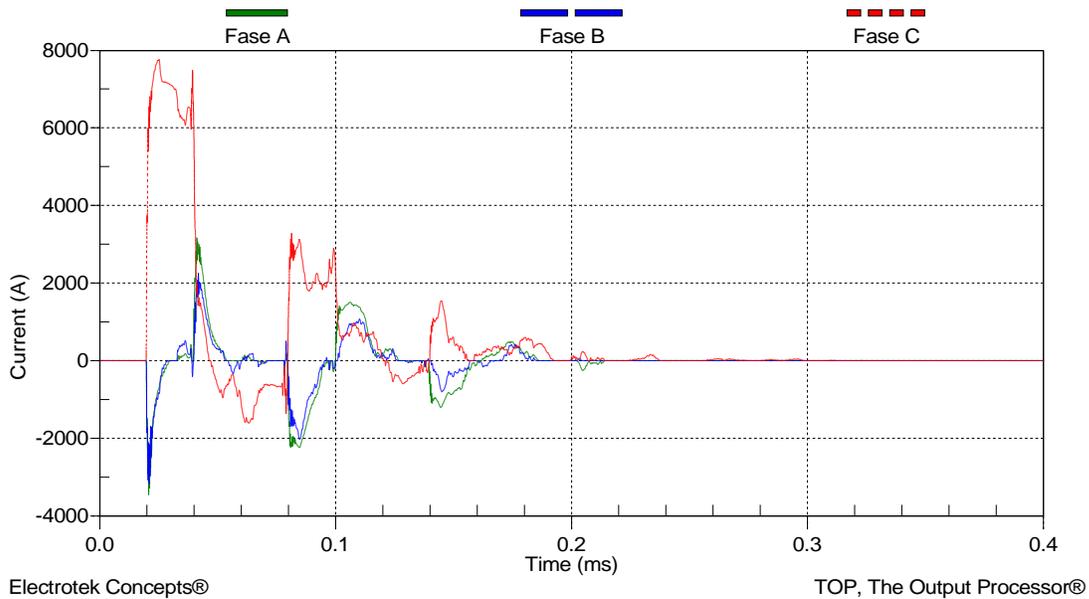


Figura 8-5: Corrente nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3kΩ, aplicada no ponto 5 e medida sob o pára-raios 1 da linha.

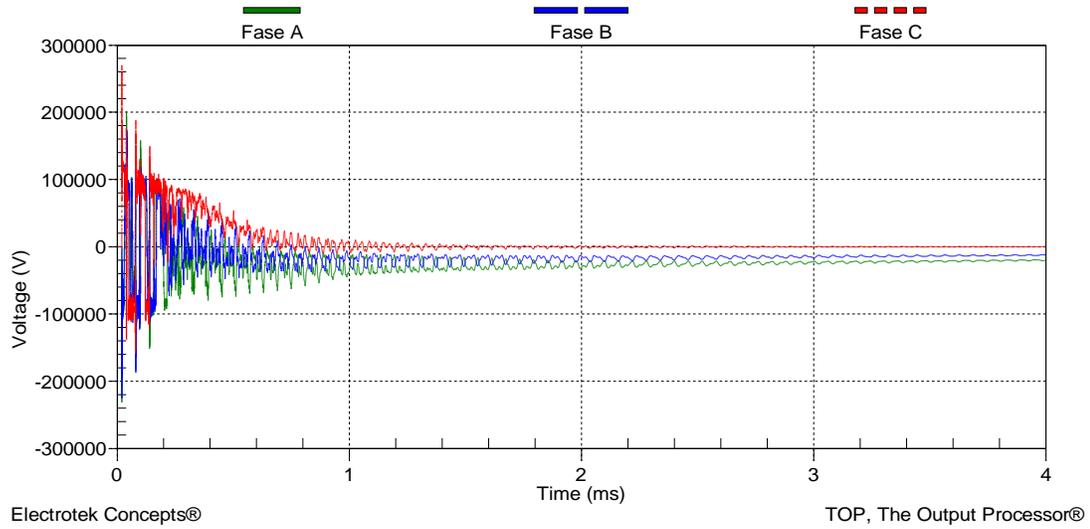


Figura 8-6: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 5 e medida sob o pára-raios 1 da linha.

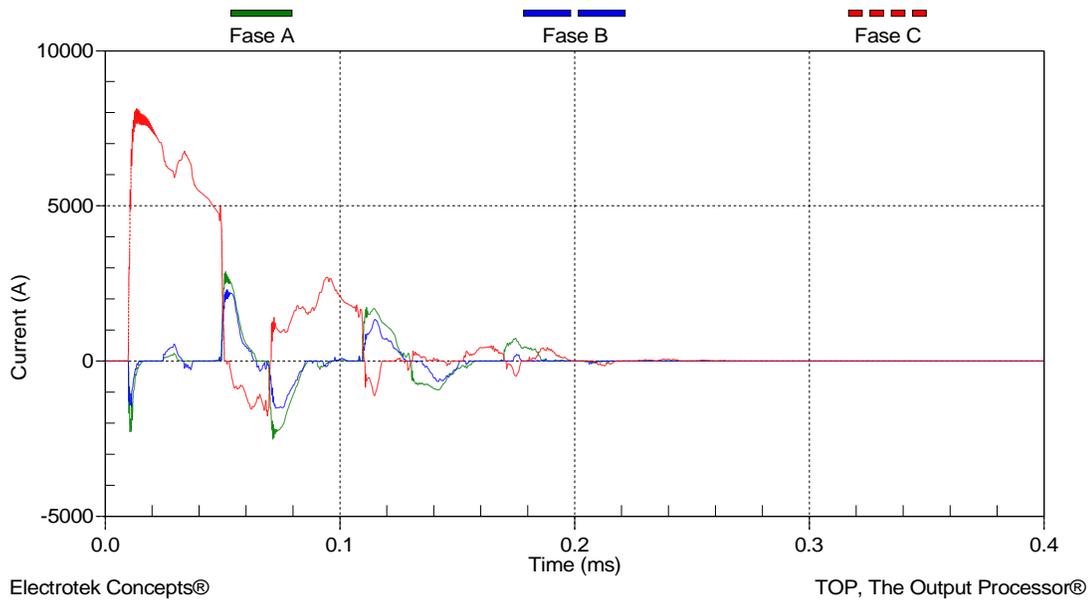


Figura 8-7: Corrente nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 5 e medida sob o pára-raios 2 da linha.

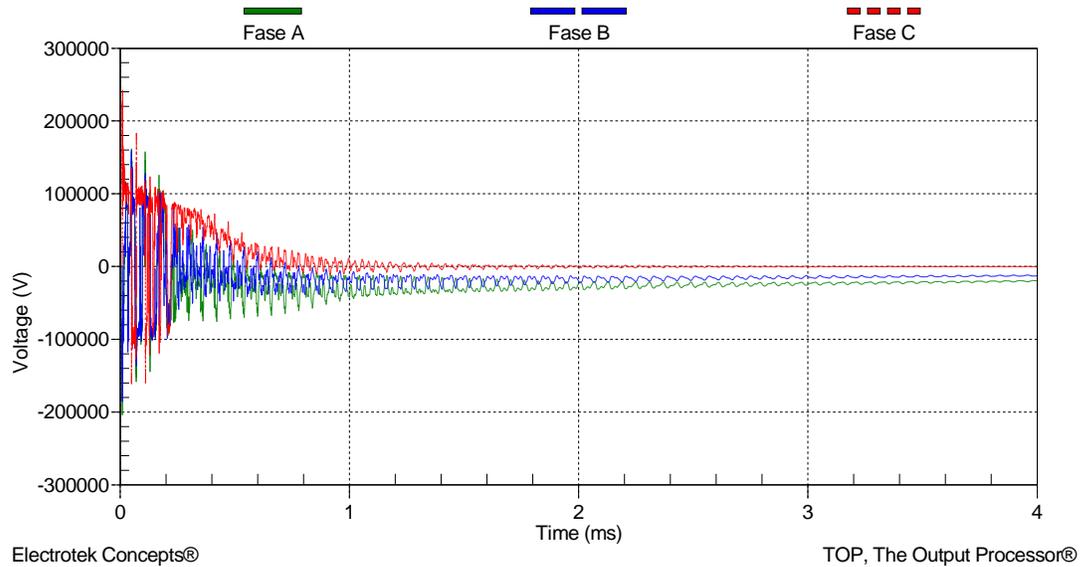


Figura 8-8: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3kΩ, aplicada no ponto 5 e medida sob o pára-raios 2 da linha.

8.1.2 - ADIÇÃO DE 3 CONJUNTOS DE PÁRA-RAIOS NA LINHA

Também foram feitas simulações acrescentando 3 conjuntos de pára-raios na linha, localizados nos pontos 1, 5 e 9 como se observa na Figura 8-9, com as quais foram conseguidas mais uma vez as sobretensões geradas na linha e as tensões e correntes medidas sob os 3 pára-raios, como constatado na Tabela 8-2.

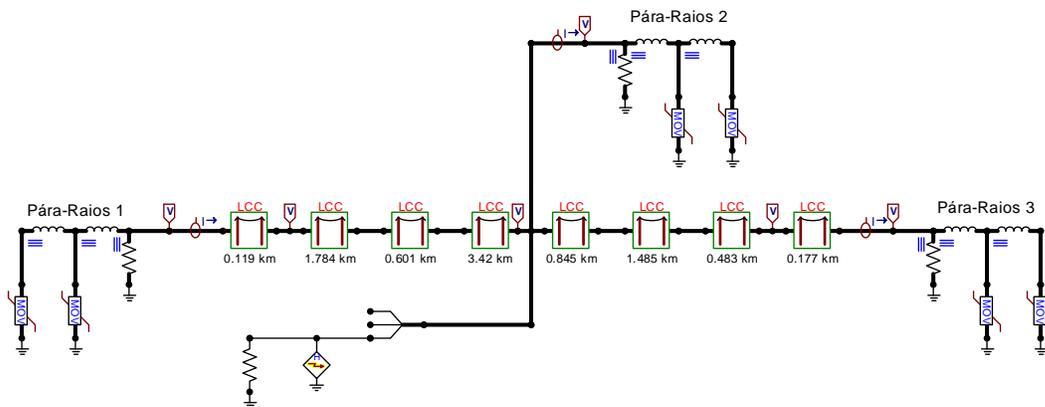


Figura 8-9: Modelo simplificado da linha com pára-raios nos pontos 1, 5 e 9.

Tabela 8-2: Valores máximos de tensão e corrente na linha com 3 conjuntos de pára-raios em decorrência da aplicação de descargas atmosféricas.

Linha com 3 Conjuntos de Pára-Raios					
Equipamento		Ponto de Medição	Fase A	Fase B	Fase C
Pára-Raios 1	Corrente [A]	1	-322,15	-289,24	-454,71
	Tensão [V]	1	-114.482,01	-132.749,19	141.842,08
Pára-Raios 2	Corrente [A]	5	0,94	1,61	9.480,11
	Tensão [V]	5	148.406,92	132.489,76	162.487,43
Pára-Raios 3	Corrente [A]	9	-141,83	-97,38	364,54
	Tensão [V]	9	-112.489,56	-106.479,72	125.481,02
Medidor de Tensão [V]		2	-135.546,48	-111.486,03	244.527,72
Medidor de Tensão [V]		5	155.182,84	132.791,09	161.219,76
Medidor de Tensão [V]		8	-118.487,26	-102.792,12	133.148,67

A partir da Tabela 8-2 depreende-se que com a instalação de 3 conjuntos de pára-raios, a linha encontra-se protegida, já que a máxima sobretensão medida para este caso se dá no ponto 2 e é de 244,527 kV. Além disso, observa-se que a tensão residual frente a um surto de corrente de módulo 10 kA e tempo de subida 1,2 μ s medida sobre os pára-raios é de 162,487 kV e não ultrapassa o limite estabelecido pelo fabricante que é de 310 kV, e a maior corrente encontrada, que é de 9,480 kA, igualmente não excede o limite de 10 kA suportável pelo pára-raios, caracterizando o perfeito funcionamento dos mesmos.

Já da Figura 8-10 à Figura 8-18 depara-se com as formas de onda das tensões em decorrência da aplicação de uma descarga atmosférica na linha com 3 pára-raios instalados, e observando tais figuras infere-se que 3 pára-raios satisfazem as necessidades de proteção da linha examinada, como foi constatado na Tabela 8-2.

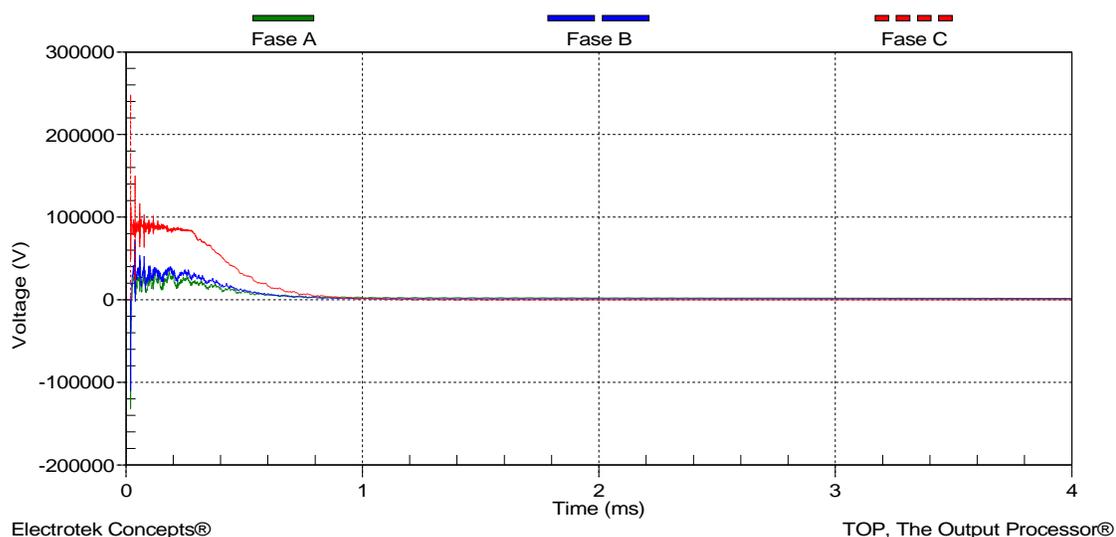


Figura 8-10: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 5 e medida no ponto 2 da linha com 3 pára-raios instalados.

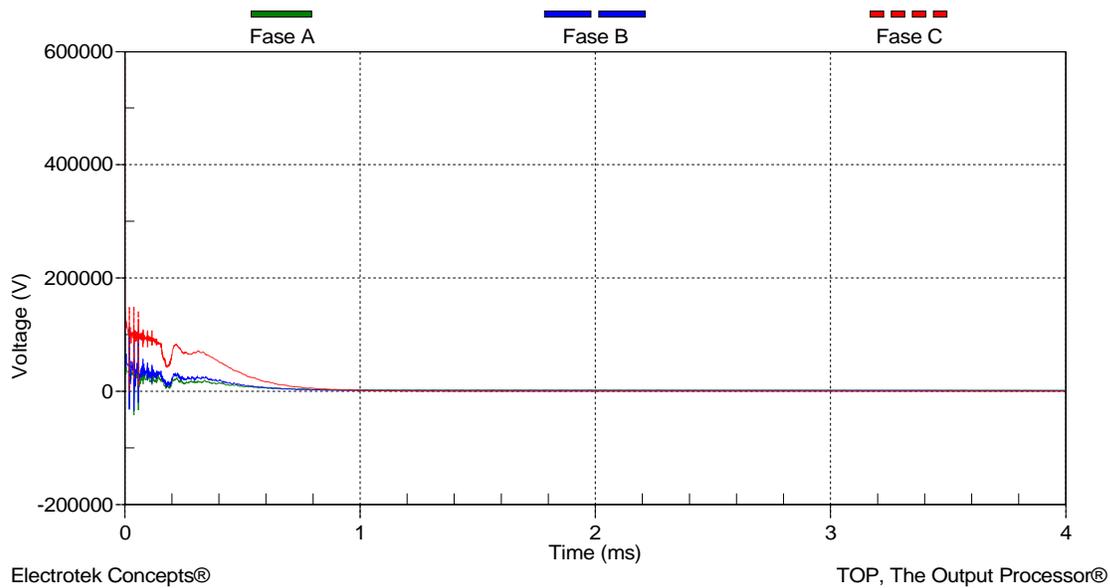


Figura 8-11: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 5 e medida no ponto 5 da linha com 3 pára-raios instalados.

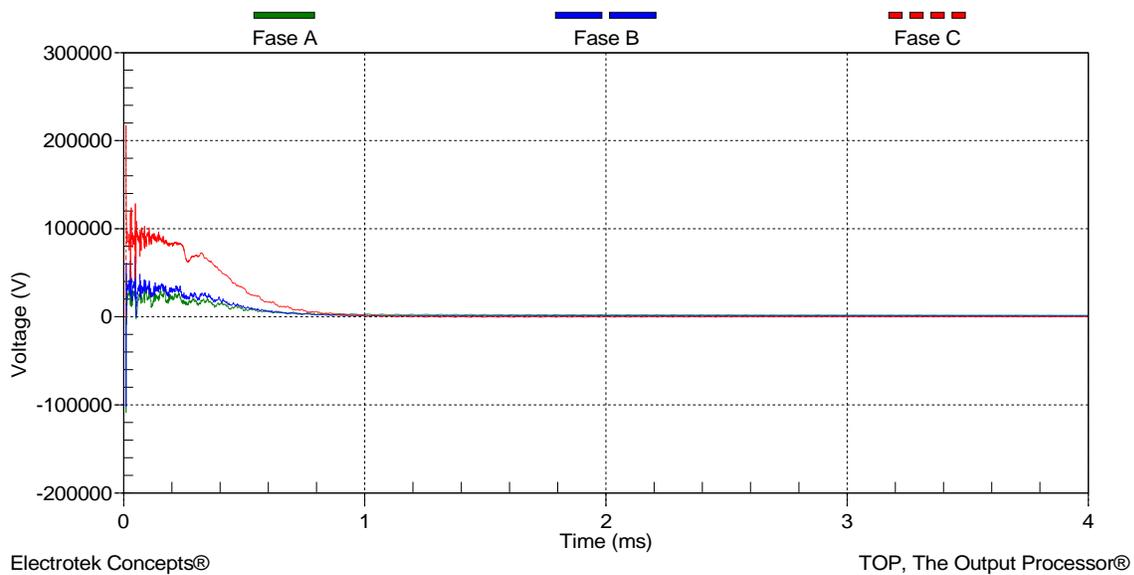


Figura 8-12: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 5 e medida no ponto 8 da linha com 3 pára-raios instalados.

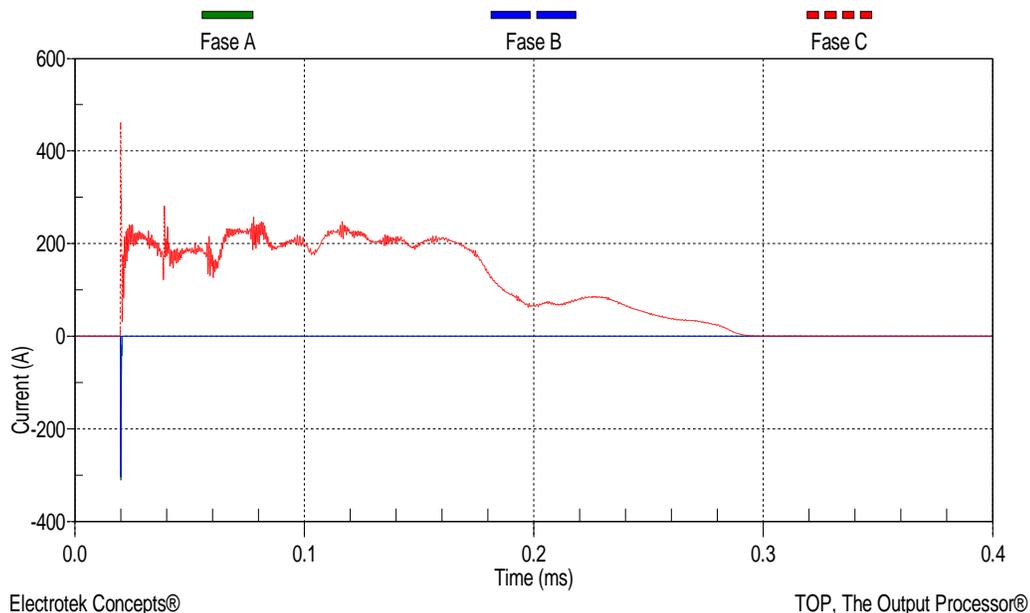


Figura 8-13: Corrente nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3kΩ, aplicada no ponto 5 e medida sob o pára-raios 1 da linha.

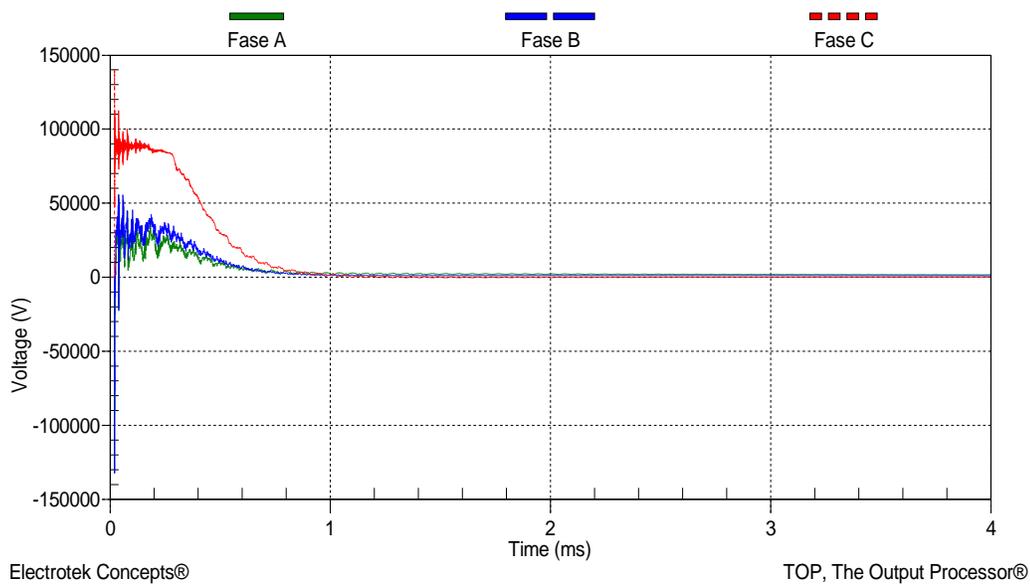


Figura 8-14: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3kΩ, aplicada no ponto 5 e medida sob o pára-raios 1 da linha.

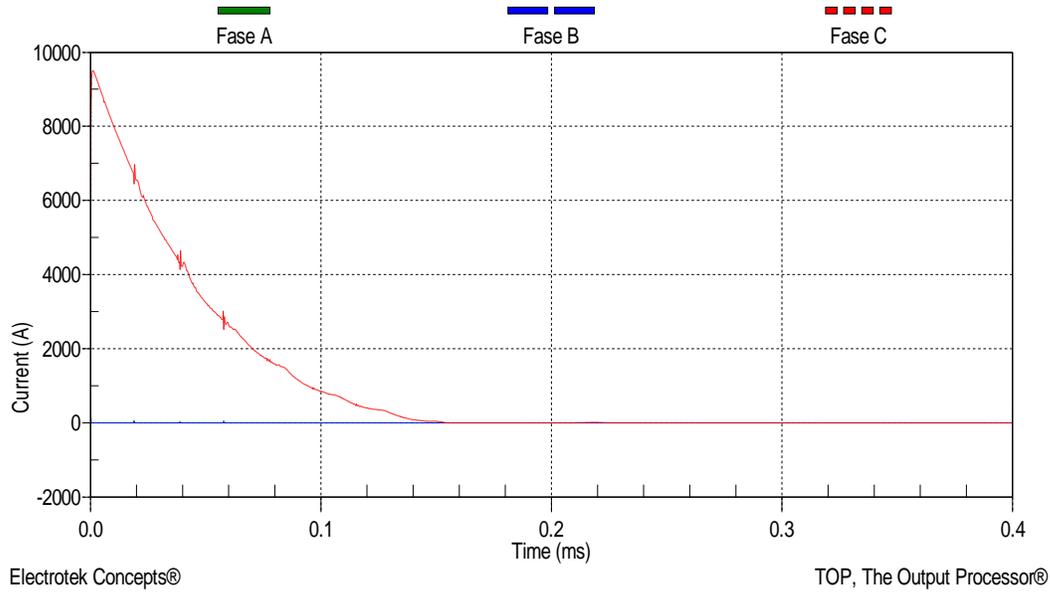


Figura 8-15: Corrente nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 5 e medida sob o pára-raios 2 da linha.

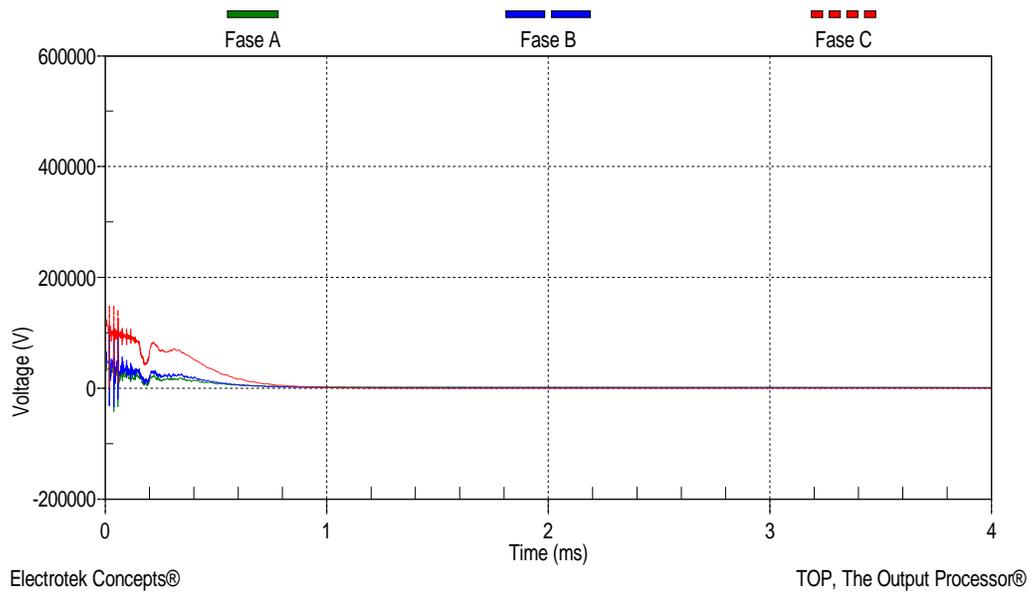


Figura 8-16: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 5 e medida sob o pára-raios 2 da linha.

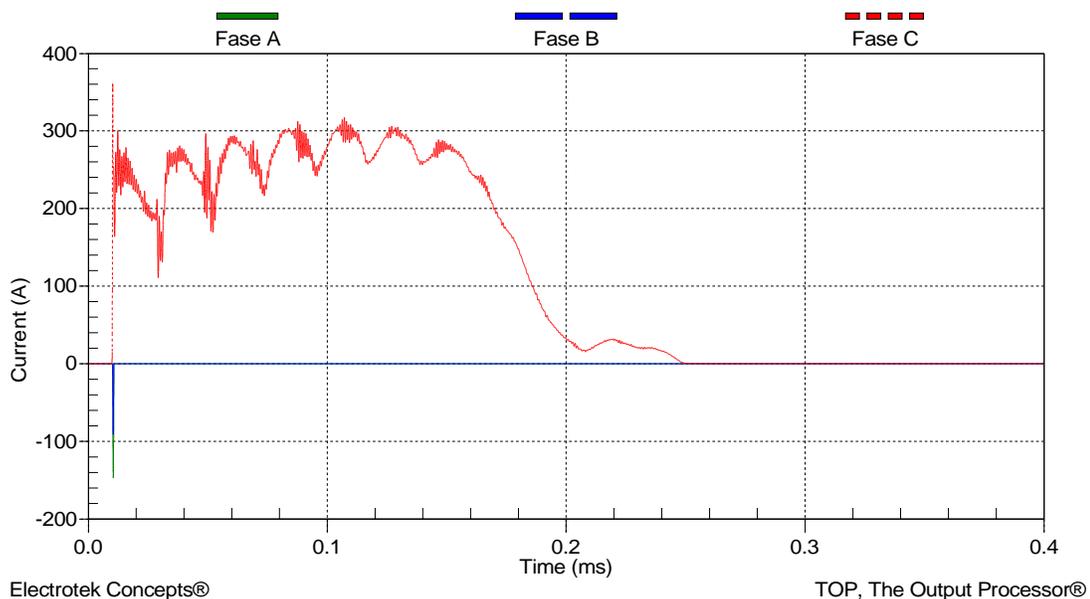


Figura 8-17: Corrente nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3kΩ, aplicada no ponto 5 e medida sob o pára-raios 3 da linha.

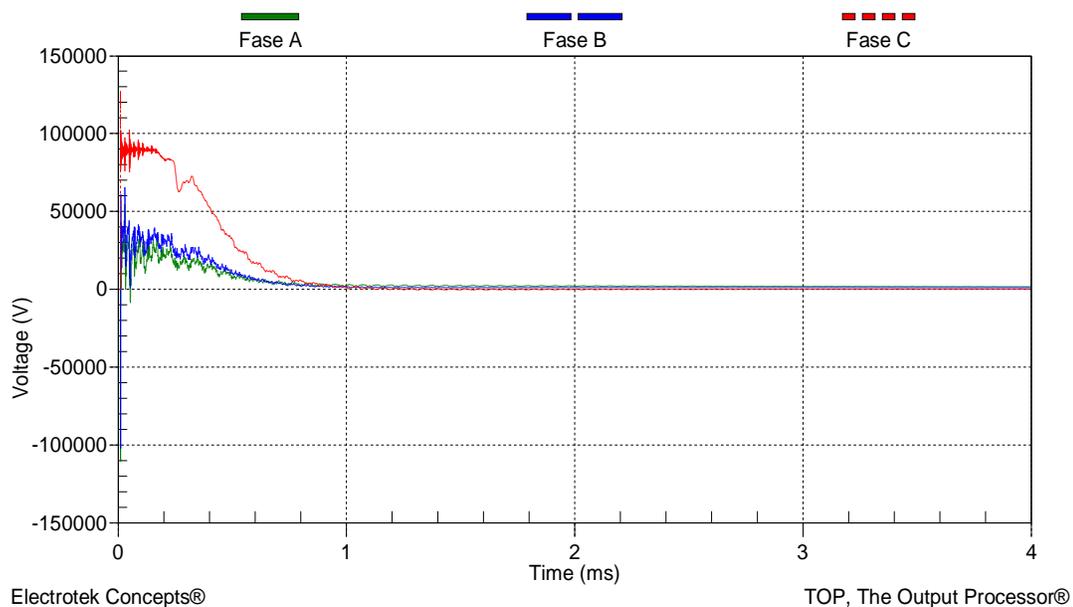


Figura 8-18: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3kΩ, aplicada no ponto 5 e medida sob o pára-raios 3 da linha.

8.1.3 - ADIÇÃO DE 5 CONJUNTOS DE PÁRA-RAIOS NA LINHA

Por fim, realizaram-se simulações acrescentando 5 conjuntos de pára-raios na linha, localizados nos pontos 1, 3, 5, 7 e 9, como se observa na Figura 8-19, com as quais novamente foram obtidas as sobretensões geradas na linha e as tensões e correntes medidas sob os 5 conjuntos de pára-raios, como mostrado na Tabela 8-3.

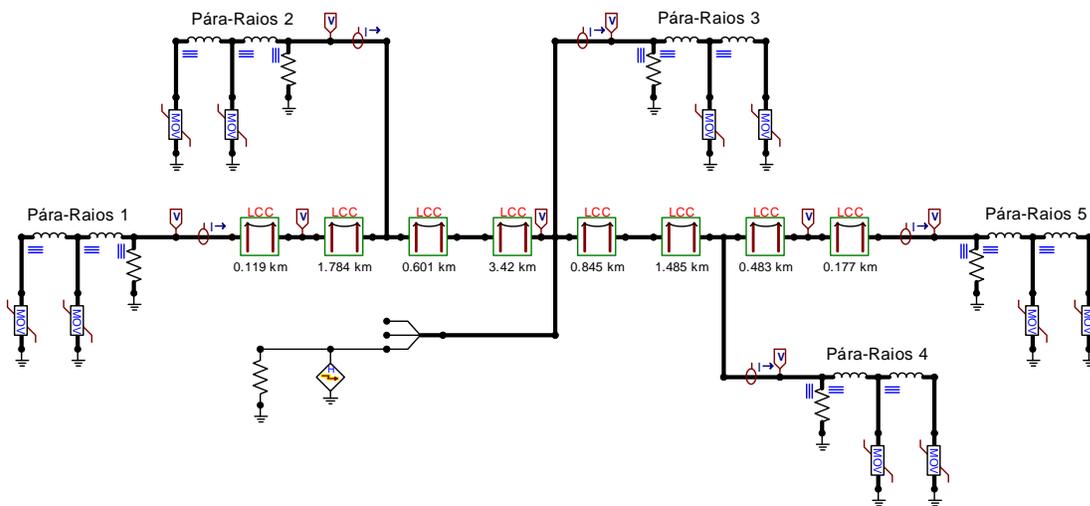


Figura 8-19: Modelo simplificado da linha com pára-raios nos pontos 1, 3, 5, 7 e 9.

Tabela 8-3: Valores máximos de tensão e corrente na linha com 5 conjuntos de pára-raios em decorrência da aplicação de descargas atmosféricas.

Linha com 5 Conjuntos de Pára-Raios					
Equipamento		Ponto de Medição	Fase A	Fase B	Fase C
Pára-Raios 1	Corrente [A]	1	-122,61	-157,81	263,42
	Tensão [V]	1	-78.419,22	-118.710,79	124.712,43
Pára-Raios 2	Corrente [A]	3	-157,29	-164,84	578,08
	Tensão [V]	3	-134.782,07	-128.478,36	179.875,71
Pára-Raios 3	Corrente [A]	5	1,83	2,49	9.247,14
	Tensão [V]	5	84.109,07	97.463,72	110.473,82
Pára-Raios 4	Corrente [A]	7	-178,37	-122,78	7.154,86
	Tensão [V]	7	-138.207,49	-124.053,75	177.432,19
Pára-Raios 5	Corrente [A]	9	58,62	32,43	197,37
	Tensão [V]	9	-92.760,87	-91.407,51	112.459,43
Medidor de Tensão [V]		2	-124.792,14	-102.730,78	237.458,07
Medidor de Tensão [V]		5	138.791,46	113.719,482	146.934,34
Medidor de Tensão [V]		8	-97.471,82	-91.931,71	136.432,05

A partir da Tabela 8-3 infere-se que com a instalação de 5 pára-raios a linha encontra-se protegida, uma vez que a máxima sobretensão medida para este caso se dá no ponto 2 e é igual a 237,458 kV. Ademais, ressalta-se que a máxima tensão residual frente a um surto de corrente de módulo 10 kA e tempo de subida 1,2 μ s medida sob os pára-raios é igual a 179,875 kV a qual não ultrapassa o limite estabelecido pelo fabricante que é de 310 kV, e a maior corrente medida, que é de 9,247 kA, do mesmo modo não excede o limite de 10 kA suportável pelos pára-raios, caracterizando o completo funcionamento dos mesmos.

Não obstante, pode-se concluir que as sobretensões resultantes das descargas na linha com 3 e 5 conjuntos de pára-raios instalados apresentam pouquíssimas diferenças entre si. Logo, levando-se em conta a viabilidade econômica do projeto compreende-se que seria mais adequada a utilização de apenas 3 conjuntos de pára-raios dispostos nos pontos 1, 5 e 9 como apresentado anteriormente, dados os elevados custos dos mesmos e de sua implantação.

Da Figura 8-20 à Figura 8-32 vêem-se as formas de onda de corrente e tensão em consequência da aplicação de uma descarga atmosférica na linha com 5 pára-raios instalados, e novamente deduz-se que 5 pára-raios satisfazem as necessidades de proteção da linha pesquisada.

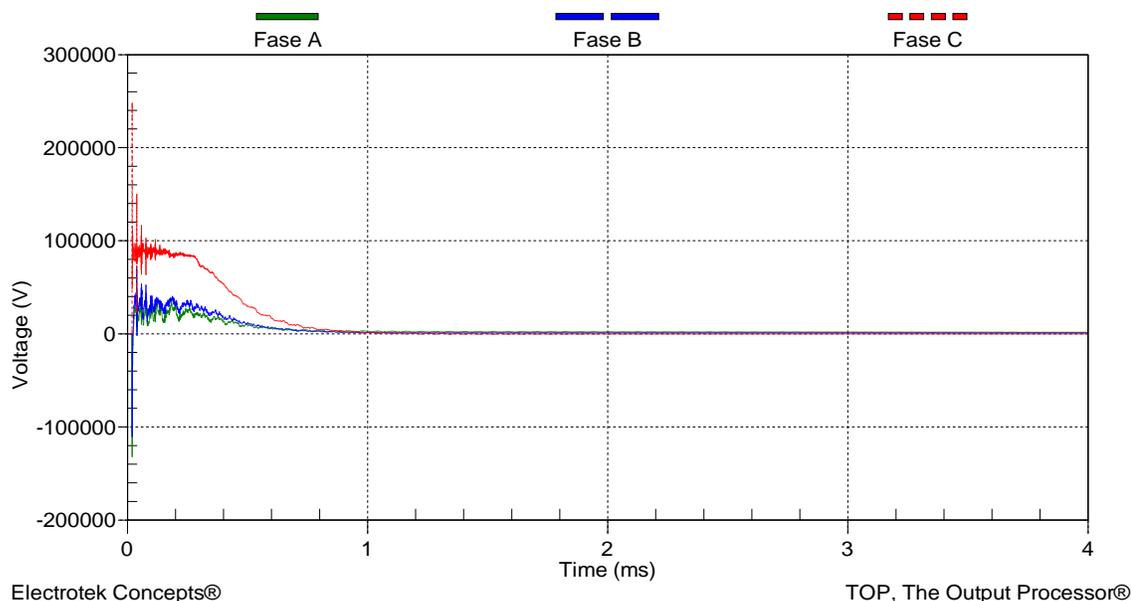


Figura 8-20: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 5 e medida no ponto 2 da linha com 5 pára-raios instalados.

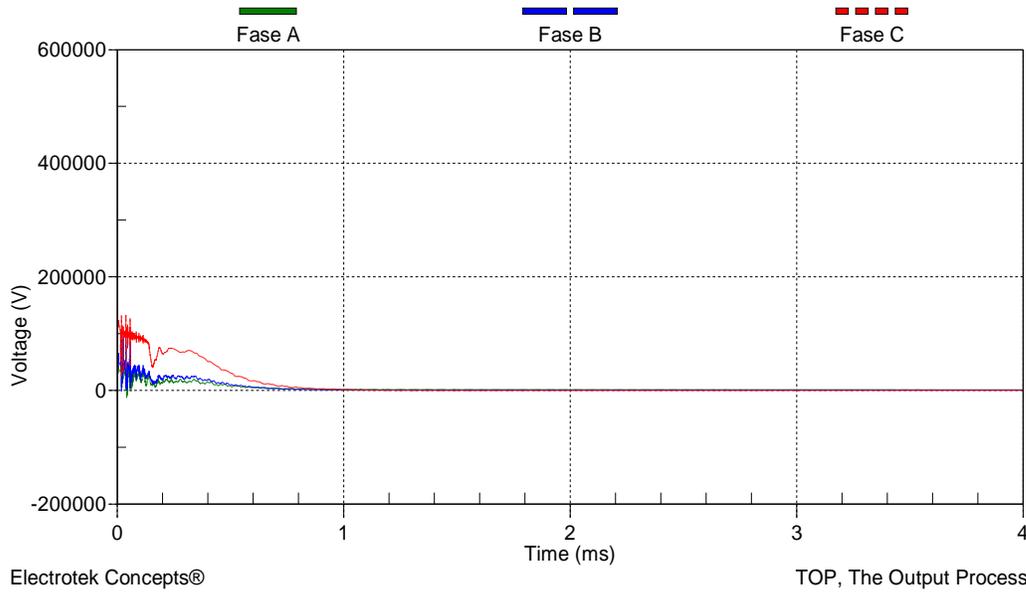


Figura 8-21: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3kΩ, aplicada no ponto 5 e medida no ponto 5 da linha com 5 pára-raios instalados.

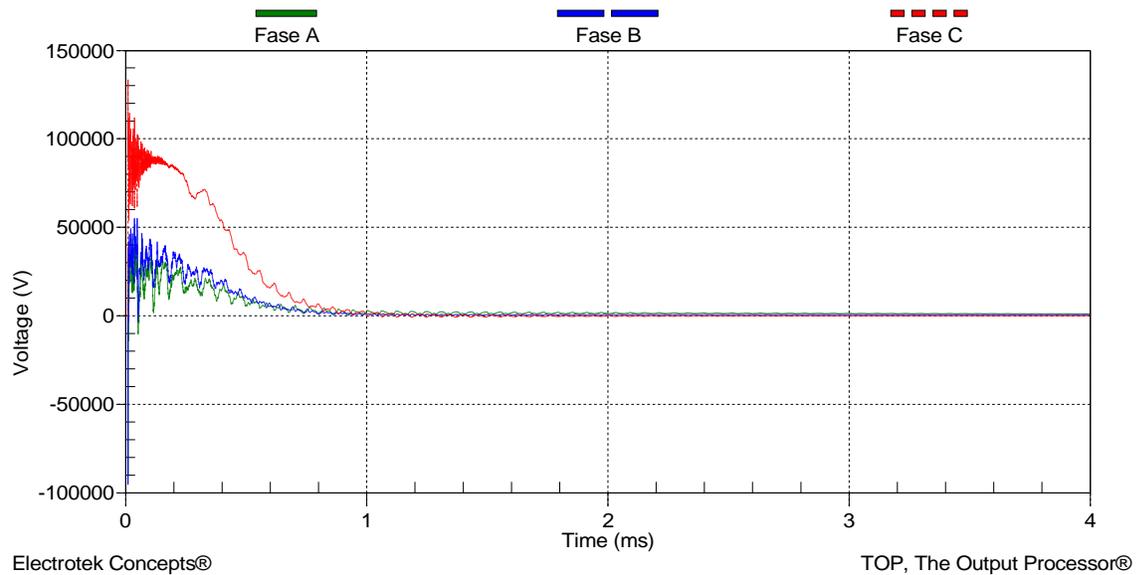


Figura 8-22: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3kΩ, aplicada no ponto 5 e medida no ponto 8 da linha com 5 pára-raios instalados.

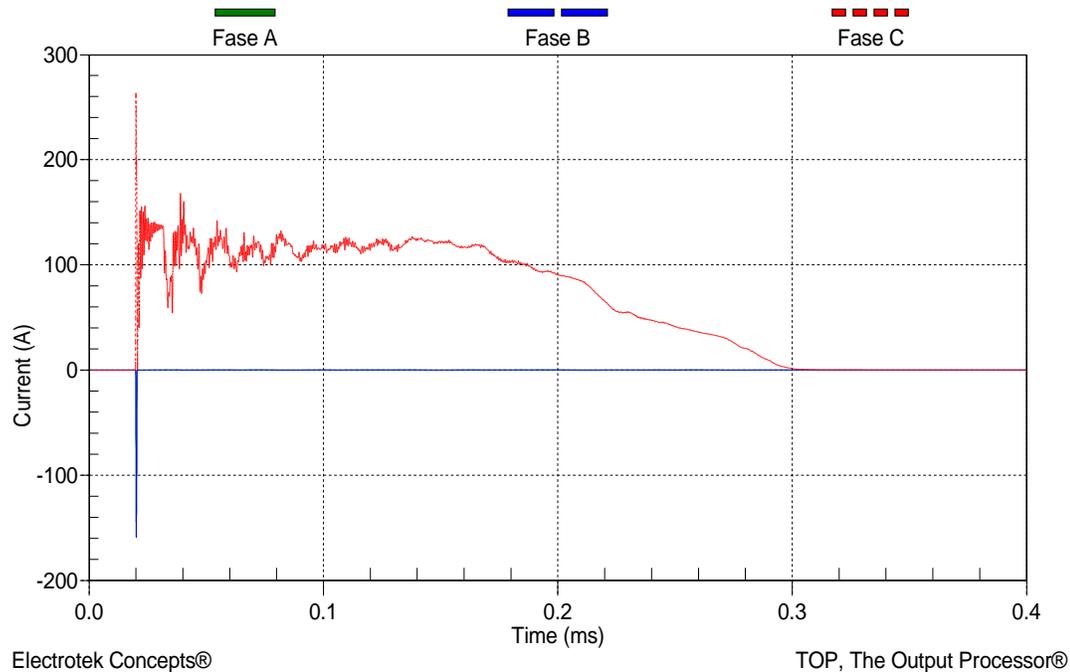


Figura 8-23: Corrente nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 5 e medida sob o pára-raios 1 da linha.

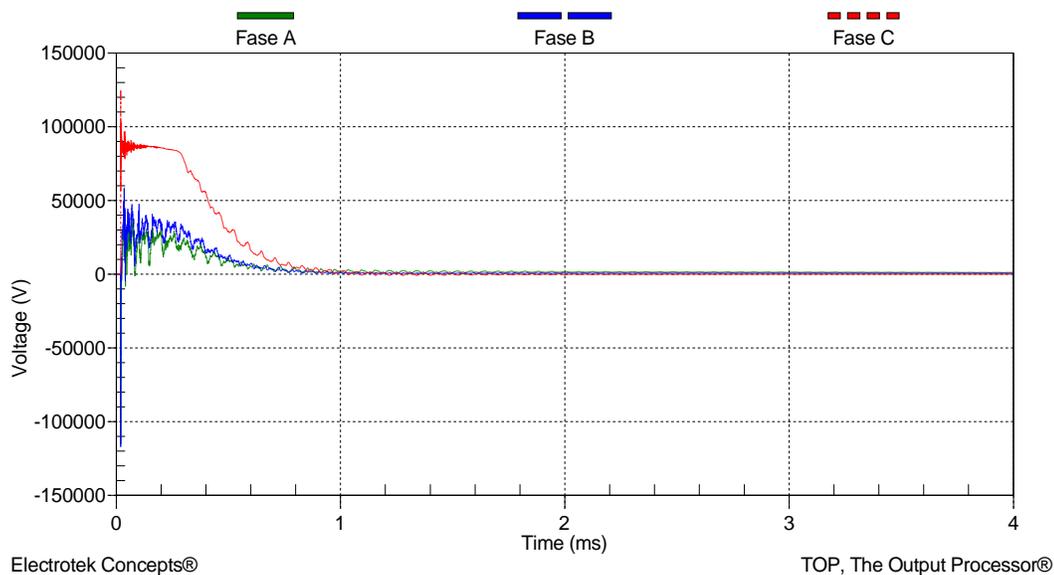


Figura 8-24: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 5 e medida sob o pára-raios 1 da linha.

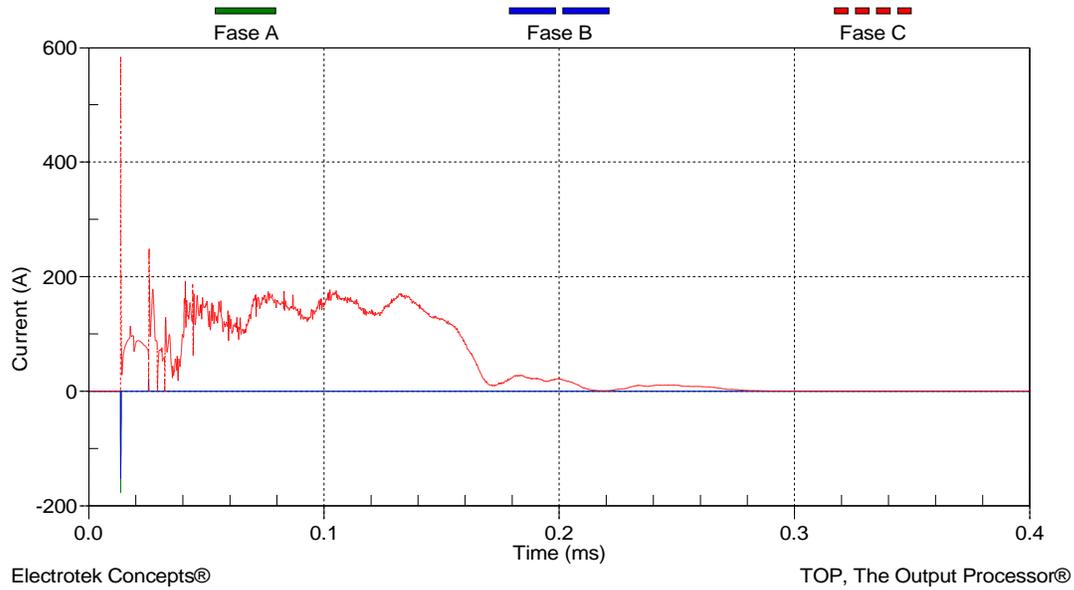


Figura 8-25: Corrente nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3kΩ, aplicada no ponto 5 e medida sob o pára-raios 2 da linha.

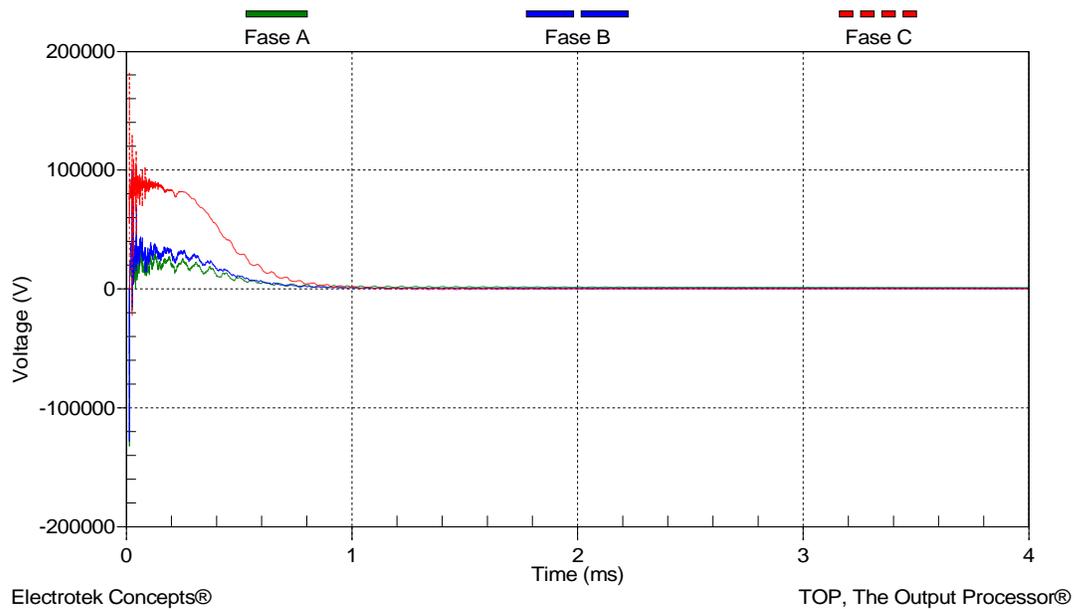


Figura 8-26: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3kΩ, aplicada no ponto 5 e medida sob o pára-raios 2 da linha.

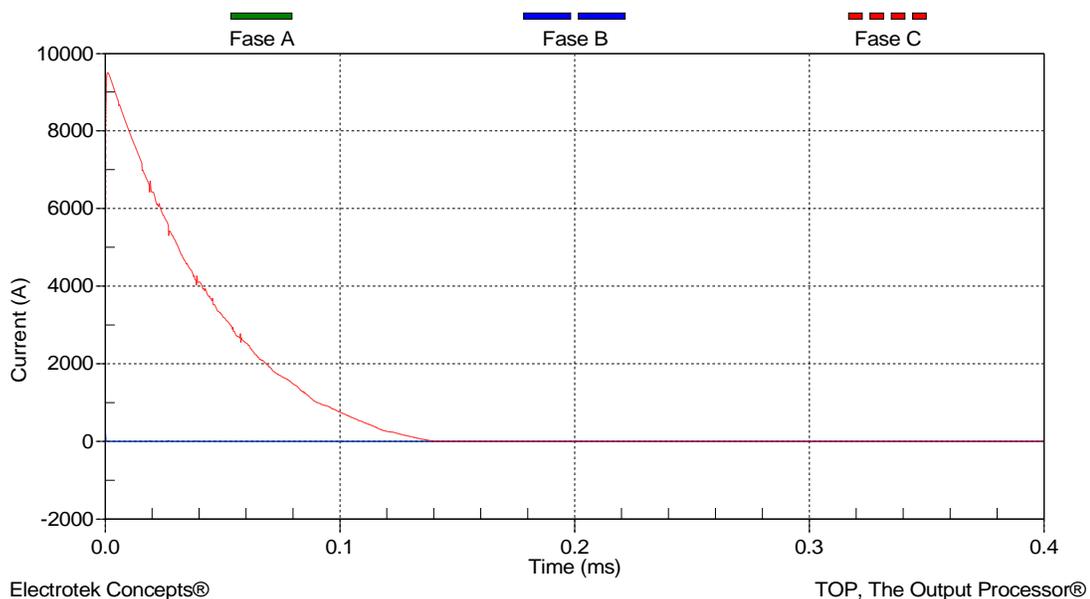


Figura 8-27: Corrente nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3kΩ, aplicada no ponto 5 e medida sob o pára-raios 3 da linha.

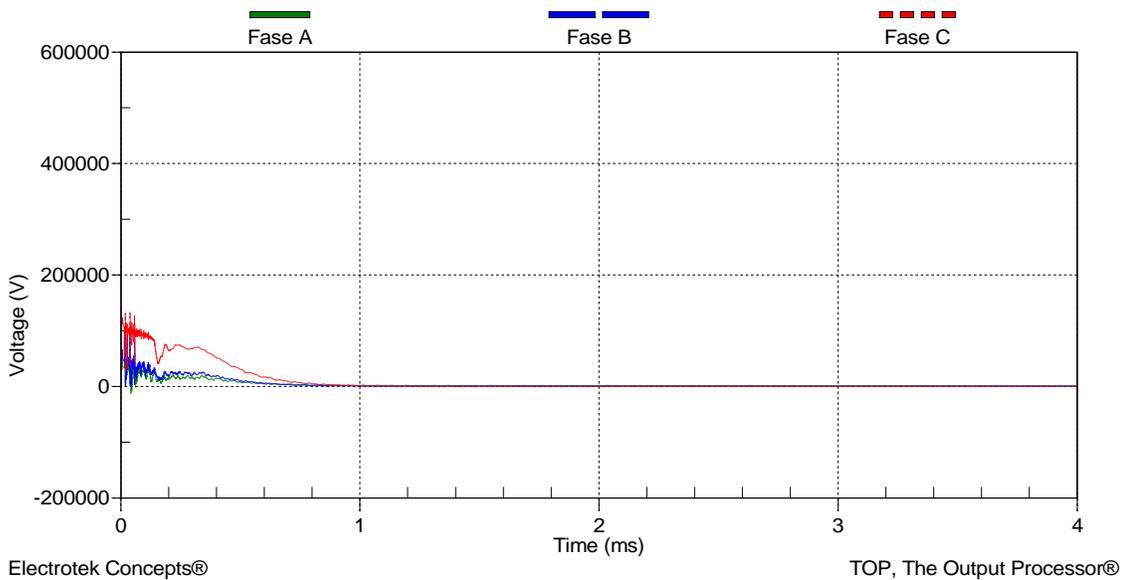


Figura 8-28: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3kΩ, aplicada no ponto 5 e medida sob o pára-raios 3 da linha.

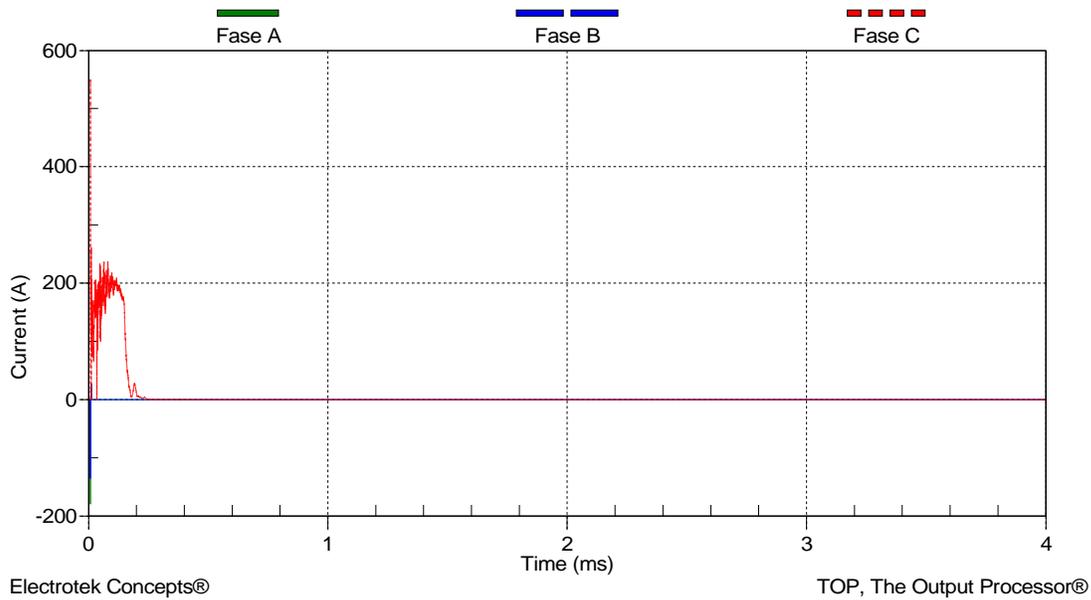


Figura 8-29: Corrente nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 5 e medida sob o pára-raios 4 da linha.

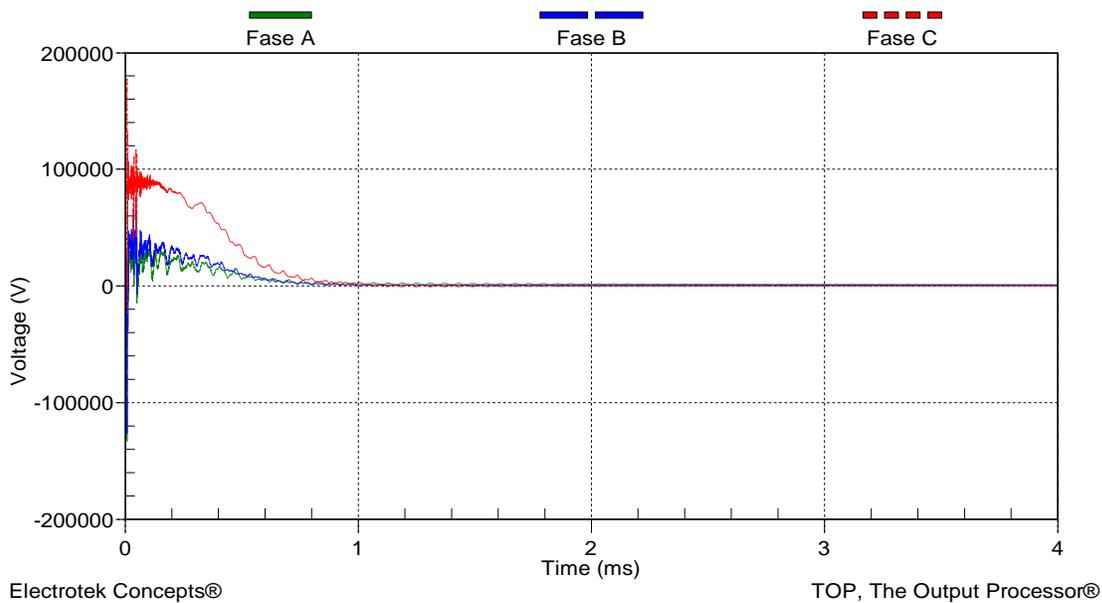


Figura 8-30: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 5 e medida sob o pára-raios 4 da linha.

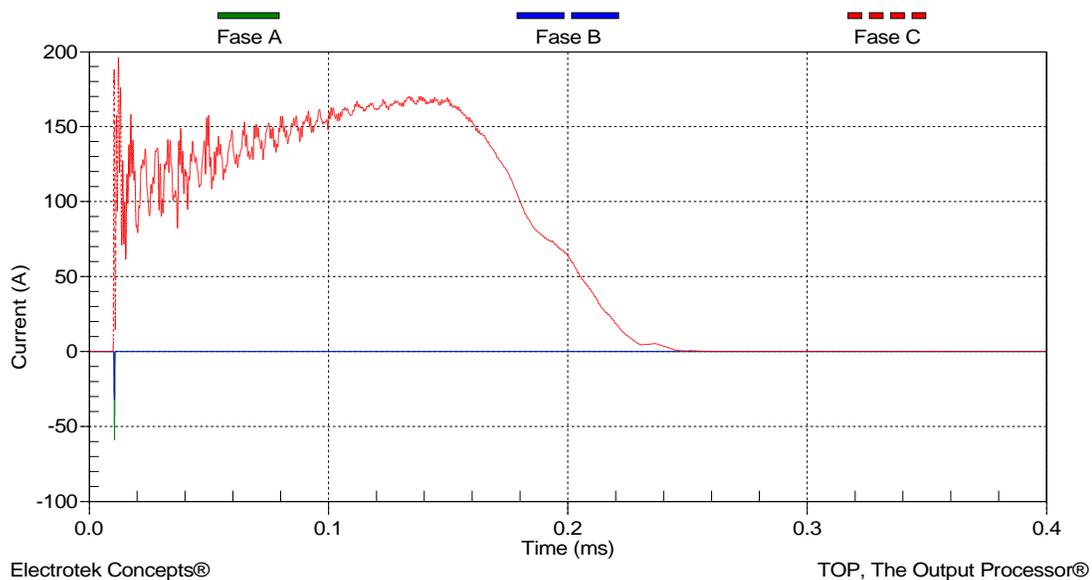


Figura 8-31: Corrente nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 5 e medida sob o pára-raios 5 da linha.

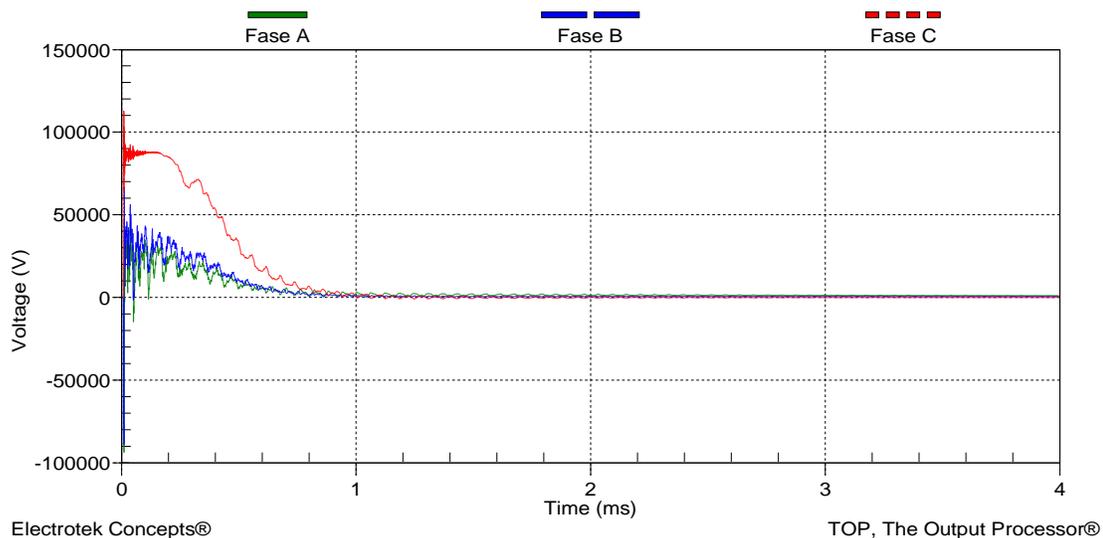


Figura 8-32: Tensão nas fases “A”, “B” e “C” após a ocorrência de uma descarga atmosférica de 10kA com resistência do canal de ionização de 3k Ω , aplicada no ponto 5 e medida sob o pára-raios 5 da linha.

8.2 - ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DA PROTEÇÃO DA LINHA COM 3 CONJUNTOS DE PÁRA-RAIOS

Após determinar que a instalação de 3 conjuntos de pára-raios nos pontos 1, 5 e 9 da linha é suficiente para protegê-la das elevadas sobretensões resultantes das descargas

atmosféricas, cabe examinar e ratificar a eficiência dos mesmos quando da aplicação de descargas nos pontos 2 e 8, como realizado nas simulações do Capítulo 6.

Para tanto, a seguir será mostrada a Tabela 8-4 com as sobretensões geradas pela aplicação de uma descarga de 10 kA, resistência do canal de ionização de 3 k Ω , e com incidência das descargas atmosféricas nos pontos 2 e 8 da linha, além de também constar os valores de sobretensão para incidência no ponto 5 já apresentados.

Tabela 8-4: Valores máximos de tensão e corrente na linha com 3 conjuntos de pára-raios em decorrência da aplicação de descargas atmosféricas.

Linha com 3 Pára-Raios						
Equipamento		Ponto de Incidência	Ponto de Medição	Fase A	Fase B	Fase C
Pára-Raios 1	Corrente [A]	2	1	147,86	142,07	7.469,41
	Tensão [V]	2	1	86.107,01	98.041,37	128.501,64
Pára-Raios 2	Corrente [A]	2	5	1,94	2,73	301,82
	Tensão [V]	2	5	-70.014,88	-100.354,91	157.047,61
Pára-Raios 3	Corrente [A]	2	9	-6,74	-1,71	224,97
	Tensão [V]	2	9	-51.872,46	-144.982,05	208.010,79
Medidor de Tensão [V]		2	2	84.416,05	102.463,19	217.974,27
Medidor de Tensão [V]		2	5	65.014,81	-76.021,76	138.549,38
Medidor de Tensão [V]		2	8	92.871,31	99.874,06	153.876,45
Pára-Raios 1	Corrente [A]	5	1	-322,15	-289,24	-454,71
	Tensão [V]	5	1	-114.482,01	-132.749,19	141.842,08
Pára-Raios 2	Corrente [A]	5	5	0,94	1,61	9.480,11
	Tensão [V]	5	5	148.406,92	132.489,76	162.487,43
Pára-Raios 3	Corrente [A]	5	9	-141,83	-97,38	364,54
	Tensão [V]	5	9	-112.489,56	-106.479,72	125.481,02
Medidor de Tensão [V]		5	2	-135.546,48	-111.486,03	244.527,72
Medidor de Tensão [V]		5	5	155.182,84	132.791,09	161.219,76
Medidor de Tensão [V]		5	8	-118.487,26	-102.792,12	133.148,67
Pára-Raios 1	Corrente [A]	8	1	5,87	2,81	-149,73
	Tensão [V]	8	1	-125.950,47	135.841,49	164.843,74
Pára-Raios 2	Corrente [A]	8	5	3,45	1,49	331,82
	Tensão [V]	8	5	48.512,06	84.512,97	169.754,81
Pára-Raios 3	Corrente [A]	8	9	7,89	108,87	8.997,01
	Tensão [V]	8	9	60.783,58	81.008,96	157.982,62
Medidor de Tensão [V]		8	2	-103.815,67	102.876,93	165.871,34
Medidor de Tensão [V]		8	5	64.884,74	78.327,94	182.972,51
Medidor de Tensão [V]		8	8	-78.328,41	102.783,15	200.874,68

A partir da Tabela 8-4 conclui-se que com a instalação de 3 conjuntos de pára-raios a linha encontra-se protegida contra as elevadas sobretensões decorrentes de descargas atmosféricas, já que a máxima sobretensão medida na linha ocorre quando a descarga é aplicada no ponto 5 e medida no ponto 2 da linha, com valor de 244,527 kV.

Ademais, observa-se que a máxima tensão residual frente a um surto de corrente de módulo 10 kA e tempo de subida 1,2 μ s medida sobre os pára-raios é de 208,010 kV e outra vez não ultrapassa o limite estabelecido pelo fabricante que é de 310 kV, e a maior corrente encontrada, que é de 9,480 kA, igualmente não excede o limite de 10 kA suportável pelo pára-raios, caracterizando o perfeito funcionamento do SPDA implementado nesta linha por meio da instalação de 3 conjuntos de pára-raios.

Capítulo 9

Conclusão

A partir do exposto neste trabalho, conclui-se que os estudos bibliográficos realizados foram extremamente importantes para que se pudesse desenvolver uma base sólida sobre a teoria das linhas de transmissão, o desenvolvimento e implementação de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas, a implantação de pára-raios em linhas áreas de energia, e a aplicação e desempenho de linhas de transmissão que utilizam pára-raios de ZnO, servindo de embasamento para todo desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso.

Não obstante, a apresentação dos conceitos básicos sobre descargas atmosféricas, como ocorre a formação das cargas nas nuvens e dos raios, como acontecem as descargas elétricas nuvem/terra, o que é o efeito plasma, e em que tipo de solo há maior incidência de raios, foi fundamental para o trabalho, uma vez que se pôde conhecer melhor o principal fenômeno causador de desligamentos em LTs e LDs e assim desenvolver um projeto de implantação de um SPDA.

Dessa forma, para o desenvolvimento de SPDAs foi essencial o estudo sobre a função e composição dos mesmos, bem como o exame dos conceitos, finalidades, requisitos e fatores que influenciam na realização de aterramentos, e a análise dos conceitos básicos sobre pára-raios, a fim de concluir que os pára-raios a óxido de zinco se portam de maneira mais eficiente que os de carboneto de silício. Posto isto, foi realizada a apreciação das características construtivas dos pára-raios a óxido de zinco e do seu desempenho frente a surtos atmosféricos com a finalidade de embasar-se para a implementação do mesmo no *software* ATPDraw.

Outrossim, através das simulações de descargas atmosféricas depreende-se que os casos que apresentam maior pico de tensão em virtude das descargas aplicadas à linha são os que possuem corrente de descarga de 10 kA e resistência do canal de ionização de 3 k Ω , com incidência e medição no ponto 5. Também se averiguou que as sobretensões provocadas pelas descargas são diretamente proporcionais à intensidade da corrente, ou seja, quanto maior a corrente da descarga, maiores serão os picos de sobretensão medidos na linha, e que quanto maior a resistência em paralelo à linha, representando o canal de

ionização, maior será a parcela de corrente a percorrer a mesma causando uma maior sobretensão.

Do mesmo modo, foram apresentados os requisitos necessários para modelar pára-raios no *software* ATPDraw e a partir dos dados de operação da linha, das sobretensões averiguadas em virtude das simulações de descargas atmosféricas realizadas e expostas no Capítulo 6, e por meios dos dados contidos no Guia do Comprador da ABB foi possível inferir que o melhor pára-raios para a linha em estudo é do tipo PEXLIM R.

Igualmente, por meio de um estudo sobre os modelos de pára-raios desenvolvidos e implementados concluiu-se que o modelo proposto por Pinceti e Giannetoni (1999) era o mais apropriado para esta pesquisa, uma vez que o mesmo foi escolhido porque representa muito bem as características dinâmicas dos pára-raios. Além disso, o modelo somente necessita de parâmetros elétricos para construir o circuito elétrico correspondente, o que o torna bastante atraente do ponto de vista de esforço computacional e disponibilidade de dados por parte dos fabricantes.

Posto isto, depois de determinar que o modelo de Pinceti e Giannetoni (1999) e o pára-raios do tipo PEXLIM R são os mais adequados à linha selecionada, foi implementado o pára-raios a ser instalado na linha examinada, como se verificou na seção 7.3.

Em seguida foram realizadas novas simulações para determinar qual o número de pára-raios necessários e a localização dos mesmos, e assim avaliar o desempenho da linha sob sua proteção. Para tanto, foram simuladas descargas de 10 kA, resistência do canal de ionização de $3k\Omega$, no ponto mais crítico da linha, ou seja, no ponto 5, instalados 2, 3 e 5 conjuntos de pára-raios, e dessa forma depreendeu-se que apenas 2 conjuntos instalados na linha não são suficientes para protegê-la, mas 3 e 5 o são.

Ademais, concluiu-se que o melhor cenário dentre os simulados é o de 3 conjuntos de pára-raios instalados nos pontos 1, 5 e 9, porque apenas 2 não foram capazes de proteger a linha contra as sobretensões geradas pelas descargas, e a instalação de 5 conjuntos promoveu a proteção da linha de maneira praticamente igual à instalação de 3, mas implicaria em maiores custos de implantação do projeto, já que os custos dos pára-raios e da sua montagem são bastante elevados.

Ressalta-se que apesar de apenas 2 conjuntos de pára-raios não serem suficientes para proteger a linha, observou-se que tanto para 2 conjuntos de pára-raios quanto para 3 e 5 os mesmos funcionaram adequadamente quando se analisam suas características elétricas, pois em nenhum dos casos a máxima tensão residual medida sob o pára-raios ultrapassou o limite estabelecido pelo fabricante que é de 310 kV, e a máxima corrente medida, igualmente, não excedeu o limite de 10 kA suportável pelos pára-raios.

Por fim, foram realizadas simulações com a aplicação das descargas atmosféricas nos pontos 2 e 8, como havia sido feito no Capítulo 6, para a linha com 3 conjuntos de pára-

raios instalados a fim de analisar a eficiência do projeto implementado e concluiu-se que a linha encontra-se protegida contra as elevadas sobretensões decorrentes de descargas atmosféricas.

Capítulo 10

Referências Bibliográficas

- [1] ABB, “Surge Arresters - Guia do comprador”, Edição 5, 96p. 2004.
- [2] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 5424. Guia de Aplicação para Pára-Raios de resistor não linear em Sistemas de Potência, 32p. Agosto. 1981.
- [3] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 5410. Instalações Elétricas de Baixa Tensão, 32p. Fevereiro. 2004.
- [4] ANDRADE A. D, MARKIEWICZ R. L, BEZERRA A. C. G, “Melhoria de Desempenho de Linhas de Transmissão sob a ação de Descargas Atmosféricas”, VI SBQEE, Belém, PA, 2005.
- [5] BAYARDI, A. “Simulation of metal oxide surge arrester dynamic behavior under faster transients”, The international Conference on Power Systems Transients, IPST 2003, New Orleans, 2003.
- [6] BIASOTTO, E. “Um procedimento de análise para a repotenciação de linhas de subtransmissão de 34,5 kV para 69 kV”, 2009, 136 f, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.
- [7] BRITTES J. L. P, RIBEIRO J. E, “Desempenho de Linhas de Transmissão que Utilizam Pára-Raios de ZnO”, Pesquisa e Desenvolvimento CPFL, 1999.
- [8] COUTINHO F. N, ALTOÉ C. A, “Levantamento de Estruturas que Necessitam de SPDA na UnB e Análise de seus Efetivos Sistemas de Proteção”, Projeto Final de Graduação em Engenharia Elétrica, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, 2003.

- [9] CPFL [a], Estrutura do tipo “G”, desenho padrão nº BX-A-9370-SP, 05 de agosto de 1970.
- [10] CPFL [b], Estrutura do tipo “A”, desenho padrão nº BX-A4-11.826 - Camp-SP, 30 de março de 1984.
- [11] CPFL [c], Estrutura do tipo “B”, desenho padrão nº BX-A4-11.828 - Camp-SP, 03 de abril de 1984.
- [12] CPFL [d], Estrutura do tipo “E”, desenho padrão nº BX-A3-11.832 - Camp-SP, 09 de abril de 1984.
- [13] CPFL [e], Estrutura do tipo “HS”, desenho padrão nº BX-A3-11.836 - Camp-SP, 07 de junho de 1984.
- [14] CPFL [f], Estrutura do tipo “HT”, desenho padrão nº BX-A3-11.844 - Camp-SP, 04 de junho de 1984.
- [15] DELAIBA A. C, SANTOS C. G, SARAIVA E, RESENDE J. W, CHAVES M. L. R, “A Influência do Aterramento na Atenuação de Descargas Atmosféricas”, Universidade Federal de Uberlândia, CBQEE, Blumenau, SC, 2009.
- [16] DIESENDORF, W. “Insulation Coordination in High Voltage Electric Power Systems”. London, Butterworth, 1974.
- [17] DURBAK, D. W, “Surge arrester modeling”, Power Engineering Society Winter Meeting, Columbus, OH., USA, Vol 2, pp. 728-730, 2001.
- [18] EEUG - Alternative Transients Program Rule Book; LEC; 1987.
- [19] FUCHS, R. D; “Transmissão de Energia Elétrica: Linhas Aéreas”; teoria das linhas em regime permanente; Rio de Janeiro; Livros Técnicos e Científicos; 1979.
- [20] GALVÃO L. C. R, et. al, “Aplicação de pára-raios ZnO em Linhas de 138 kV”, Furnas Centrais Elétricas S.A, Universidade de São Paulo, XIV SNTPEE, Belém, PA, 1997.

- [21] IEEE Working Group 3.4.11, "Modeling of metal oxide surge arresters", IEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, N° 1, pp. 302-309, 1992.
- [22] KINDERMANN, G. "Descarga Atmosférica", Sagra Ed. Porto Alegre, RS, 132p. 1992.
- [23] KINDERMANN, G, CAMPAGNOLO, S. M, "Aterramento Elétrico", Sagra, Ed. Porto Alegre, RS, 214p. 1995.
- [24] LEITE, D. M, LEITE, C. M, "Proteção Contra Descargas Atmosféricas", Oficina de Mydia Ed. Ltda. São Paulo, 294p. 1997.
- [25] MAMEDE FILHO, J; Manual de equipamentos elétricos; LTC, 2ª Edição, Rio de Janeiro, RJ; 1993.
- [26] MIRANDA D. C, CUNHA L.V, VISACRO S, Dias R. N, MESQUITA C. R, "Resultados da Aplicação de Metodologia Inovadora para Melhoria de Desempenho da LT Guilman Amorim – Ipatinga 1, 230 kV, frente a Descargas Atmosféricas", SNTPEE, Rio de Janeiro, RJ, 2007.
- [27] PHELPS, J. D. M, "Selection of Surge Arresters", Tutorial Course on Surge Protection in Power Systems, IEEE, 1979.
- [28] PINCETI, P, GIANNETTONI, M. "A simplified model for zinc oxide surge arresters", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, N° 2, pp.393-398, 1999.
- [29] PINTO JR. O, IARA R. C. A, "Relâmpagos", Editora Brasiliense, 2ª Edição, 112p, 2008.
- [30] SANTOS, P. H. M. "Análise de desempenho frente a impulsos atmosféricos induzidos em circuitos de media tensão", 2007, 192 f, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.
- [31] SILVA R. J, JUNIOR A. M. O, "Sistemas de Proteção Contra Descargas Atmosféricas e Aterramento", Projeto Final apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 2004.

[32] SILVA V. L. A, VIEIRA C. L. S. "Correlação dos Critérios para Avaliação do Envelhecimento Térmico de Equipamentos Elétricos," XI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Rio de Janeiro, RJ, 1991.

[33] VISACRO S. F, "Descargas Atmosféricas – uma Abordagem de Engenharia", Art. Líber, 1ª Edição, 272p. 2005.

[34] WATSON, N.R e ARRILLAGA, J; "Power systems electromagnetic transients simulation"; Published by the Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom, Institution of Electrical Engineers; 2003.