



Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas

Gerais

Departamento de Engenharia Elétrica

Engenharia Elétrica

ESTUDO DE PARA-RAIOS ZNO E SUA APLICAÇÃO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Marcelo Andrion Pinto

15/07/2015

Marcelo Andrion Pinto

ESTUDO DE PARA-RAIOS ZNO E SUA APLICAÇÃO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Relatório final do Trabalho de Conclusão de Curso submetido à banca examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Engenharia Elétrica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: ATP, Descarga atmosférica, Dispositivo para-raios, Transitório Eletromagnético.

Orientador: Rafael Silva Alípio

Coorientador: Raphael Batista Borges Louro

Belo Horizonte

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

2015

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por ter me sustentado nos momentos de fraqueza e por nunca deixar-me sozinho durante a árdua caminhada.

Agradeço ao orientador Rafael Silva Alípio e ao coorientador Raphael Batista Borges Louropela amizade, pelo ato de compartilhar conhecimentos e principalmente pelas palavras de motivação durante o percurso da realização deste trabalho.

Agradeço a professora Úrsula do Carmo Resende pela contribuição dada na realização deste trabalho.

Agradeço a Instituição CEFET-MG por me fornecer as condições de infraestrutura necessária para a realização da pesquisa e elaboração do Trabalho de Conclusão de Curso.

Agradeço a minha família pela compreensão da minha ausência ao longo deste percurso.

Agradeço a todos os meus colegas de curso e as pessoas que pude ter contato neste período estudantil.

“Dê-me, Senhor, agudeza para entender, capacidade para reter, método e faculdade para aprender, sutileza para interpretar, graça e abundância para falar. Dê-me, Senhor, acerto ao começar, direção ao progredir e perfeição ao concluir.”

São Tomás de Aquino

Resumo

Este trabalho aborda o estudo teórico do para-raios ZnO e sua instalação em linhas de transmissão (LTs). Esses dispositivos são empregados às LTs com a finalidade de atender ao desempenho regulamentado por normas. Estas são desenvolvidas por órgãos como a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Além disso, cabe salientar que esses equipamentos apresentam desempenho que variam de acordo com a tensão nominal da linha.

Observa-se a ausência de referências completas, em especial na língua portuguesa, sobre o estudo teórico que tenha como objetivo a seleção e instalação dos para-raios ZnO nas linhas de transmissão. Nesse contexto, nota-se que existem guias técnicos e orientações realizadas pelo fabricante destes dispositivos, que ditam procedimentos a respeito da utilização desses equipamentos nas LTs. Em função disso, os textos existentes não são imparciais, pois estão atrelados a interesses comerciais. Dessa forma, o presente trabalho busca a realização de um texto neutro e em língua portuguesa a respeito da aplicação dos para-raios ZnO nas LTs.

Inicialmente, realizou-se uma pesquisa acerca da compreensão dos conceitos envolvidos nas descargas atmosféricas. Posteriormente, foi realizado um estudo teórico dos para-raios. Nessa análise, destacou-se o aspecto evolutivo do equipamento ao longo do tempo cronológico. Além disso, foram destacados os parâmetros funcionais e os modelos de representação em cálculos de transitórios a serem simulados no ATP (*Alternative Transients Program*).

Neste contexto, as simulações foram agrupadas em três grupos: incidência da descarga atmosférica no topo da torre, incidência da descarga atmosférica a meio vão e incidência da descarga atmosférica diretamente na fase. Em cada simulação o estudo ficou focado nas influências do tempo de frente e impedância de aterramento para a ocorrência do *backflashover* e *flashover*.

Sumário

Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas	x
Lista de Siglas	xi
Capítulo 1	12
Introdução	12
1.1. Caracterização do problema.....	12
1.2. Objetivo do trabalho	13
1.3. Justificativa	13
1.4. Organização do trabalho	14
Capítulo 2	15
Descargas atmosféricas: definições gerais	15
2.1. Introdução	15
2.2. Descargas Atmosféricas.....	15
2.2.1. Formação das descargas atmosféricas.....	15
2.2.2 Principais parâmetros das descargas atmosféricas	17
2.2.2.1 Amplitude de corrente	18
2.2.2.2 Tempo de frente de onda	18
2.2.2.3 Taxa de subida de onda	18
2.2.2.4 Tempo de meia onda.....	19
2.2.2.5 Densidade de descargas local	19
2.5. Impactos das descargas atmosféricas nos sistemas elétricos	21
2.5.1. Incidência de descargas atmosféricas diretamente em condutores fase	21
2.5.2. Incidência de descargas atmosféricas em torres e cabos para-raios	22
2.6. Técnicas para melhoria do desempenho de linhas frente às descargas atmosféricas	22
2.6.1. Cabo para-raios ou cabo-guarda.....	23
2.6.2. Aumento da cadeia de isoladores	23
2.6.3. Melhoria da resistência de aterramento.....	24
2.6.4. Uso dos para-raios.....	24

2.7. Considerações finais	25
Capítulo 3	26
Para-raios	26
3.1. Introdução	26
3.2. Evolução histórica	26
3.2.1. Captor de Franklin	28
3.2.2. Centelhador	28
3.2.3. Para-raios SiC	29
3.2.4. Para-raios ZnO	30
3.3. Principais termos empregados em para-raios ZnO	31
3.3.1. Maior tensão para o equipamento	32
3.3.2. Tensão de operação contínua ou COV	32
3.3.3. Corrente contínua ou i_c	32
3.3.4. Tensão nominal ou U_r	32
3.3.5. Nível básico convencional de isolamento a impulsos ou BIL	32
3.3.6. Tensão residual a ondas de corrente ou U_{res}	33
3.3.7. Tensão residual a ondas de corrente ou TOV	33
3.3.8. Classe de descarga	33
3.4. Características técnicas dos para-raios ZnO	33
3.4.1. Característica $V \times I$ não-linear	33
3.4.2. Influência de fatores na representação matemática de para-raios ZnO	34
3.5. Representação matemática dos para-raios ZnO	35
3.5.1. Modelo para baixas frequências e transientes com frente lenta	35
3.5.2. Modelo para transientes com frente rápida	36
3.5.3. Modelo para transientes com frente muito rápida	37
3.6. Considerações Finais	38
Capítulo 4	39
Resultados e análise de sensibilidades	39
4.1. Introdução	39
4.2.1. Modelagem dos cabos	41
4.2.2. Modelagem da torre	43
4.2.3. Modelagem do aterramento	45
4.2.4. Modelagem do para-raios	46
4.3. Resultados	51
4.3.1. Incidência direta de descarga atmosférica no topo da torre	51

4.3.1.1. Influência do tempo de frente	52
4.3.1.2. Influência do aterramento	58
4.3.2. Incidência no cabo de blindagem (no meio do vão).....	64
4.3.2.1. Influência do tempo de frente	64
4.3.2.2. Influência do aterramento	69
4.3.3. Incidência direta no cabo fase	74
4.3.3.1. Influência do tempo de frente	74
4.3.3.2. Influência do aterramento	78
4.4. Conclusões	83
Capítulo 5	85
Referências Bibliográficas	86

Lista de Figuras

Figura 2-1 - Tipos de descargas atmosféricas no céu: (a) Intra-nuvens, (b) Entre-nuvens, (c) no ar e (d) Nuvem-solo.....	16
Figura 2-2 - Processo da evolução da descarga atmosférica [2].....	17
Figura 2-3 – Forma de onda da corrente de retorno [3].....	18
Figura 2-4 – Mapa de densidade de descargas no Brasil [1].	20
Figura 2-5 - Linha trifásica sem cabos de blindagem sendo atingida diretamente por uma descarga [4].....	21
Figura 2-6 – Linha de transmissão trifásica sendo atingida em seus condutores de blindagem por uma descarga atmosférica [4].	22
Figura 2-7 - Métodos para aumentar a eficiência da linha de transmissão [2].	23
Figura 2-8 - Comparação entre a curva de sobretensão com e sem a utilização do para-raios [5].	25
Figura 3-1 – Cronologia da proteção contra descargas atmosféricas nos EUA – adaptado de [6]	27
Figura 3-2 - Captor de Franklin.....	28
Figura 3-3 – Centelhador – adaptada de [2]	29
Figura 3-4 - Para-raios SiC encapsulado em vidro [9]	30
Figura 3-5 - Curva $V \times I$ do para-raios ZnO e do para-raios SiC [8].....	31
Figura 3-6 - Curva característica $V \times I$ típica de um para-raios ZnO [12].....	34
Figura 3-7 - Modelo para baixa frequência e transitório com frente lenta [12].	35
Figura 3-8 - Modelo IEEE de para-raios ZnO, com parâmetros dependentes da frequência [13]	36
Figura 4-1 - Silhueta típica da torre de 138 kV	40
Figura 4-2 – Modelagem dos cabos.....	42
Figura 4-3 – Entrada dos parâmetros e posicionamento dos cabos na LT 138 kV simulada.....	42
Figura 4-4 - Topologia da LT simulada no ATP	43
Figura 4-5 – Modelagem da Torre.....	44
Figura 4-6 - Modelo cônico para a torre [12]	45
Figura 4-7 – Arranjo típico de aterramento de torres autoportantes	46
Figura 4-8 – Catálogo do fabricante	48
Figura 4-9 – Exemplo de onda triangular	50
Figura 4-10 – Curva utilizada para estimar o tempo de frente [22]	52
Figura 4-11 – Exemplos de ondas incidentes no topo da torre	53
Figura 4-12 – Impedância de aterramento igual a 17Ω e tempo de frente igual a $5 \mu s$ sem para-raios.....	54
Figura 4-13 – Impedância de aterramento igual a 17Ω e tempo de frente igual a $8,33 \mu s$ sem para-raios.....	55
Figura 4-14 – Impedância de aterramento igual a 17Ω e tempo de frente igual a $11,67 \mu s$ sem para-raios.....	55
Figura 4-15 – Impedância de aterramento igual a 17Ω e tempo de frente igual a $5 \mu s$ com para-raios.....	56
Figura 4-16 – Impedância de aterramento igual a 17Ω e tempo de frente igual a $8,33 \mu s$ com para-raios.....	57

Figura 4-17 – Impedância de aterramento igual a 17 Ω e tempo de frente igual a 11,67 μ s com para-raios.....	57
Figura 4-18 – Forma de onda que representa a descarga atmosférica	59
Figura 4-19 – Impedância de aterramento igual a 10 Ω e tempo de frente igual a 8 μ s sem para-raios.....	60
Figura 4-20 – Impedância de aterramento igual a 30 Ω e tempo de frente igual a 8 μ s sem para-raios.....	60
Figura 4-21 – Impedância de aterramento igual a 50 Ω e tempo de frente igual a 8 μ s sem para-raios.....	61
Figura 4-22 – Impedância de aterramento igual a 10 Ω e tempo de frente igual a 8 μ s com para-raios.....	62
Figura 4-23 – Impedância de aterramento igual a 30 Ω e tempo de frente igual a 8 μ s com para-raios.....	62
Figura 4-24 – Impedância de aterramento igual a 50 Ω e tempo de frente igual a 8 μ s com para-raios.....	63
Figura 4-25 – Impedância de aterramento igual a 17 Ω e tempo de frente igual a 5 μ s sem para-raios.....	65
Figura 4-26 – Impedância de aterramento igual a 17 Ω e tempo de frente igual a 8,33 μ s sem para-raios	65
Figura 4-27 – Impedância de aterramento igual a 17 Ω e tempo de frente igual a 11,67 μ s sem para-raios	66
Figura 4-28 – Impedância de aterramento igual a 17 Ω e tempo de frente igual a 5 μ s com para-raios.....	67
Figura 4-29 – Impedância de aterramento igual a 17 Ω e tempo de frente igual a 8,33 μ s com para-raios.....	67
Figura 4-30 – Impedância de aterramento igual a 17 Ω e tempo de frente igual a 11,67 μ s com para-raios.....	68
Figura 4-31 – Impedância de aterramento igual a 10 Ω e tempo de frente igual a 8,0 μ s sem para-raios	70
Figura 4-32 – Impedância de aterramento igual a 30 Ω e tempo de frente igual a 8,0 μ s sem para-raios	71
Figura 4-33 – Impedância de aterramento igual a 50 Ω e tempo de frente igual a 8,0 μ s sem para-raios	71
Figura 4-34 – Impedância de aterramento igual a 10 Ω e tempo de frente igual a 8,0 μ s com para-raios.....	72
Figura 4-35 – Impedância de aterramento igual a 30 Ω e tempo de frente igual a 8,0 μ s com para-raios.....	72
Figura 4-36 – Impedância de aterramento igual a 50 Ω e tempo de frente igual a 8,0 μ s com para-raios.....	73
Figura 4-37 – Impedância de aterramento igual a 17 Ω e tempo de frente igual a 0,50 μ s sem para-raios	75
Figura 4-38 – Impedância de aterramento igual a 17 Ω e tempo de frente igual a 1,17 μ s sem para-raios	75
Figura 4-39 – Impedância de aterramento igual a 17 Ω e tempo de frente igual a 2,0 μ s sem para-raios	76
Figura 4-40 – Impedância de aterramento igual a 17 Ω e tempo de frente igual a 0,50 μ s com para-raios.....	76
Figura 4-41 – Impedância de aterramento igual a 17 Ω e tempo de frente igual a 1,17 μ s com para-raios.....	77
Figura 4-42 – Impedância de aterramento igual a 17 Ω e tempo de frente igual a 2,0 μ s com para-raios.....	77
Figura 4-43 – Impedância de aterramento igual a 10 Ω e tempo de frente igual a 1,2 μ s sem para-raios	79
Figura 4-44 – Impedância de aterramento igual a 30 Ω e tempo de frente igual a 1,2 μ s sem para-raios	80
Figura 4-45 – Impedância de aterramento igual a 50 Ω e tempo de frente igual a 1,2 μ s sem para-raios	80
Figura 4-46 – Impedância de aterramento igual a 10 Ω e tempo de frente igual a 1,2 μ s com para-raios.....	81
Figura 4-47 – Impedância de aterramento igual a 30 Ω e tempo de frente igual a 1,2 μ s com para-raios.....	81
Figura 4-48 – Impedância de aterramento igual a 50 Ω e tempo de frente igual a 1,2 μ s com para-raios.....	82

Lista de Tabelas

Tabela 2-1 - Índices típicos de densidades de descargas em certas regiões [2].	19
Tabela 3-1 – Guias para representar o para-raios ZnO [13]	35
Tabela 4-1 – Informações sobre os cabos	40
Tabela 4-2 – Resultados dos cálculos das flechas	41
Tabela 4-3 – Resultados Calculados	47
Tabela 4-4 – Resultados dos Parâmetros	48
Tabela 4-5 – Característica do resistor não-linear A_0	49
Tabela 4-6 – Características do resistor não-linear A_1	49
Tabela 4-7 – Comparação entre os resultados fabricante e modelo ajustado	50
Tabela 4-8 – Porcentagem e tempo de frente	53
Tabela 4-9 – Resultados para as amplitudes das tensões para 5 μ s e impedância de aterramento igual a 17 Ω	58
Tabela 4-10 – Resultados para as amplitudes das tensões para 8,33 μ s e impedância de aterramento igual a 17 Ω	58
Tabela 4-11 – Resultados para as amplitudes das tensões para 11,67 μ s e impedância de aterramento igual a 17 Ω	58
Tabela 4-12 – Resultados para as amplitudes das tensões para impedância de aterramento de 10 Ω	63
Tabela 4-13 – Resultados para as amplitudes das tensões para impedância de aterramento de 30 Ω	63
Tabela 4-14 – Resultados para as amplitudes das tensões para impedância de aterramento de 50 Ω	64
Tabela 4-15 – Resultados para as amplitudes das tensões para tempo de frente igual a 5,0 μ s	69
Tabela 4-16 – Resultados para as amplitudes das tensões para tempo de frente igual a 8,33 μ s	69
Tabela 4-17 – Resultados para as amplitudes das tensões para tempo de frente igual a 11,67 μ s	69
Tabela 4-18 – Resultados para as amplitudes das tensões para impedância de aterramento de 10 Ω	73
Tabela 4-19 – Resultados para as amplitudes das tensões para impedância de aterramento de 30 Ω	73
Tabela 4-20 – Resultados para as amplitudes das tensões para impedância de aterramento de 50 Ω	73
Tabela 4-21 – Resultados para a estimação do tempo de frente	74
Tabela 4-22 – Resultados para impedância de aterramento de 17 Ω e tempo de frente igual a 0,5 μ s	78
Tabela 4-23 – Resultados para impedância de aterramento de 17 Ω e tempo de frente igual a 1,17 μ s	78
Tabela 4-24 – Resultados para impedância de aterramento de 17 Ω e tempo de frente igual a 2,00 μ s	78
Tabela 4-25 – Resultados para impedância de aterramento de 10 Ω e tempo de frente igual a 1,20 μ s	82
Tabela 4-26 – Resultados para impedância de aterramento de 30 Ω e tempo de frente igual a 1,20 μ s	82
Tabela 4-27 – Resultados para impedância de aterramento de 50 Ω e tempo de frente igual a 1,20 μ s	83

Lista de Siglas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
BIL	<i>Basic Insulation Level</i>
CIGRÉ	<i>Conseil International des Grands Réseaux Électriques</i>
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
COV	Tensão de operação contínua
EGLA	<i>Externally Gapped Line Arrester</i>
GIS	<i>Gas Insulated Substation</i>
i_c	Corrente contínua
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
I_0	Amplitude de corrente
LT	Linha de transmissão
MCOV	Máxima tensão de operação contínua
N_g	Densidade de descargas
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
SiC	Carboneto de silício
T_f	Tempo de frente de onda
T_{sc}	Tempo de meia onda
TOV	<i>Transient Over Voltage</i>
U_r	Tensão nominal
U_{res}	Tensão residual a ondas de corrente
U_{op}	Tensão de operação
ZnO	Óxido de zinco

Capítulo 1

Introdução

1.1. Caracterização do problema

O sistema elétrico deve apresentar elevada confiabilidade, relacionada com sua taxa de desligamentos. Esse parâmetro expressa o número de desligamentos por 100 km por ano. Essas interrupções ocorrem principalmente devido as descargas atmosféricas que constituem fontes de sobretensões em linhas de transmissão aéreas. Na literatura existem diversas ações corretivas com a finalidade de maximizar a eficiência no desempenho das linhas de transmissão. Pode-se exemplificar que a adição de cabos para-raios nas linhas, a redução da impedância de aterramento da torre, o aumento da isolação da linha e aplicação de para-raios de linhas de transmissão são métodos convencionais adotados com a finalidade de reduzir esses desligamentos.

Neste contexto, cabe salientar que a utilização dos para-raios pode ser a única solução viável em regiões que apresentam elevada resistividade do solo e grande incidência de descargas atmosféricas, como por exemplo, o estado de Minas Gerais.

Este trabalho consiste no estudo teórico do para-raios óxido de zinco (ZnO) e a sua instalação em linhas de transmissão aéreas. Percebe-se que a utilização deste equipamento deve buscar atender a questão de desempenho regulamentado por normas elaboradas por órgãos como a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Essas diretrizes estabelecem níveis mínimos de desempenho de linhas de transmissão que devem ser respeitados de acordo com a tensão nominal de operação.

Em relação ao dimensionamento do para-raios ZnO, observa-se que existe inúmeros procedimentos realizados por fabricantes desses dispositivos. Evidentemente, estes textos não são imparciais, pois estão relacionados diretamente aos interesses dos fabricantes.

Nesse contexto, o presente trabalho apresenta a finalidade de apresentar um texto que busque a objetividade e imparcialidade sobre o projeto de um para-raios ZnO para linha de transmissão (LT) e subestações. Dessa forma, este trabalho visa preencher a lacuna existente na literatura.

1.2. Objetivo do trabalho

O objetivo principal do trabalho consiste na realização do estudo dos aspectos funcionais dos para-raios ZnO e como aplicá-lo à LTs. Para alcançá-lo, existem objetivos secundários que serão apresentados a seguir:

- Revisão bibliográfica referente aos conceitos de descarga atmosférica;
- Revisão bibliográfica referente aos conceitos fundamentais de para-raios, com destaque à evolução do equipamento;
- Estudo do funcionamento do equipamento e dos modelos utilizados para modelagem matemática;
- Simulações dos modelos de representação de para-raios ZnO para cálculo de transitórios no ATP;
- Critérios de seleção e instalação dos para-raios ZnO em LTs e subestações;
- Compreender a influência do tempo de frente para o desempenho do para-raios frente a descargas atmosféricas;
- Compreender a influência da impedância de aterramento para o desempenho do para-raios frente a descargas atmosféricas.

1.3. Justificativa

Observa-se que órgãos como a ANEEL e o ONS definem níveis mínimos de desempenho das LTs que devem ser respeitados de acordo com a tensão nominal de operação. Nesse contexto, a utilização dos para-raios ZnO consiste em um método eficiente para adequar as LTs aos limites estabelecidos.

Em casos de LTs situadas em regiões que apresentam elevada incidência da taxa de descargas atmosféricas ou que apresentam solo com elevada resistividade, a utilização desse equipamento pode ser a única solução viável para atingir os índices definidos por normas.

Além disso, a opção pela operação e instalação dos para-raios ZnO exigem o conhecimento de diversos aspectos teóricos e funcionais do equipamento e da LTs. Percebe-se a ausência de referências completas, escritas em português na literatura tradicional.

1.4. Organização do trabalho

Este trabalho possui estudos desenvolvidos e resultados apresentados na seguinte ordem.

No Capítulo 2, mostram-se os conceitos fundamentais a respeito do tema descarga atmosféricas. Apresentam-se os conceitos fundamentais e necessários no desenvolvimento do trabalho.

No Capítulo 3, aborda-se o estudo teórico dos para-raios. Em especial, busca-se mostrar a característica evolutiva desse dispositivo. Além disso, apresentam-se modelos que podem representar através da simulação a atuação desses equipamentos sobre a condição de descarga atmosférica.

No Capítulo 4, trata-se da utilização da escolha baseada em critérios técnicos do equipamento para-raios produzido por um fabricante. A partir da escolha desse equipamento no catálogo, ocorreu o levantamento dos parâmetros do modelo IEEE que será utilizado para a realização das simulações deste equipamento operando na linha de transmissão. Além disso, realizou-se a elaboração do modelo que representará o sistema a ser analisado. Nesse contexto, representa-se a impedância de aterramento, a torre e os cabos que representam as fases e o cabo para-raios.

Posteriormente a elaboração de todo o arcabouço necessário para a realização das simulações, inicia-se as mesmas na seguinte ordem: incidência da descarga atmosférica no topo da torre, incidência da descarga atmosférica a meio vão e finalmente a incidência da descarga atmosférica diretamente na fase. Para todas as simulações realizadas anteriormente, o foco de análise consiste na influencia do tempo de frente da descarga atmosférica e a impedância de aterramento da torre.

No Capítulo 5, realiza-se um fechamento do trabalho. Além disso, existe nessa parte uma proposta de continuidade de estudo a respeito do tema proposto.

Capítulo 2

Descargas atmosféricas: definições gerais

2.1. Introdução

Este capítulo apresenta conceitos gerais utilizados no desenvolvimento do presente trabalho. Abordam-se definições para as descargas atmosféricas e a interação desta com LTs. Além disso, mostram-se as formas convencionais de melhorias da proteção de LTs frente às descargas atmosféricas.

2.2. Descargas Atmosféricas

2.2.1. Formação das descargas atmosféricas

A descarga atmosférica é um fenômeno natural caracterizado por um impulso de corrente elétrica de grande amplitude em um curto período de tempo [1]. Popularmente conhecidos como raios, faíscas ou coriscos, as descargas atmosféricas ocorrem em todo o planeta.

As descargas são classificadas em grupos de acordo com o início e término de sua formação. Existem as descargas intra-nuvens, entre-nuvens, no ar e nuvem-solo. As primeiras ocorrem no interior de uma mesma nuvem de tempestade, através dos canais ionizados que interligam os centros de cargas de sinais diferentes. As segundas ocorrem entre nuvens distintas, através da conexão entre centros de carga com sinais opostos pertencentes a nuvens diferentes. O terceiro grupo compreende as descargas no ar que partem de uma nuvem e terminam na própria atmosfera, sem alcançar outra nuvem ou o solo. Finalmente, as descargas nuvem-solo são aquelas que caracterizam pela ligação dos centros de cargas localizados respectivamente nas nuvens e solo [1]. A Figura 2-1 ilustra os quatro grupos de descargas atmosféricas descritos anteriormente.

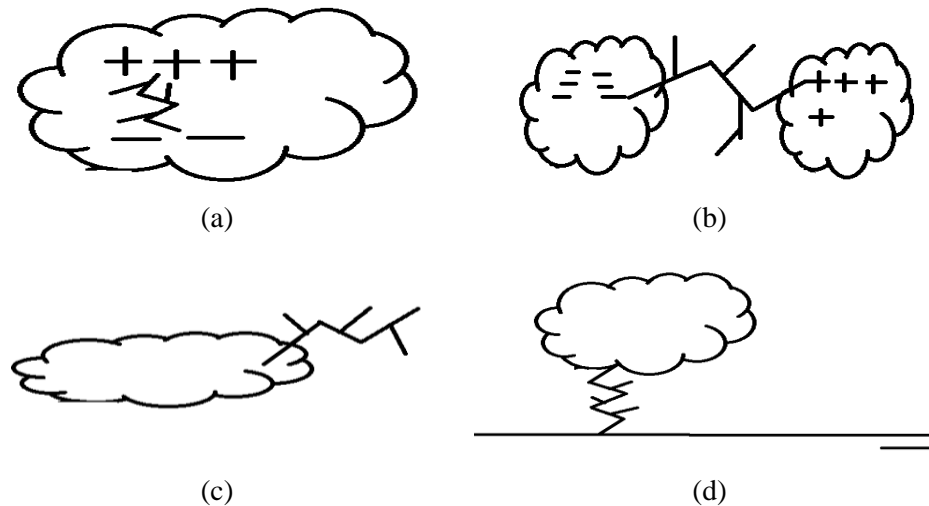


Figura 2-1 -Tipos de descargas atmosféricas no céu: (a) Intra-nuvens, (b) Entre-nuvens, (c) no ar e (d) Nuvem-solo.

As descargas nuvem-solo se dividem em descargas negativas, originadas pelo acúmulo de cargas negativas, e positivas, formadas pela concentração de cargas positivas. Destaca-se que as descargas positivas possuem maior amplitude de corrente, mas sua incidência em LTs é de apenas 10%. Assim, em relação ao estudo de LTs, as descargas negativas são mais importantes [2].

A descarga nuvem-solo ainda pode ser ascendente ou descendente. A primeira se forma no sentido nuvem-solo, enquanto a segunda apresenta sentido de formação nuvem-solo.

A Figura 2-2, que mostra uma descarga negativa descendente, é utilizada para apresentar os passos de formação de uma descarga atmosférica. Inicialmente, percebe-se a polarização da nuvem em (a), com acúmulo de descargas negativas na parte inferior da nuvem, ocorre à ionização do ar. Com a ruptura do ar, formam-se os primeiros canais de plasma. Observa-se que o canal percursos da descarga se estende da nuvem para a terra. Além disso, à medida que o campo elétrico aumenta sua intensidade, originando canais ascendentes no solo. Observa-se que o canal ascendente se estende em direção ao canal descendente da nuvem [1].

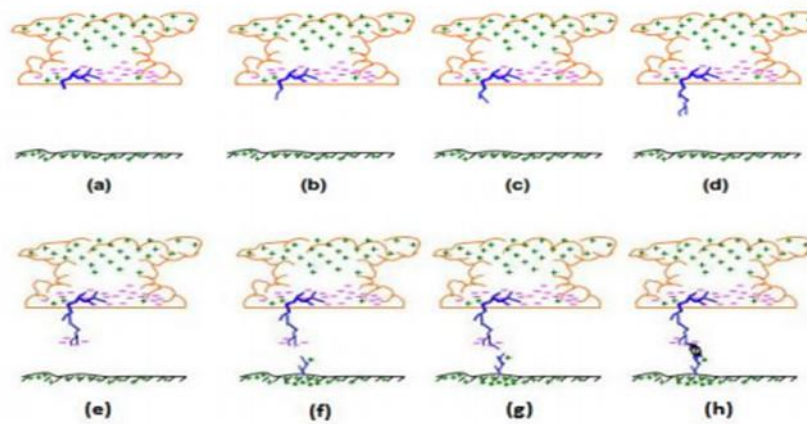


Figura 2-2 - Processo da evolução da descarga atmosférica [2].

O canal ascendente se aproxima do canal descendente até a distância crítica, onde ocorre uma descarga elétrica que interliga os dois canais. Com a conexão nuvem-solo construída, há um pico de corrente de curta duração proveniente do processo de neutralização da nuvem com o solo. Com a neutralização e consequente diminuição do deslocamento de cargas, os canais iônicos são eliminados e a descarga atmosférica cessa.

A discussão anterior mostra a aleatoriedade das descargas atmosféricas. Com o canal nuvem-solo formado, nada impede que descargas subsequentes possam ocorrer. Contudo, as descargas subsequentes não serão tratadas neste trabalho pela menor frequência de ocorrência em LTs, como discutido em [3]. Destaca-se que descargas únicas tendem a ter maior pico de corrente que as subsequentes.

2.2.2 Principais parâmetros das descargas atmosféricas

As correntes das descargas atmosféricas costumam ser representadas na forma triangular, com um pico de corrente e uma “cauda” de descida. A Figura 2-3 ilustra esta característica. Destaca-se que o formato triangular é apenas uma simplificação para a descarga, sendo usada para facilitar seu estudo em simulações [3].

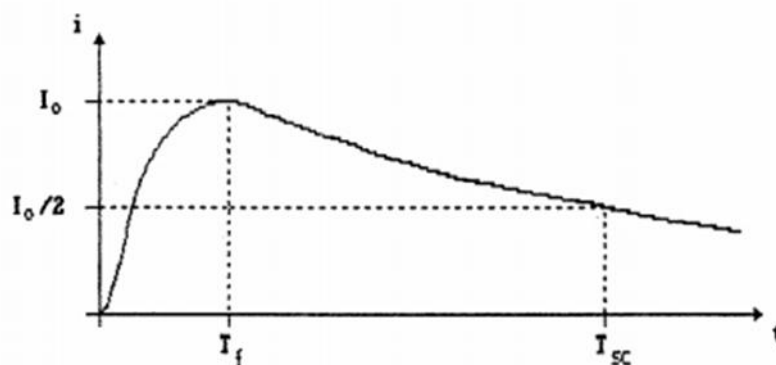


Figura 2-3– Forma de onda da corrente de retorno [3].

2.2.2.1 Amplitude de corrente

A amplitude da corrente também designada de valor de pico da onda ou crista da onda de corrente corresponde ao valor máximo alcançado pela onda [3]. Esse parâmetro é representado pelo símbolo I_0 , que corresponde ao valor de pico da Figura 2-3.

2.2.2.2 Tempo de frente de onda

O tempo de frente da onda (T_f) é definido pelo intervalo de tempo que corresponde ao início da onda impulsiva até o alcance do primeiro pico da onda (I_0). A Figura 2-3 associa a amplitude da corrente ao valor do parâmetro T_f [1].

2.2.2.3 Taxa de subida de onda

A taxa de subida da onda é o parâmetro que determina a derivada máxima da onda de corrente que ocorre próximo ao primeiro pico, como consequência do aspecto côncavo da frente de onda [1]. A unidade desse parâmetro é dada em $kA/\mu S$.

2.2.2.4 Tempo de meia onda

O tempo de meia onda ou tempo de semi-cauda (T_{sc}) corresponde ao intervalo de tempo entre o início da onda de descarga e o instante em que a corrente, após ter atingido o valor de pico, atinge o valor de $(I_0/2)$ [1].

2.2.2.5 Densidade de descargas local

A densidade de descargas local é o parâmetro que quantifica a taxa de incidência das descargas atmosféricas. Esse parâmetro relaciona o número de descargas por unidade de área por ano e usualmente é representada por N_g . Diversos fatores influenciam no valor desse parâmetro, tais como a distribuição de chuvas na região, a latitude e o relevo local. Além disso, observa-se que regiões que apresentam maiores altitudes tendem a possuir uma maior densidade de descargas em relação às regiões baixas adjacentes [1]. A Tabela 2-1 mostra valores típicos de densidade de descargas em diferentes regiões do planeta.

Tabela 2-1 - Índices típicos de densidades de descargas em certas regiões [2].

Local	Valor Típico de N_g [Descarga/Km ² /ano]
Alemanha	(1 – 1,5)
Áustria	1,5(1,6)
França	1,7(0,5 – 5)
Austrália	(0,2 – 4)
Estados Unidos da América	2,0 (0,1 – 14)
México	(1 – 10)
Minas Gerais (Brasil)	4,0 (1 – 12)

O Brasil apresenta um elevado N_g em relação a países localizados nas zonas temperadas. A Figura 2-4 representa o mapa de densidades de descargas no Brasil. O N_g representa o valor médio do número de descargas que incidem no solo por ano. Dessa forma, nota-se que uma determinada região apresenta um valor de N_g , mas áreas internas dessa região apresentam uma variação do N_g .

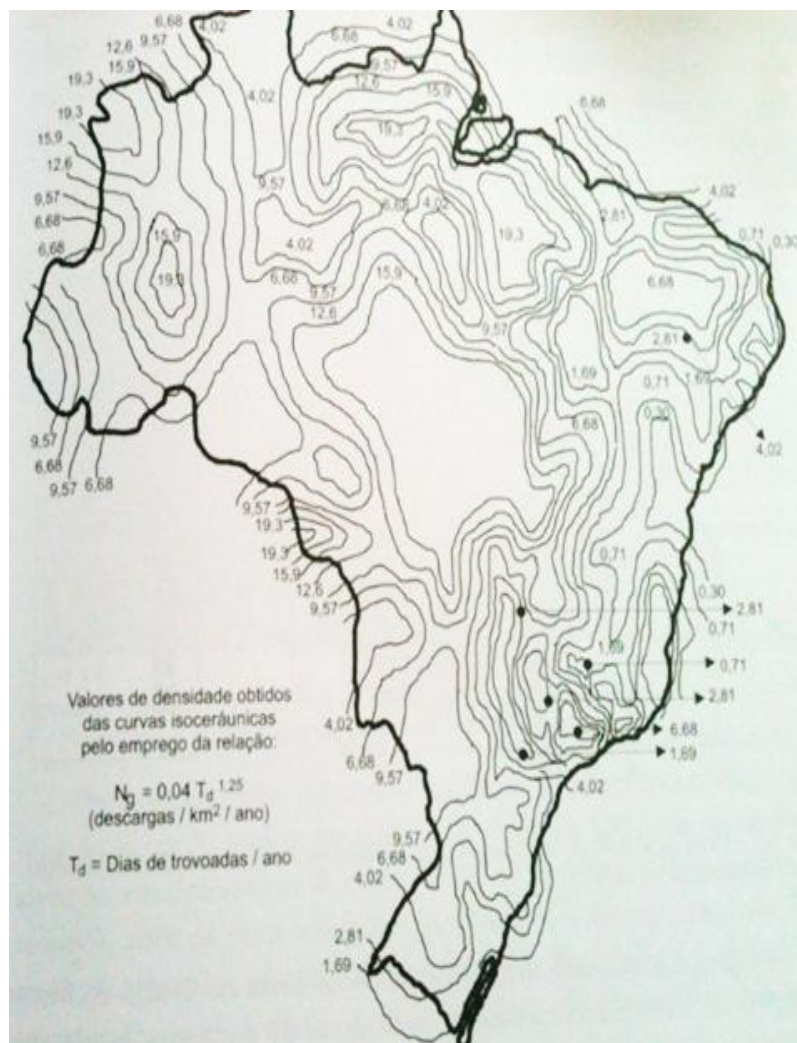


Figura 2-4– Mapa de densidade de descargas no Brasil [1].

Existem diferentes funções para a definição dos parâmetros característicos das descargas atmosféricas. Em particular, cita-se o estudo do *Conseil International des Grands Réseaux Électriques* (CIGRÉ ou Conselho Internacional de Grandes Sistemas Elétricos) e da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG). A função de distribuição acumulada permite calcular a probabilidade da corrente de pico de uma descarga I ser superior ou igual ao valor da corrente I_0 . Os estudos do CIGRÉ e CEMIG utilizam as seguintes equações abaixo que representam as curvas de probabilidade [4].

$$\text{CIGRÉ: } P(I \geq I_0) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_0}{31}\right)^{2,6}} \quad (2.1)$$

$$\text{CEMIG: } P(I \geq I_0) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_0}{45}\right)^{4,7}} \quad (2.2)$$

2.5. Impactos das descargas atmosféricas nos sistemas elétricos

2.5.1. Incidência de descargas atmosféricas diretamente em condutores fase

A incidência de descargas atmosféricas diretamente em condutores fase caracteriza o *flashover*. Também conhecida como descarga disruptiva no isolamento. Esse fenômeno acontece principalmente pela ausência de cabos guarda ou por falha de blindagem do sistema. Além disso, observa-se que a ocorrência do *flashover* em linhas de transmissão com cabos para-raios é extremamente não provável. Geralmente, o acontecimento dessa falha está associado à falha de projeto [2].

A incidência direta da descarga atmosférica na linha de transmissão ocasiona o aparecimento de uma onda de sobretensão. Essa onda é igual ao produto da onda de corrente que se propaga na linha pela impedância de surto da linha. A Figura 2-5 mostra que a sobretensão apresenta a capacidade de causar uma falha de isolamento. Dessa forma, um arco elétrico é estabelecido, conectando a fase à estrutura aterrada e provocando o desligamento da linha [2].

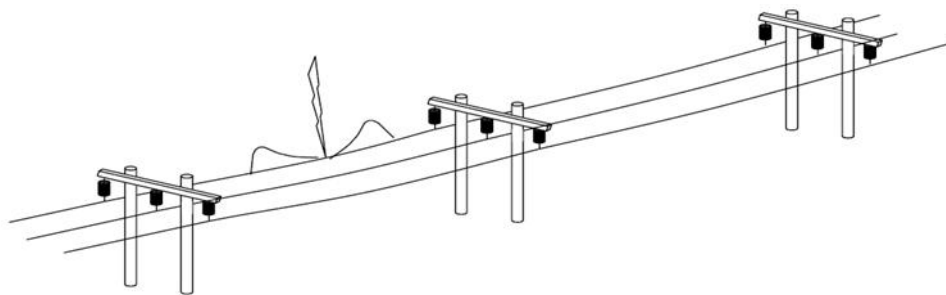


Figura 2-5- Linha trifásica sem cabos de blindagem sendo atingida diretamente por uma descarga [4].

2.5.2. Incidência de descargas atmosféricas em torres e cabos para-raios

O *Backflashover* ou descarga disruptiva de retorno corresponde a uma falha no isolamento quando uma descarga atmosférica incide no condutor de blindagem [4]. Percebe-se na Figura 2-6 que a descarga atmosférica incide sobre o condutor de blindagem. O resultado dessa descarga corresponde a uma onda de corrente que se propaga nos condutores de blindagem. Essa onda de corrente busca descarregar-se no solo através das diversas estruturas aterradas.

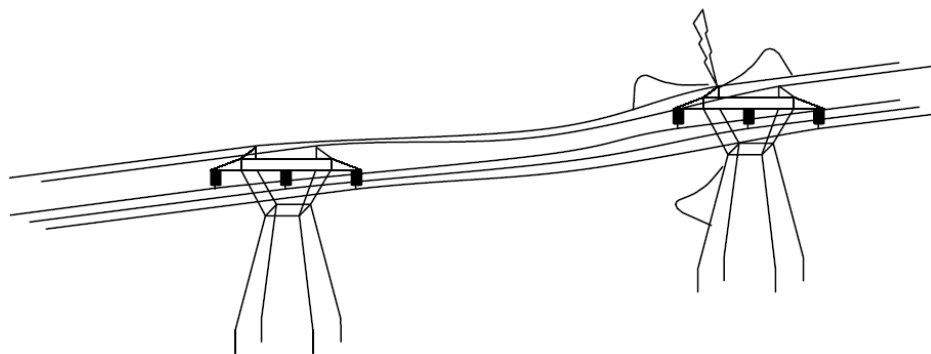


Figura 2-6 – Linha de transmissão trifásica sendo atingida em seus condutores de blindagem por uma descarga atmosférica [4].

Além disso, nota-se que associado a esta onda de corrente existe uma onda de tensão cuja amplitude é dada aproximadamente pelo produto entre a amplitude da onda de corrente e a impedância de surto da linha [2].

2.6. Técnicas para melhoria do desempenho de linhas frente às descargas atmosféricas

O desempenho de uma linha de transmissão frente a descargas elétricas está relacionado ao número de desligamentos decorrentes dos diversos tipos de solicitações por descargas atmosféricas. Observa-se que o aumento desse desempenho consiste na minimização da ocorrência desses desligamentos.

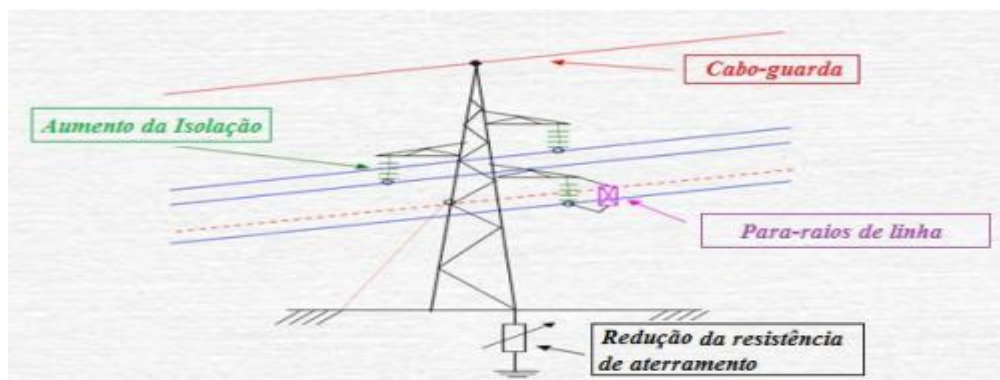


Figura 2-7- Métodos para aumentar a eficiência da linha de transmissão [2].

Existem na literatura técnicas de melhoria de desempenho denominadas tradicionais. A Figura 2-7 apresenta os métodos convencionais conhecidos como uso dos cabos para-raios, aumento da cadeia de isoladores, melhoria da resistência de aterramento e uso de para-raios.

2.6.1. Cabo para-raios ou cabo-guarda

A instalação de cabos para-raios nas LTs é um método com a finalidade de melhorar o desempenho das linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas. A presença dessa blindagem atenua o número de descargas que incidem sobre os condutores fases. Em função disso, a taxa de desligamentos diminui consideravelmente [2].

2.6.2. Aumento da cadeia de isoladores

O aumento da cadeia de isoladores ocasiona a elevação da tensão suportável de isolamento na linha, tornando-a mais robusta. Percebe-se que essa técnica consiste em aumentar o percurso na superfície da cadeia entre os condutores energizados e as estruturas aterradas. Portanto, essa técnica atua-se nas distâncias elétrica, e consequentemente, amplia-se o nível básico de isolamento (NBI) da linha de transmissão.

Outro ponto a destacar é a questão da suportabilidade dos isolamentos dos sistemas elétricos e eletrônicos em relação às sobretensões associadas a descargas. Essa suportabilidade depende da inclinação de onda e o tempo de frente das sobretensões geradas tem relação direta com o tempo de frente da corrente [1].

Por outro lado, a utilização deve ser empregada com critério, sobretudo no caso de linhas já projetadas. Em condições de tempestade, observa-se que existe uma maior probabilidade do vento aproximar os condutores energizados das partes da estrutura aterrada. Tudo isso ocasiona a diminuição do nível de suportabilidade do isolamento da linha [1].

2.6.3. Melhoria da resistência de aterramento

A melhoria do aterramento de pé de torre apresenta como objetivo primordial a redução da amplitude da sobretensão ocorrida na cadeia de isoladores das torres. Dessa forma, ocorre a minimização da frequência de ocorrência da descarga disruptiva de retorno, através do *backflashover*. Este fenômeno é o mecanismo de desligamento de linha de transmissão mais frequente em linhas blindadas com condutores para-raios. Além disso, a adoção dessa técnica exige o conhecimento da impedância de aterramento [2].

2.6.4. Uso dos para-raios

A utilização dos dispositivos para-raios constitui exemplo de uma técnica tradicional. O funcionamento desse equipamento é baseado em um efeito de não linearidade entre a tensão aplicada nos seus terminais e a corrente que circula pelo dispositivo.

O para-raios é constituído basicamente do resistor não linear com a inclusão ou não de gaps dependendo do material utilizado no elemento não linear. Nesse contexto, os para-raios são fabricados de SiC ou ZnO [2].

Em geral estes dispositivos, quando instalados em linhas de transmissão de alta tensão, são aplicados em paralelo com os isoladores. Na ocorrência de uma descarga atmosférica, os para-raios atuam “grampeando” o valor da sobretensão resultante sobre a cadeia de isoladores, como indicado na Figura 2-8, que mostra a onda de tensão resultante na presença ou ausência do dispositivo para-raios em paralelo com o isolador [5].

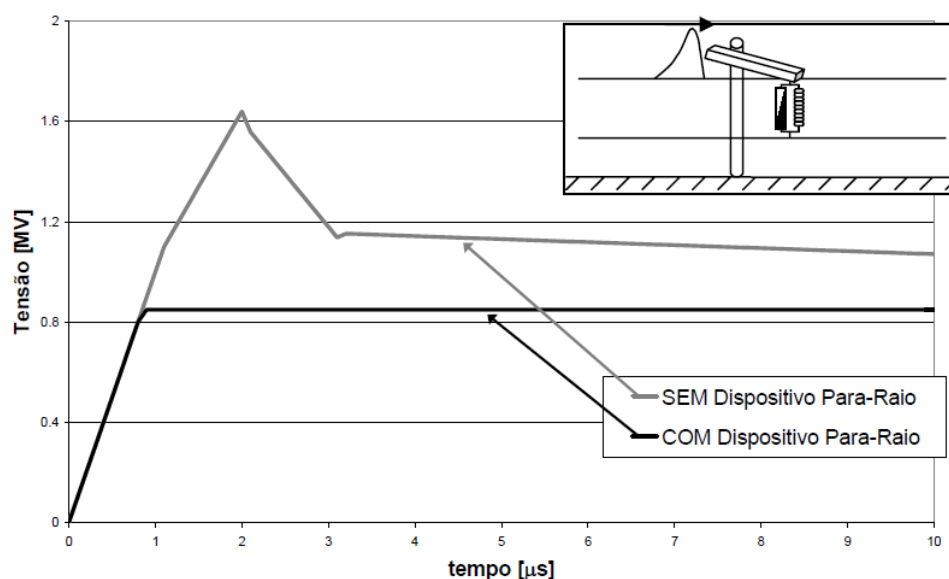


Figura 2-8- Comparação entre a curva de sobretensão com e sem a utilização do para-raios [5].

A vantagem nesta técnica é a garantia da continuidade absoluta do fornecimento de energia, reduzindo significativamente o número de desligamentos. Por outro lado, a aplicação destes dispositivos apresenta um custo extremamente elevado. Portanto, recomenda-se a utilização de forma seletiva em pontos críticos com uma relação de compromisso entre custo e benefícios [5].

2.7. Considerações finais

Neste capítulo foi feita uma revisão bibliográfica sobre os principais assuntos discutidos ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Observa-se que o objetivo primordial do trabalho consiste no estudo dos aspectos funcionais dos para-raios ZnO e critérios de seleção desse dispositivo nas LTs. Em função disso, este capítulo apresentou os principais parâmetros das descargas atmosféricas. Além disso, foi dada atenção especial aos para-raios de linha. Esses dispositivos são utilizados para melhoria no desempenho das linhas frente a descargas atmosféricas.

Capítulo 3

Para-raios

3.1. Introdução

Este capítulo consiste de uma revisão teórica sobre a evolução dos para-raios. Nesse contexto, com o objetivo de facilitar a análise, optou-se em realizar o estudo em função dos adventos criados pelo homem respeitando a ordem cronológica dos mesmos. Além disso, existe um estudo sobre os modelos matemáticos utilizados na simulação de uma descarga atmosférica.

3.2. Evolução histórica

Com a finalidade de facilitar o processo de compreensão da evolução histórica dos para-raios, optou-se em dividir a análise em elementos, tais como: o captor de Franklin, centelhador, para-raios SiC e para-raios ZnO. Nesse contexto, observa-se que a Figura 3-1 ilustra um breve histórico da proteção contra descargas atmosféricas nos EUA.

Histórico da proteção contra descargas atmosféricas nos Estados Unidos

1750

Início da proteção contra descargas com a invenção do captor de Franklin por Benjamin Franklin

• Proteção contra descargas em estruturas

O captor de Franklin é empregado em todo o mundo para proteger estruturas de descargas atmosféricas. Igrejas e navios são os primeiros a utilizarem captosres de Franklin.

- **1839** Primeira patente aprimorando o captor de Franklin. Patente US 1096 A
- **1858** Primeira patente de proteção contra descargas em navios. Patente US 20877 A
- **1925** Primeira patente de proteção contra descargas em aviões. Patente US 1553087 A

1846

Proteção contra descargas na área de Comunicação desenvolvida com o surgimento do telégrafo

• Proteção contra descargas em sistemas elétricos

- **1847** Professor Joseph Henry descreve o primeiro para-raios (centelhador simples) em um trabalho sobre descargas atmosféricas e linhas de telégrafo.
- **1852** Uso do termo para-raios. Uso de forma geral na proteção de sistemas de telégrafo.
- **1855** Primeira patente de para-raios, mas com o termo dispositivo de descarga atmosférica. Patente US 13389 A
- **1860** Primeira patente a usar o termo para-raios. Patente US 29533 A
- **1876** Invenção do telefone e proteção do mesmo por para-raios.
- **1917** Início da proteção contra descargas de equipamentos eletrônicos e primeiro para-raios de tubo a vácuo. Patente US 1244528 A
- **1967** Primeiro para-raios de estado sólido baseado em ZnO. Patente 3503029 A

1882

Proteção contra descargas em LTs nasce em Nova Iorque

• Proteção contra descargas em SEP¹

- **1885** Elihu Thomson da Thomson-Houston Electric Company patenteia o primeiro para-raios de SEP. Patente US 321464 A
- **1890** Alexander Wurts é condecorado pela primeira patente de para-raios da Westinghouse Electric. Patente US 433430 A
- **1890** Uso de cabos para-raios para proteção de sistemas de potência. Patente US 428653 A
- **1892** Thomas Edison é condecorado pela primeira patente de para-raios da GE. Patente US 476988 A
- **1908** Para-raios eletrolítico com resistor não-linear em série com um gap é demonstrado. Patente US 992744 A (1911)
- **1930** Invenção do para-raios baseado em SiC. Patente US 1763667 A. O SiC é utilizado como resistência não-linear em série com um gap
- **1939** Disconector de para-raios criado pela Line Material Co. Patente US 2296708 A
- **1954** Primeiros gaps limitadores de corrente da Hubbell. Patente US 2825085 A
- **1976** Primeiros para-raios de óxido metálico com gap da GE. Uso em escala de para-raios de estado sólido na área de comunicações.
- **1987** Introdução do primeiro para-raios polimérico.

¹ SEP - Sistemas Elétricos de Potência

Figura 3-1 – Cronologia da proteção contra descargas atmosféricas nos EUA – adaptado de [6]

3.2.1. Captor de Franklin

O captor de Franklin é utilizado amplamente em estruturas e foi inventado em 1750. Consiste em uma haste metálica ligada ao solo por um fio metálico. Diversos aperfeiçoamentos do captor foram desenvolvidos ao longo dos anos para aplicações em estruturas e outras específicas. A Figura 3-2 ilustra um captor de Franklin utilizado na proteção de uma casa.

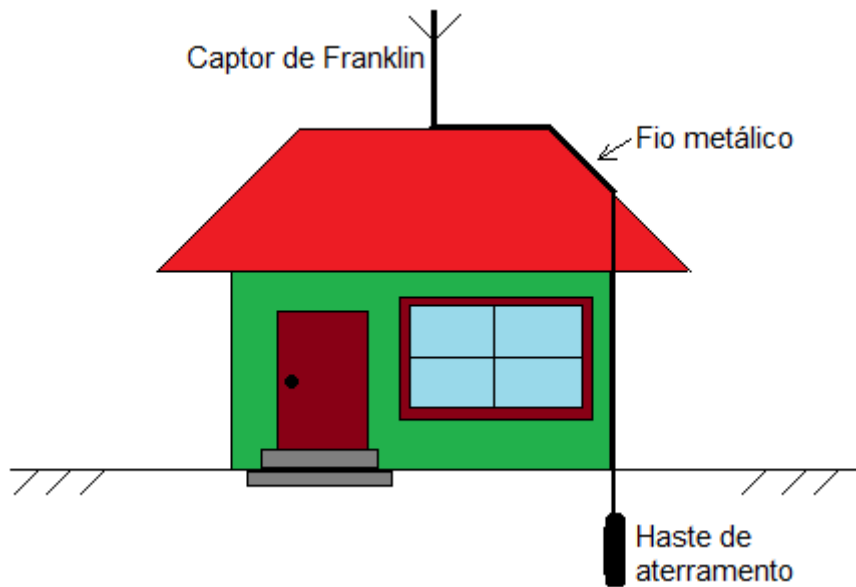


Figura 3-2 - Captor de Franklin

3.2.2. Centelhador

O centelhador foi empregado nas primeiras proteções, realizadas no final do século XIX. Esse dispositivo é eficaz na proteção contra as descargas atmosféricas, pois a ignição do arco-elétrico ocorre em uma tensão relativamente baixa. Além disso, o centelhador era conectado entre a terra do sistema e o condutor, conforme a Figura 3-3.

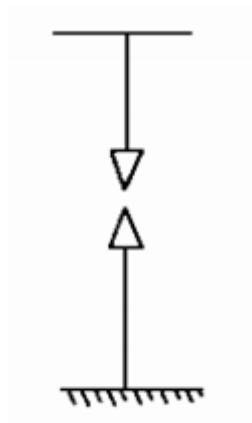


Figura 3-3– Centelhador–adaptada de [2]

Esse equipamento utiliza como meio dielétrico o próprio ar. Nota-se que quando a tensão supera seu valor de proteção, é criado um arco entre seus terminais, oferecendo um caminho de baixa impedância, pelo pino de menor resistência que deverá estar conectado a terra.

Destaca-se que esse equipamento apresentava como grande desvantagem o fato das variáveis climáticas interferirem diretamente no seu ponto de operação. Dessa forma, o nível de proteção dele sofre variações e assim a confiabilidade do sistema diminui consideravelmente [7]. Ainda, pode-se mencionar como aspecto negativo que esses dispositivos apresentam o estabelecimento de um curto-circuito que deve ser eliminado pela proteção do sistema elétrico.

3.2.3. Para-raios SiC

Os para-raios de carboneto de silício (SiC) são compostos por uma resistência não linear associado em série com os centelhadores, em um único invólucro vedado. Este é constituído por *gaps* que possibilitam o corte da corrente após o efeito da sobretensão [8].

Esse dispositivo foi necessário devido ao aumento dos níveis de tensão nos sistemas elétricos. Cabe salientar que este tipo de para-raios está ainda em uso nos sistemas elétricos mais antigos. A Figura 3-4 representa o para-raios SiC. O item (a) mostra o para-raios SiC encapsulado em vidro, produzido entre 1930 e 1960 e o item (b) mostra dois para-raios SiC de porcelana.

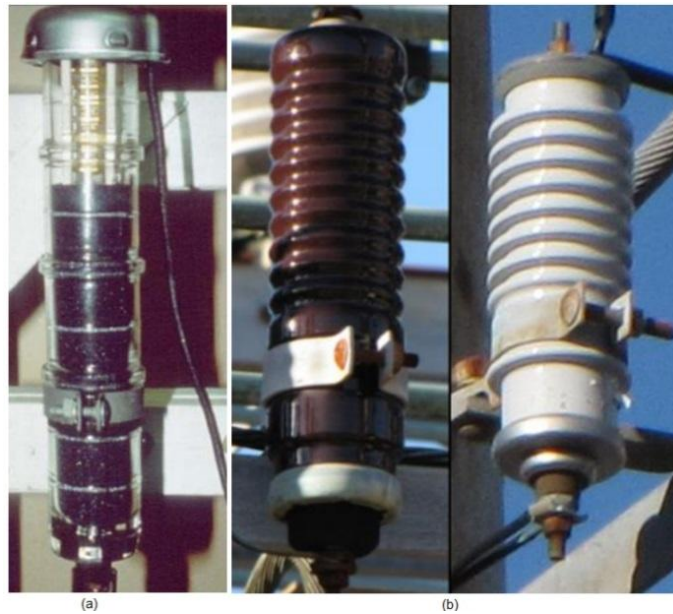


Figura 3-4- Para-raios SiC encapsulado em vidro [9]

Nota-se que a ausência do centelhador no para-raios SiC conduziria a terra uma corrente extremamente elevada quando submetido à tensão de operação (U_{op}). Em função disso, ocorreria um aumento significativo de temperatura do bloco cerâmico devido às perdas joule nos resistores não lineares. Esse aquecimento compromete a integridade física do equipamento e promove um defeito fase-terra no sistema [8]. A desvantagem é que a tensão de atuação desses para raios ficou dependente de outros fatores, tais como distância entre os centelhadores, poluição e condições climáticas [10]. Sabe-se que o *gap* de um para-raios SiC é constituído não apenas pela associação em série de um centelhador com o resistor não linear. Na sua constituição entra outros elementos, tais como *gaps* de ar e reatores.

3.2.4. Para-raios ZnO

Na década de 70, surgiram os para raios ZnO. Este dispositivo é fabricado atualmente e não necessitam de utilizar *gaps* em série. Em função disso, o tamanho físico do para-raios ZnO é inferior em relação ao para-raios SiC equivalente. Além disso, observa-se que esses para raios apresentam um aumento na capacidade de absorção de energia em relação ao para-raios SiC [10].

Pode-se observar que na Figura 3-5 que a elevada não linearidade do óxido de zinco permite que o equipamento tenha pequenas variações de corrente a ser drenada, frente a grandes variações de tensão, até a chamada tensão nominal do para raio. Ele, quando submetido à tensão de operação, conduz à terra uma corrente elétrica de valor muito pequeno. Esse crescimento dela pode denotar um defeito que consequentemente poderá implicar em uma falha do equipamento [8].

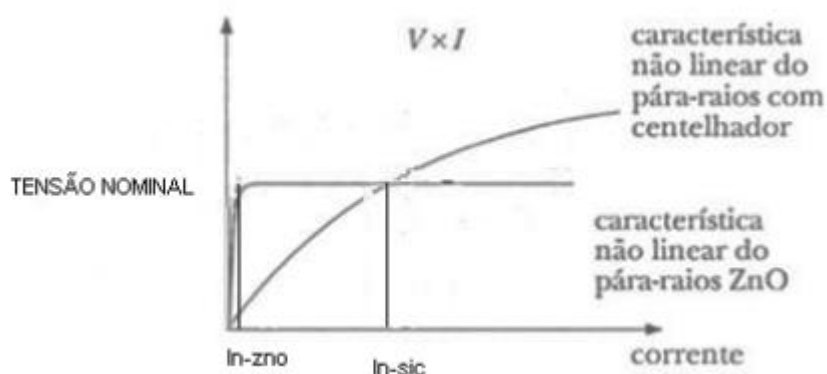


Figura 3-5-Curva $V \times I$ do para-raios ZnO e do para-raios SiC [8].

Cabe destacar ainda a existência dos para-raios ZnO com *gaps* externos. Estes dispositivos são conhecidos como EGLA, *Externally Gapped Line Arresters*. Esses equipamentos somente atuam em descargas atmosféricas e, por isso, não tem o estresse elétrico constante de um para-raios comum. Cabe destacar que os para-raios comuns sempre apresentam uma corrente mínima circulando nele. Dessa forma, eles sempre apresentam o mínimo estresse. Como consequência, os para-raios EGLA possuem maior durabilidade. Além disso, o EGLA necessita de outro para-raios ZnO comum para limitar transitórios do sistemas, como chaveamentos e sobretensões. O EGLA, embora em uso em algumas linhas, ainda está em desenvolvimento.

3.3. Principais termos empregados em para-raios ZnO

A seguir, descrevem-se os principais termos empregados em para-raios ZnO encontrados na literatura e principalmente em catálogos.

3.3.1. Maior tensão para o equipamento

Este parâmetro também é conhecido como a máxima tensão no sistema. Ele indica a maior tensão de linha em frequência industrial que pode ser aplicada continuamente sobre o para-raios, sem que ocorra alteração de suas propriedades [11].

3.3.2. Tensão de operação contínua ou COV

A tensão de operação contínua corresponde ao valor eficaz da tensão admissível à frequência do sistema de potência aplicável continuamente entre os terminais do para-raios [11]. Cabe salientar que o termo COV (*Continuous Operating Voltage*) é designado pela IEC e tem a máxima tensão de operação contínua (MCOV) como equivalente na ANSI.

3.3.3. Corrente contínua ou i_c

Esse parâmetro, conhecido como corrente de fuga, corresponde a corrente que flui através do para-raios quando este possui a tensão de operação contínua entre seus terminais. Além disso, verifica-se que a corrente i_c apresenta módulo próximo de 1mA e está quase 90° adiantada da tensão. Portanto, apresenta característica capacitiva.

3.3.4. Tensão nominal ou U_r

Do inglês *rated voltage*, corresponde ao valor máximo eficaz, em frequência industrial, para a qual o para-raios foi projetado a operar sem perder sua instabilidade térmica. Esse parâmetro é utilizado como referencia para a especificação das características de proteção e operação [11].

3.3.5. Nível básico convencional de isolamento a impulsos ou BIL

Do inglês *Basic Insulation Level*, é o valor máximo da crista de tensão suportável pelo para-raios. É determinada após uma série de testes no equipamento.

3.3.6. Tensão residual a ondas de corrente ou U_{res}

Esse parâmetro corresponde ao máximo valor da tensão que se estabelece no para-raios quando este é atravessado por uma corrente de impulso. Pode-se afirmar que a U_{res} é a tensão de grampeamento do para-raios frente à determinada onda de corrente. Além disso, a Tensão residual depende da forma de onda, amplitude e taxa de crescimento da corrente de impulso aplicada [11].

3.3.7. Tensão residual a ondas de corrente ou TOV

Do inglês *temporary overvoltage capability*, se refere a uma curva fornecida pelos fabricantes que demonstra o tempo que o para-raios suporta um múltiplo do COV à frequência do sistema de potência.

3.3.8. Classe de descarga

A classe de descarga é dividida em cinco classes pela norma IEC 60099-4. Ela caracteriza a energia suportável pelo para-raios de acordo com testes feitos com correntes de longa duração.

3.4. Características técnicas dos para-raios ZnO

3.4.1. Característica $V \times I$ não-linear

A curva tensão versus corrente é extremamente importante para a caracterização do comportamento de um para-raios. Observa-se que o para-raios ZnO apresenta característica não linear dividida em três regiões, conforme a Figura 3-6.

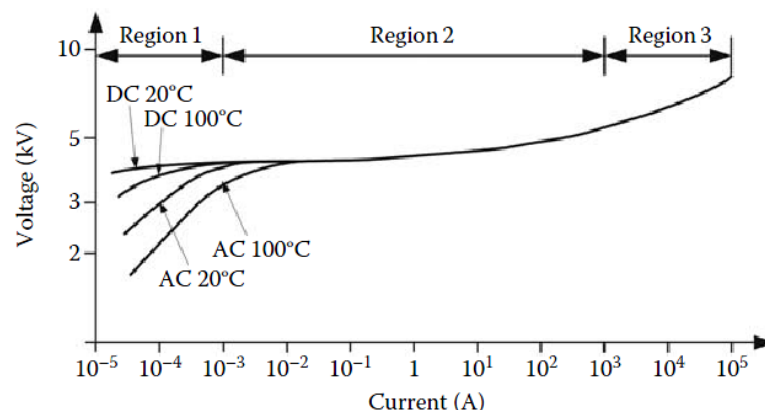


Figura 3-6- Curva característica VxI típica de um para-raios ZnO [12]

A Região 1 é caracterizada por apresentar uma corrente menor que 1mA e com característica capacitiva. Na Região 2, verifica-se que uma pequena variação na tensão ocasiona uma grande variação na corrente. Essa região é denominada região de TOV e surto de chaveamento. Cabe salientar que o para-raios opera nesta região por um intervalo de tempo de até 10 segundos. Caso o dispositivo opere nesta região, por um tempo maior que 10 segundos, a corrente de fuga associada provoca o aumento da temperatura das pastilhas de ZnO. Em função disso, nota-se o incremento da corrente de fuga do para-raios que acaba danificando o equipamento [2].

Por fim, a região 3 é a região de proteção do para-raios contra descargas atmosféricas. Nesta região, a corrente varia entre 1 e 1000kA. Além disso, a corrente apresenta uma relação linear com a tensão [2].

3.4.2. Influência de fatores na representação matemática de para-raios ZnO

A Tabela 3-1 indica o que é importante ou não acrescentar para representar cada modelo matemático do para-raios ZnO. Observa-se que transitórios de baixa frequência são influenciados pela característica tensão versus corrente dependente da temperatura. Em relação aos transitórios de frente rápida, exemplificados pelas descargas atmosféricas, são influenciados pela indutância do bloco ZnO, pela indutância do rabicho e pela característica tensão versus corrente com a frequência. Nesse tipo de transitório, pode-se desprezar a dependência tensão versus corrente com a temperatura.

Tabela 3-1– Guias para representar o para-raios ZnO [13]

Características do modelo	Transitórios de baixa frequência	Transitórios de frente lenta	Transitórios de frente rápida	Transitórios de frente muito rápida
Característica $V \times I$ dependente de temperatura	Importante	Desprezível	Desprezível	Desprezível
Característica $V \times I$ dependente da frequência	Desprezível	Desprezível	Importante	Muito importante
Indutância do bloco ZnO	Desprezível	Desprezível	Importante	Muito importante
Indutância do rabicho	Desprezível	Desprezível	Importante	Muito importante

3.5. Representação matemática dos para-raios ZnO

3.5.1. Modelo para baixas frequências e transientes com frente lenta

O modelo para representar os transitórios de baixas frequências e transitórios com frente lenta utiliza basicamente um resistor não linear associado em serie com a impedância de surto da linha. Cabe salientar que e o resistor não linear apresenta a característica tensão versus corrente do para-raios a ser modelado. Observa-se que a Figura 3-7 representa o modelo descrito anteriormente.

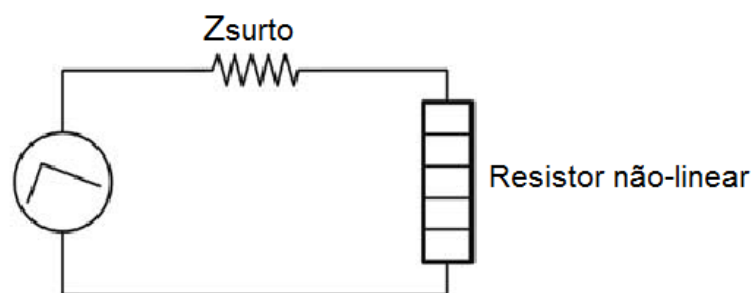


Figura 3-7-Modelo para baixa frequência e transitório com frente lenta [12].

Esse modelo representa a característica não linear do para-raios de forma satisfatória, todavia ele é incapaz de modelar o efeito dinâmico do para-raios. Isto é, esse modelo não apresenta um incremento da tensão residual com o aumento de frente do impulso aplicado.

Por fim, este modelo é uma boa opção para impulsos mais lentos, como os impulsos de manobra [14].

3.5.2. Modelo para transientes com frente rápida

Existem quatro modelos – CIGRÉ, IEEE, Histerético e Simplificado – para modelar um para-raios em cálculos de transitórios e eletromagnéticos [12]. Esse estudo prioriza a análise do modelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers* ou Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos). Este desenvolveu um modelo que apresenta respostas satisfatórias para a análise de descargas atmosféricas cujos parâmetros são calculados em função da frequência.

A Figura 3-8 mostra o modelo IEEE que utiliza duas resistências não lineares designadas por A_0 e A_1 para representar a característica não linear tensão versus corrente. Além disso, essas resistências são separadas por um filtro RL, cuja impedância é extremamente pequena.

Para o funcionamento correto do modelo, torna-se necessário que as duas seções representadas por A_0 e A_1 estejam associadas em paralelo. Observa-se que o filtro RL somente influencia nos resultados para surtos com frente de onda rápida [14].

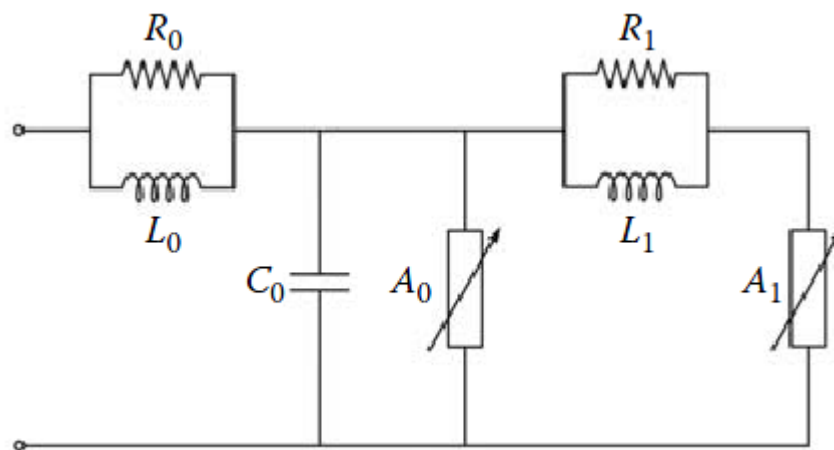


Figura 3-8- Modelo IEEE de para-raios ZnO, com parâmetros dependentes da frequência [13]

Os parâmetros L_1 e R_1 , dados, respectivamente, em μH e Ω , podem ser obtidos a partir das seguintes equações:

$$L_1 = 15 \frac{d}{n} \text{ } [\mu\text{H}] \quad (3.1)$$

$$R_1 = 65 \frac{d}{n} \text{ } [\Omega] \quad (3.2)$$

Em que:

d : comprimento dos para-raios [m];

n : número de para-raios em paralelo.

Os parâmetros A_0 e A_1 são obtidos através do uso das curvas característica dos para-raios tensão versus corrente elétrica. Nota-se que esses parâmetros apresentam características de tensão distintas. O capacitor representa a capacitância externa do para-raios devido à altura do dispositivo em relação ao solo. A indutância L_0 indica a indutância associada ao campo magnético junto ao para-raios. Além disso, o resistor R_0 é útil para estabilizar a integração numérica permitindo a modelagem no ATP [14].

Os parâmetros L_0 , R_0 e C_0 podem ser obtidos a partir das equações:

$$L_0 = 0,2 \frac{d}{n} \text{ } [\mu\text{H}] \quad (3.3)$$

$$R_0 = 100 \frac{d}{n} \text{ } [\Omega] \quad (3.4)$$

$$C_0 = 100 \frac{n}{d} \text{ } [\text{pF}] \quad (3.5)$$

3.5.3. Modelo para transientes com frente muito rápida

Os modelos para transientes com frente muito rápida ainda estão em desenvolvimento. Costuma usar modelos similares aos da frente rápida, mas incorporando a dependência tensão versus corrente com a frequência. Cabe destacar que esses transientes com frente muito rápida acontecem em chaveamentos em GIS (*GasInsulatedSubstation*), que usam SF_6 , e raramente em subestações convencionais isoladas a ar. Geralmente oscilam à frequência de 1MHz, embora possam apresentar componentes harmônicas de até 100MHz.

3.6. Considerações Finais

Neste capítulo foi feita uma revisão bibliográfica sobre os principais assuntos discutidos ao longo do desenvolvimento deste trabalho. O enfoque principal consiste a evolução dos para-raios. Além disso, ocorreu a apresentação dos parâmetros e modelos relacionados a esse dispositivo.

Capítulo 4

Resultados e análise de sensibilidades

4.1. Introdução

Neste capítulo será apresentada a análise do efeito da introdução do equipamento para-raios no desempenho de uma LT de 138kV frente a descargas atmosféricas. É importante mencionar que uma série de análises de sensibilidade pode ser realizada, produzindo um número muito grande de resultados. Nesse sentido, optou-se por focar em algumas análises específicas, mas que denotassem aspectos importantes da aplicação de para-raios em linhas de transmissão.

4.2. Sistema simulado

A Figura 4-1 apresenta uma silhueta típica da torre de uma LT de 138 kVa ser simulada no programa ATP. Nota-se a presença de quatro cabos, sendo três cabos fases (A, B, C) e um cabo para-raios (P). O condutor fase utilizado é o ACSR LINNET e o cabo para-raios corresponde ao 3/8" EHS. Nota-se que cabos ACSR é uma sigla em inglês, a abreviação do cabo em português é CAAA (condutor de alumínio com alma de aço). Destaca-se que o sistema é em estrela e solidamente aterrado com vão igual a 300 metros. A Tabela 4-1 mostra os resultados dos parâmetros referentes aos cabos mencionados anteriormente.

Para a torre analisada, a flecha dos condutores é dada por [15]:

$$f_{\text{máx}} = \frac{3}{2}(H_{\text{torre}} - H_{\text{média}}) \quad (4.1)$$

Em que:

- $f_{\text{máx}}$: flecha máxima do condutor [m];

- $H_{\text{média}}$: altura vertical do centro do condutor (ou do conjunto de cabos geminados) medida no meio do vão e a partir do solo [m];
- H_{torre} : altura vertical do centro do condutor (ou do conjunto de cabos geminados) medida na torre e a partir do solo [m].

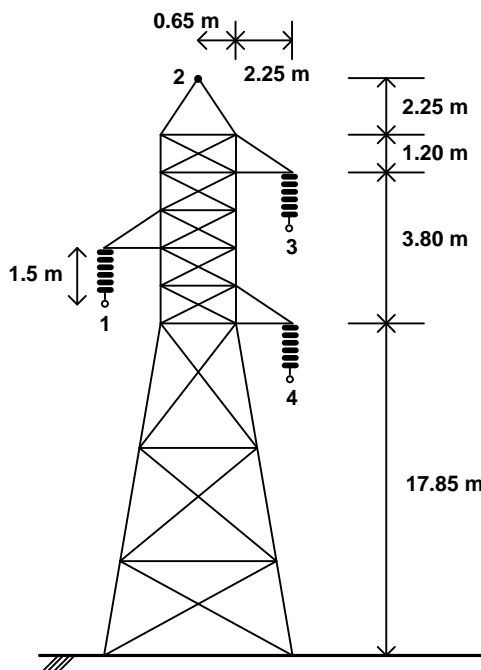


Figura 4-1 - Silhueta típica da torre de 138 kV

Tabela 4-1– Informações sobre os cabos

ACSR LINNET	Diâmetro nominal [mm]	
	Núcleo de aço	Condutor completo
	18,288	6,731
	Encordoamento	
	Número e diâmetro [mm]	
	Alumínio: 26x 2,888	Aço: 7x 2,245
	Resistência longitudinal [Ω/km]	
	$R_{CC,20^{\circ}\text{C}} = 0,166$	$R_{CA,75^{\circ}\text{C}} = 0,203$
3/8" EHS (classe A)	Diâmetro nominal [mm]	
	Aço: 9,144	
	Encordoamento	
	Número e diâmetro [mm]	
	Aço: 7x 3,048	
	Resistência longitudinal [Ω/km]	
	$R_{CC,25^{\circ}\text{C}} = 4,045$	$R_{CA,25^{\circ}\text{C},10\text{A},60\text{Hz}} = 4,095$

A partir da Equação (4.1), podem-se calcular as flechas dos condutores fase e cabo para-raios representados. A Tabela 4-2 indica os resultados obtidos.

Tabela 4-2– Resultados dos cálculos das flechas

Condutor	Flecha [m]
Fase A	15,483
Fase B	13,983
Fase C	11,683
Cabo para-raios	22,433

4.2.1. Modelagem dos cabos

O programa ATP dispõe de uma rotina para o cálculo dos parâmetros de linha de transmissão denominada LCC, própria para realizar estudos de transitórios ou de regime permanente, como o fluxo de potência [15]. O LCC dispõe de cinco modelos para modelagem de linha a citar: Pi, Bergeron, JMarti, Noda e Semlyen.

Os modelos Pi e Bergeron variam com a frequência. Além disso, esses modelos utilizam a frequência informada pelo usuário para o cálculo de seus componentes. Nesse contexto, eles são indicados para realizar a simulação da LT em regime permanente [15]. Os modelos JMarti, Semlyen e Noda calculam seus parâmetros a partir da frequência inicial informada pelo usuário até um valor de frequência própria do modelo. Assim, os componentes representados são mais fiéis por seus componentes não serem constantes-variáveis com a frequência de acordo com o sinal aplicado.

Nesse trabalho o transitório é o foco de interesse para análise. Portanto, adota-se o modelo JMarti que geralmente produz melhores resultados em relação aos demais modelos [15].

A Figura 4-2 mostra a tela do LCC com os valores adotados para o modelo JMarti. Percebe-se a adoção da linha transposta, efeito pelicular e a matriz de transferência real.

Model | **Data** | **Nodes**

System type
 Overhead Line | #Ph: 4
☒ Transposed
☐ Auto bundling
☒ Skin effect
☐ Segmented ground
☒ Real transf. matrix
 Units: ☒ Metric ☐ English

Standard data
 Rho [ohm*m] 200
 Freq. init [Hz] 60
 Length [km] 0.3
☐ Set length in icon

Model Type
☐ Bergeron
☐ PI
☒ JMarti
☐ Semlyen
☐ Noda

Data
 Decades 8 | Points/Dec 10
 Freq. matrix [Hz] 200000 | Freq. SS [Hz] 60
☐ Use default fitting

Model fitting data

NAME	DEFAULT	VALUE
ldebug	1	1
lpunch	0	0
Koutpr	0	0
Gmode	3e-8	3E-8

Comment: | Order: 0 | Label: | ☐ Hide

OK Cancel Import Export Run ATP View Verify Edit defin. Help

Figura 4-2 – Modelagem dos cabos

A partir da Tabela 4-1, montou-se a abaData do modelo LCC indicada na Figura 4-3. Nessa percebe-se a inserção dos parâmetros que correspondem às coordenadas dos cabos, raios internos e raios externos de cada cabo e a inserção dos seus valores de resistência por unidade de comprimento.

#	Ph.no	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]
1	1	0	1.8288	0.2077	3.2	20.15	14.4833
2	2	0	1.8288	0.2077	-3.2	18.65	13.9833
3	3	0	1.8288	0.2077	3.2	16.35	11.6833
4	4	0	0.9144	4.051	0	25.1	22.4333

Add row Delete last row Insert row copy Move

Figura 4-3 – Entrada dos parâmetros e posicionamento dos cabos na LT 138 kV simulada

A Figura 4-4 mostra a divisão da LT em seções, cada LCC representa a linha de transmissão de um vão de 300 m. Percebe-se que o círculo mostra a representação da resistência de aterramento. O retângulo vermelho ilustra a representação da torre e o retângulo amarelo indica o componente LCC que representa os cabos de um vão de 300 m. Finalmente, cabe salientar que o retângulo amarelo presente nas extremidades indica a LCC onde ocorreu o casamento de impedâncias.

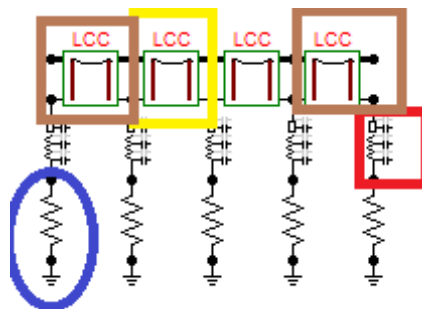


Figura 4-4 -Topologia da LT simulada no ATP

O casamento de impedâncias mencionado anteriormente consiste na utilização de um comprimento de vão significativamente grande. Nota-se que o artifício utilizado para eliminar o efeito da reflexão consiste em adotar o comprimento dos cabos destacados pelo retângulo marrom na Figura 4-4 como o produto da velocidade da luz por um tempo superior ao da simulação.

4.2.2. Modelagem da torre

A realização da simulação exige a modelagem da torre. Optou-se em modelar este componente através de uma linha monofásica. A Figura 4-5 indica a escolha dessa linha no programa ATP. Além disso, observam-se os parâmetros necessários na modelagem, tais como a impedância de surto e a velocidade de propagação da onda na torre.

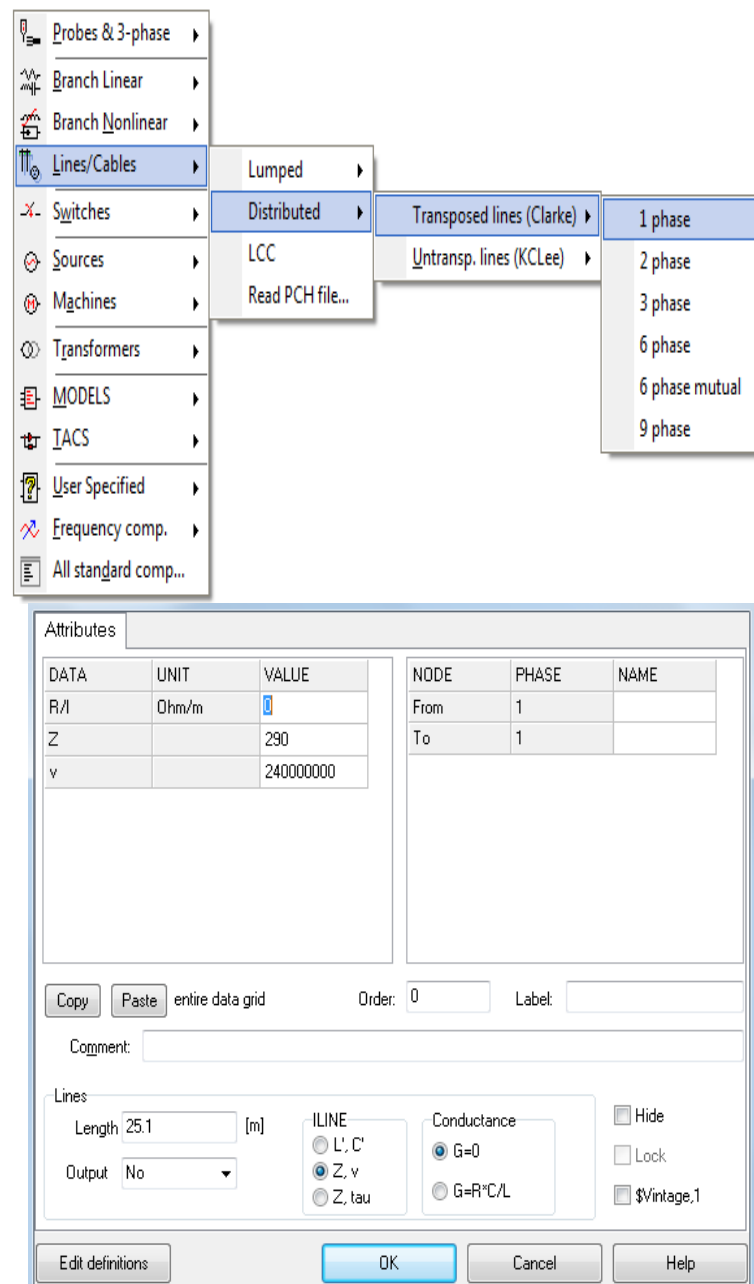


Figura 4-5– Modelagem da Torre

Simplificou-se a torre por um modelo cônico, apresentado na Figura 4-6, para o cálculo de sua impedância de surto [12]. Assim, encontrou-se um valor de impedância de surto igual a 165,75 Ω .

$$Z_{\text{surto}} = 60 \cdot \ln \left(\sqrt{2} \sqrt{\left(\frac{h}{r} \right)^2 + 1} \right) \quad (4.2)$$

Em que:

- Z_{surto} : impedância de surto da torre cônica [Ω];
- h : é altura da torre [m]. Para a torre avaliada, $h = 25,1$ m;
- r : raio da base da torre [m]. Para a torre avaliada, $r = 2,25$ m.

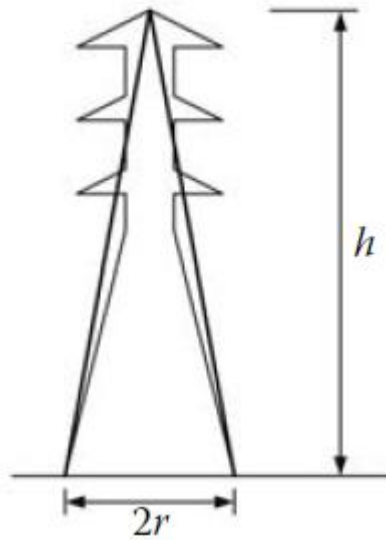


Figura 4-6 - Modelo cônico para a torre [12]

4.2.3. Modelagem do aterramento

A configuração de aterramento típica de torres autoportantes, tal como a analisada neste trabalho, constitui-se de 4 cabos contrapeso, cada um conectado a um pé da torre conforme ilustrado na Figura 4-7. Nas simulações a seguir em que não se avalia diretamente a influência do aterramento nas sobretensões desenvolvidas na linha de transmissão, considera-se o arranjo de aterramento da Figura 4-7 enterrado em um solo de 1000Ω e comprimento total de cada cabo contrapeso igual a 50 m.

O valor de $1000 \Omega\text{m}$ corresponde ao valor médio de resistividade do Brasil e o comprimento de 50 m corresponde ao comprimento efetivo de eletrodos horizontais considerando a resistividade de $1000 \Omega\text{m}$ e as primeiras descargas de retorno [16]. Nesse

caso, o valor da resistência de aterramento foi calculada utilizando o programa computacional desenvolvido em [17], tendo sido obtido um valor igual a cerca de 17 Ω . Note que esse valor de resistência é igual ao valor da impedância impulsiva de aterramento, desde que a dependência da frequência dos parâmetros do solo seja desprezada.

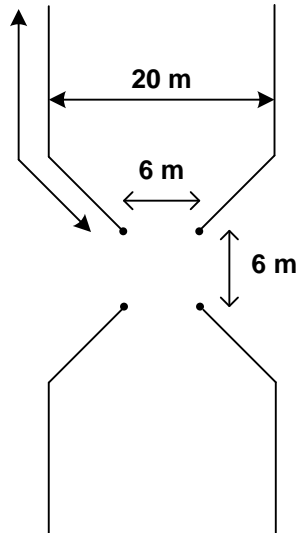


Figura 4-7 – Arranjo típico de aterramento de torres autoportantes

4.2.4. Modelagem do para-raios

Inicialmente, deve-se especificar o para-raios que será utilizado na simulação. Observa-se que a tensão de linha equivale a 138 kV. Segundo procedimento da ANEEL, esta tensão admite variação de $\pm 5\%$ na tensão de referência [18]. Em função disso, calcula-se a tensão máxima na linha como:

$$V_{Lm\acute{a}x} = V_L \cdot 1,05 = 144,9 \text{ kV.} \quad (4.3)$$

Posteriormente, determina-se a tensão máxima fase-terra ao qual o equipamento está submetido:

$$V_{Fm\acute{a}x} = \frac{V_{Lm\acute{a}x}}{\sqrt{3}} = 83,66 \text{ kV.} \quad (4.4)$$

Nesse sistema mencionado a tensão nominal pode atingir até 1,4 vezes o valor da tensão máxima fase-terra [19]. Em função disso, determina-se a tensão nominal por:

$$V_{\text{nom}} = k \cdot V_{\text{Fmáx}} = 1,4 \cdot V_{\text{Fmáx}} = 117,12 \text{ kV.} \quad (4.5)$$

Finalmente, determina-se a tensão de operação contínua do para-raios por [19]:

$$\text{COV} = \frac{V_{\text{nom}}}{1,25} = 93,70 \text{ kV.} \quad (4.6)$$

Percebe-se de referencia que a classe mínima a ser utilizada para o para-raios de 138 kV é a 2. A Tabela 4-3 resume as especificações mínimas de escolha do equipamento para-raios.

Tabela 4-3– Resultados Calculados

Tensão nominal do sistema	138 kV
COV mínimo do para-raios	93,70 kV
Tensão nominal do para-raios	117,12 kV
Classe mínima do para-raios	2

Com as especificações mínimas apresentadas na Tabela 4-3, buscou-se o equipamento em catálogos de fabricantes que passassem por esse critério. O fabricante escolhido foi a Siemens pelo detalhamento e número de opções de dispositivos para-raios em seu catálogo [20].

Escolheu-se a linha de modelos 3EL1 e dentro dessa buscou-se equipamentos para a tensão máxima do sistema de 145 kV. De forma conservativa, escolheu-se o equipamento 3EL1 132 1PH22, que possui tensão nominal igual a 132 kV, COV igual a 106 kV e classe 2, como mostra a4-8.

Electrical characteristics – phase arresters													
Highest voltage of the system	Rated voltage	Continuous operating voltage	Line discharge class	Long duration current 2ms	Maximum values of the residual voltages at discharge currents of the following impulses							Arrester type	Minimum housing size
U_s kV	U_r kV	U_c kV	LD Class	A	30/60 μ s 0.5 kA kV	30/60 μ s 1 kA kV	30/60 μ s 2 kA kV	8/20 μ s 5 kA kV	8/20 μ s 10 kA kV	8/20 μ s 20 kA kV	8/20 μ s 40 kA kV		
123	96	77	2	750	188	196	206	228	245	274	313	3EL1 096 - 1 P. 2. -	K
	96	77	3	800	188	196	206	228	245	274	313	3EL1 096 - 1 P. 3. -	N
	102	82	2	750	200	208	218	242	260	291	333	3EL1 102 - 1 P. 2. -	K
	102	82	3	800	200	208	218	242	260	291	333	3EL1 102 - 1 P. 3. -	2xH
	108	86	2	750	212	220	231	256	275	308	353	3EL1 108 - 1 P. 2. -	K
	108	86	3	800	212	220	231	256	275	308	353	3EL1 108 - 1 P. 3. -	2xH
145	154	123	2	750	302	314	330	365	393	440	503	3EL1 154 - 1 P. 2. -	P
	120	96	2	750	236	245	257	285	306	343	392	3EL1 120 - 1 P. 2. -	2xH
	120	96	3	800	236	245	257	285	306	343	392	3EL1 120 - 1 P. 3. -	P
	132	106	2	750	259	269	283	313	337	377	431	3EL1 132 - 1 P. 2. -	2xH
	132	106	3	800	259	269	283	313	337	377	431	3EL1 132 - 1 P. 3. -	P
	144	115	2	750	283	294	308	341	367	411	470	3EL1 144 - 1 P. 2. -	P
	144	115	3	800	283	294	308	341	367	411	470	3EL1 144 - 1 P. 3. -	Q

Figura 4-8 – Catálogo do fabricante

A partir do momento que o para-raios foi escolhido, necessita-se realizar a validação do modelo IEEE. Observa-se que os cálculos dos parâmetros desse modelo foram feitos usando as Equações (3.1) a (3.5) e seus resultados são destacados na Tabela 4-4.

Tabela 4-4–Resultados dos Parâmetros

R_0	124,5 Ω
R_l	80,925 Ω
L_0	2,49 μ H
L_l	22,01 μ H
C	8,032 pF

A Tabela 4-5 indica as características do resistor não-linear designado por A_0 [21]. Cabe destacar que o valor de pico da tensão da frente rápida V_{10} corresponde a 337 kV.

Tabela 4-5–Característica do resistor não-linear A_0

Corrente [A]	V_{pu} [pu]	$V [V] = V_{pu} \cdot V_{10}/1,6$
10	1,40	294875
100	1,54	324362,5
1000	1,68	353850
2000	1,74	366487,5
4000	1,80	379125
6000	1,82	383337,5
8000	1,87	393868,8
10000	1,90	400187,5
12000	1,93	406506,3
14000	1,97	414931,3
16000	2,00	421250
18000	2,05	431781,3
20000	2,10	442312,5

A Tabela 4-6 indica as características do resistor não-linear designado por A_I [21]. Além disso, existe a indicação do valor da tensão ajustado para ondas de frentes rápidas.

Tabela 4-6–Características do resistor não-linear A_I

Corrente [A]	V_{pu} [pu]	$V [V] = V_{pu} \cdot V_{10}/1,6$	$V [V]$ ajustado
100	1,23	259068,8	237118,8
1000	1,36	286450	267750
2000	1,43	301193,8	284243,8
4000	1,48	311725	296025
6000	1,50	315937,5	300737,5
8000	1,53	322256,3	307806,3
10000	1,55	326468,8	312518,8
12000	1,56	328575	314875
14000	1,58	332787,5	319587,5
16000	1,59	334893,8	321943,8
18000	1,60	337000	324300
20000	1,61	339106,3	326656,3

Com os parâmetros do modelo IEEE e as características dos resistores não lineares, realizou-se o ajuste do modelo com o objetivo da diferença entre as respostas do modelo e os

catálogos pelo fabricante ser menor que um por cento. Dessa forma, a Tabela 4-7 indica os resultados encontrados na simulação do para-raios.

Tabela 4-7–Comparação entre os resultados fabricante e modelo ajustado

Onda de corrente	Tensão de grampeamento (catálogo do fabricante)	Tensão de grampeamento (modelo IEEE criado)	Módulo do erro
0,5 kA, 30/60 μ s	259 kV	258,5 kV	0,19%
1 kA, 30/60 μ s	269 kV	268,49 kV	0,19%
2 kA, 30/60 μ s	283 kV	285,72 kV	0,96%
5 kA, 8/20 μ s	313 kV	312,51 kV	0,16%
10 kA, 8/20 μ s	337 kV	336,28 kV	0,21%
20 kA, 8/20 μ s	377 kV	377,29 kV	0,08%
40 kA, 8/20 μ s	431 kV	430,00 kV	0,01%

Supondo na realização desse experimento que a descarga atmosférica é representada por uma onda triangular. A Figura 4-9 representa um exemplo de onda triangular utilizada na simulação para a validação do modelo IEEE. Percebe-se que o pico da corrente corresponde a 5 kA e ocorre no instante de 8 μ S. Além disso, para um tempo de 20 μ S a amplitude da corrente elétrica será de 2,5 kA.

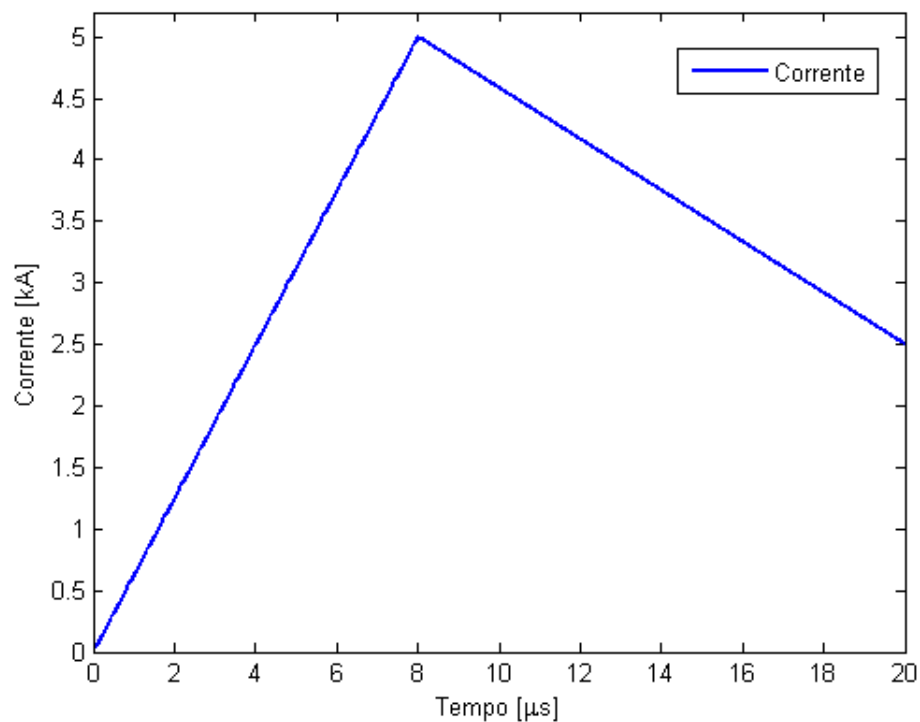


Figura 4-9– Exemplo de onda triangular

4.3. Resultados

A análise do para-raios em linhas de transmissão pode se limitar à sua resposta frente a descargas atmosféricas, visto que transitórios lentos possuem maior influência na absorção de energia do para-raios. A partir disso, avaliam-se os dois aspectos de maior relevância na análise do para-raios frente a descargas: o tempo de frente da descarga atmosférica e a influência da resistência de aterramento da torre.

Para avaliar esses dois aspectos, focou-se em três casos distintos, a citar a incidência direta de descargas no topo da torre, incidência a meio vão no cabo para-raios e incidência direta no cabo fase. Observa-se que a incidência no topo da torre corresponde ao pior caso para a proteção contra a *backflashover*– reflexão da onda de corrente no aterramento e consequente sobretensão resultante na cadeia de isoladores. A incidência a meio vão pode ocasionar sobretensões de maior intensidade em relação àquela desenvolvida sobre a cadeia de isoladores para a incidência no topo da torre. Por fim, a incidência no cabo fase apresenta a finalidade de avaliar o *flashover*. No modelo eletrogeométrico, nota-se que a elevação da corrente elétrica implica na menor probabilidade de perfurar a blindagem.

Os dados foram organizados de acordo com a ordem das simulações descritas anteriormente. Cabe salientar que cada simulação foi dividida em duas etapas. A primeira corresponde à influência do tempo de frente. Para isso, adota-se a impedância de aterramento como sendo constante. A segunda parte apresenta a finalidade de verificar a influência do aterramento. Agora, varia-se a impedância de aterramento e mantém o tempo de frente constante.

4.3.1. Incidência direta de descarga atmosférica no topo da torre

Aplica-se uma descarga atmosférica no topo da torre. Nota-se que esta descarga é modelada através de uma onda triangular de amplitude média igual a 45 kA que corresponde ao valor mediano das descargas medidas no Morro do Cachimbo - MG . Além disso, nota-se que o tempo de meia onda é próximo de 50 μ s [22].

4.3.1.1. Influência do tempo de frente

Nessa etapa do trabalho, pretende-se analisar a influência do tempo de frente da descarga atmosférica. Para isso adota-se a impedância de aterramento como sendo uma constante igual a 17Ω . Esse valor é indicado na seção 4.2.3.

Utilizou-se a Figura 4-10 na determinação dos tempos de frente a serem utilizados nas simulações desta seção. Percebe-se que foram escolhidos os valores correspondentes a 20%, 50% e 80% na curva 3. Esses resultados correspondem aos valores do parâmetro t_{30} . Além disso, determina-se o tempo de frente por [22]:

$$T_f = \frac{T_{30}}{0,6} \quad (4.7)$$

Onde:

T_f : tempo de frente [μs].

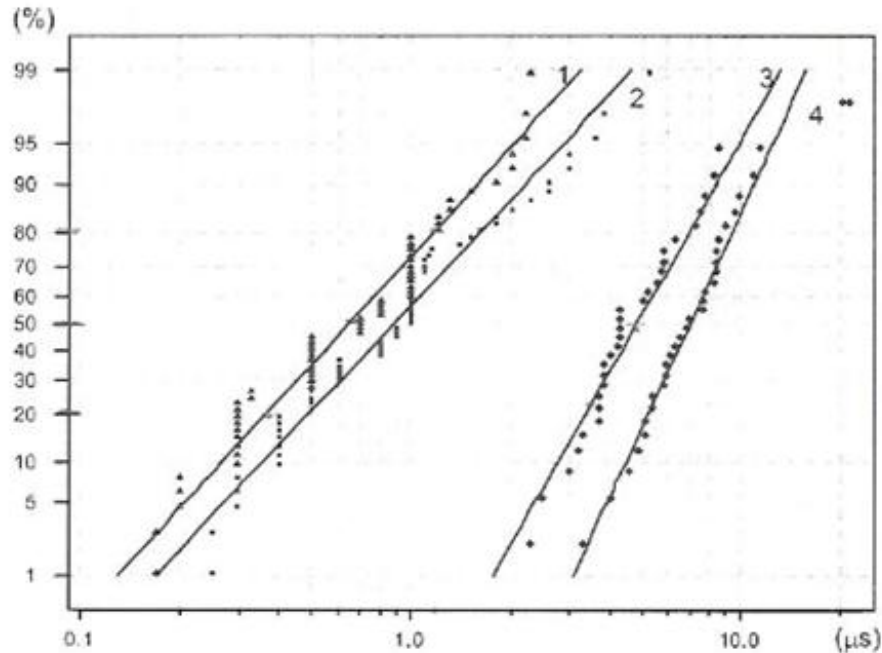


Figura 4-10 – Curva utilizada para estimar o tempo de frente [22]

A Tabela 4-8 apresenta os tempos de frente calculados a partir da equação (4.7).

Tabela 4-8 – Porcentagem e tempo de frente

Porcentagem (%)	Tempo de frente [μ s]
20	5,00
50	8,33
80	11,67

A Figura 4-11 exemplifica uma forma de onda de corrente utilizadas na simulação desta seção. Ela possui valor de pico de corrente igual a 45 kA para os tempos de frentes especificados.

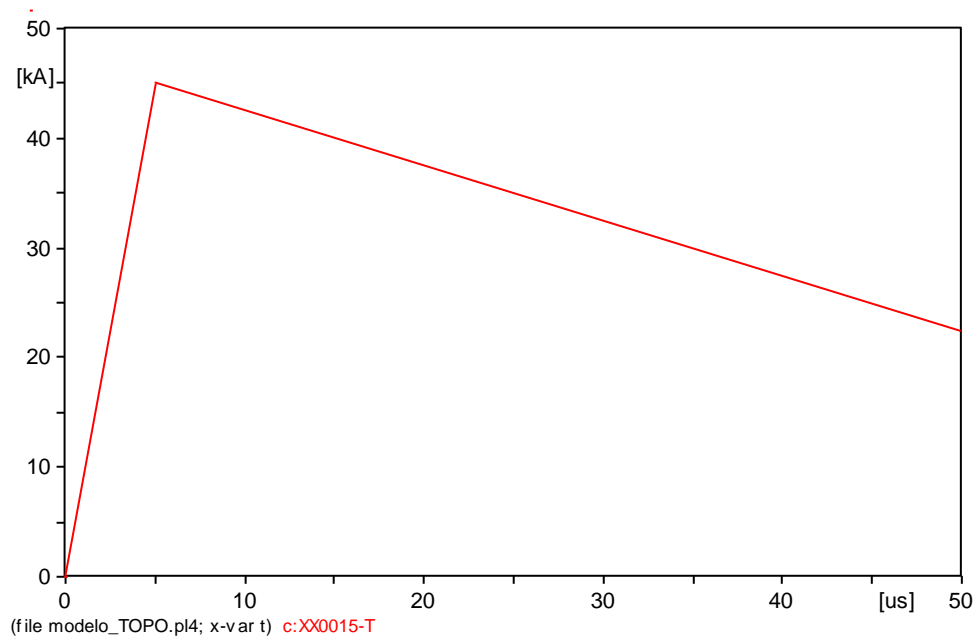


Figura 4-11 – Exemplos de ondas incidentes no topo da torre

Inicialmente, cabe destacar que a simulação realizada com a conexão do para-raios na fase A é análoga a conexão do para-raios na fase B ou fase C. Analogamente, na simulação a conexão do para-raios nas fases A e B equivalem à conexão do equipamento nas fases B e C ou fases A e C.

As Figuras 4-12 a 4-14 representa os resultados obtidos na simulação para a incidência da descarga atmosférica no topo da torre e na ausência do equipamento para-raios conectado as fases. Percebe-se que as tensões incidentes no topo da torre e nas cadeias dos isoladores apresentam comportamento similar. Além disso, percebe-se que as amplitudes das tensões incidentes no topo da torre e nas fases apresenta uma redução. Nesse contexto, de acordo com

as Tabelas 4-9 a 4-10, nota-se que para os tempos de frentes iguais a 5 μ s, 8,33 μ s e 11,67 μ s, o pico da amplitude da tensão no topo da torre corresponde respectivamente a 736,23 kV, 642,78 kV e 579,30 kV. Dessa forma, o pico dessa amplitude decresce respectivamente de 12,69 % quando o tempo de frente varia de 5 μ s a 8,33 μ s e de 9,87 % quando o tempo de frente oscila de 8,33 μ s a 11,67 μ s.

Analogamente, as Tabelas 4-9 a 4-10 indicam que as tensões nas cadeias dos isoladores correspondem a 530,47 kV, 457,94 kV e 407,10 kV para os respectivos tempos de frentes de 5 μ s, 8,33 μ s e 11,67 μ s. Portanto, percebe-se uma redução nessas tensões de 13,67 % para a variação de 5 μ s a 8,33 μ s e de 11,10 % na variação de 8,33 μ s a 11,67 μ s.

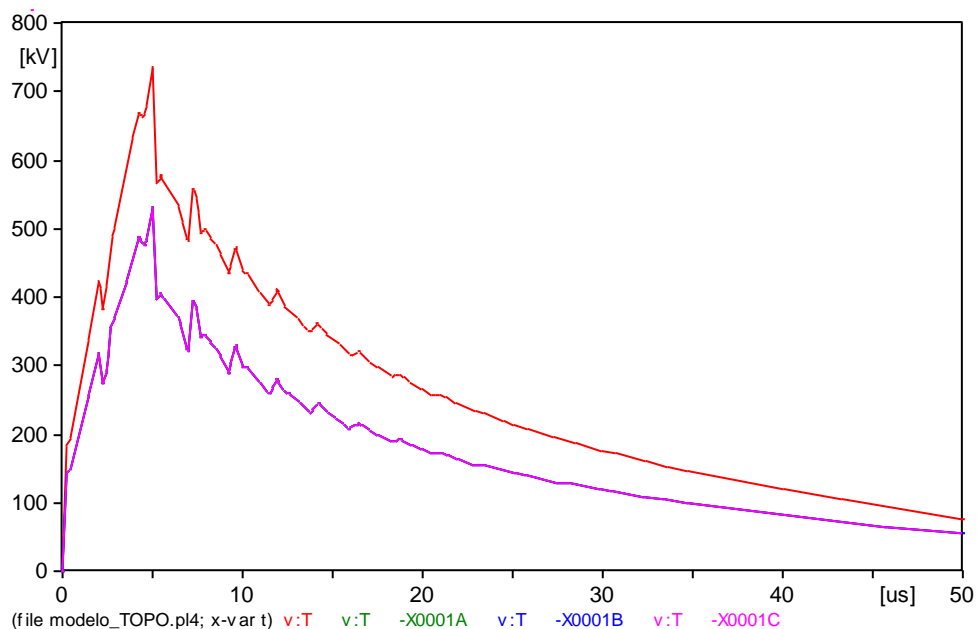


Figura 4-12 – Impedância de aterramento igual a 17 Ω e tempo de frente igual a 5 μ s sem para-raios

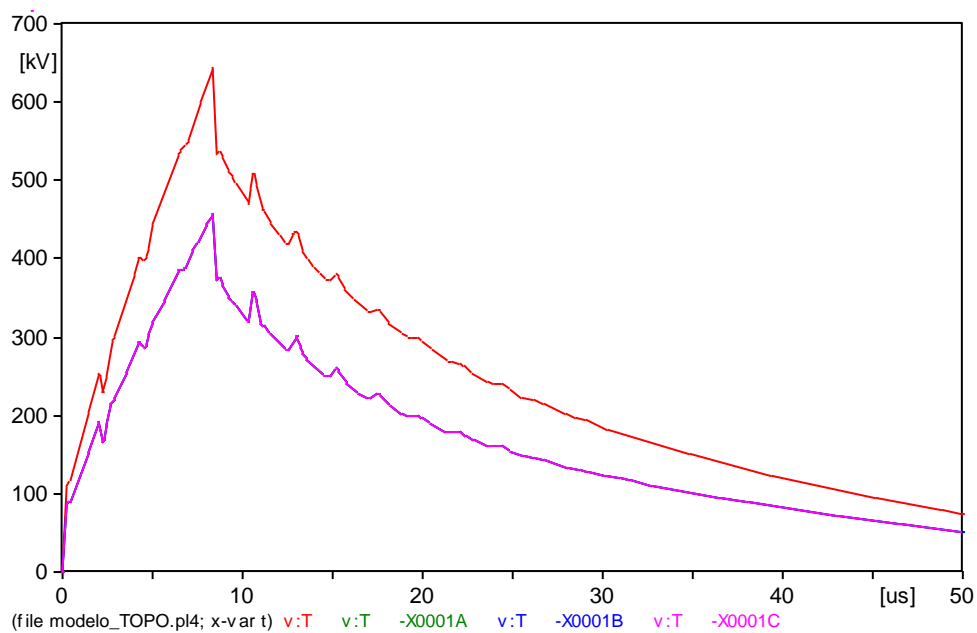


Figura 4-13 – Impedância de aterramento igual a 17Ω e tempo de frente igual a $8,33 \mu s$ sem para-raios

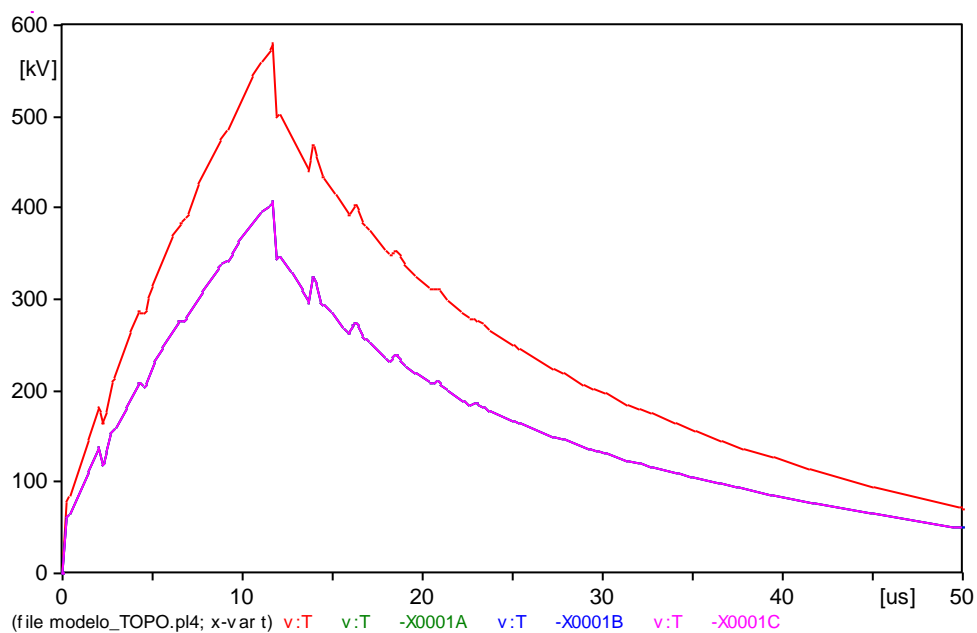


Figura 4-14 – Impedância de aterramento igual a 17Ω e tempo de frente igual a $11,67 \mu s$ sem para-raios

As Figuras 4-15 a 4-17 indicam os resultados para a simulação anterior, porém com a conexão do para-raios a uma das fases. Percebe-se o grampeamento da tensão na fase conectada ao para-raios e o valor da amplitude dessa tensão é aproximadamente da mesma ordem independentemente do valor assumido pelo tempo de frente. Por outro lado, as amplitudes das ondas incidentes no topo da torre e nas fases não conectadas ao para-raios apresenta uma redução com o aumento do tempo de frente.

De acordo com as Tabelas 4-9 a 4-11, observa-se que para os respectivos tempos de frentes mencionados anteriormente, a amplitude da tensão incidente no topo da torre sofre uma redução da ordem de 13 %. Além disso, as amplitudes das tensões que não estão conectadas ao para-raios correspondem a 470,26 kV, 414,60 kV e 374,47 kV para os respectivos tempos de frentes de 5 μ s, 8,33 μ s e 11,67 μ s. Portanto, percebe-se nitidamente a redução no valor da amplitude da tensão nas cadeias dos isoladores em virtude do aumento do tempo de frente.

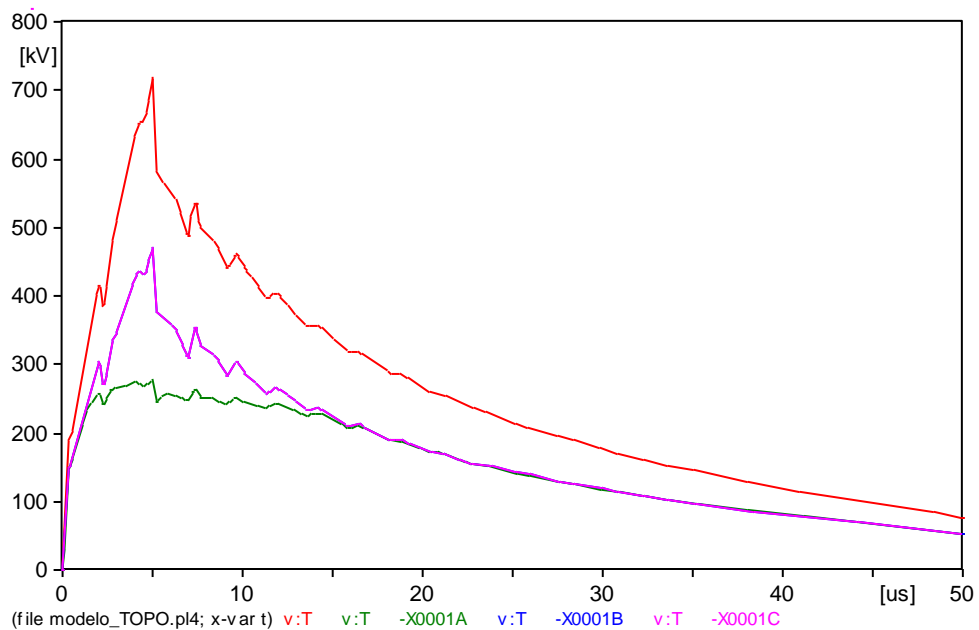


Figura 4-15 – Impedância de aterramento igual a 17 Ω e tempo de frente igual a 5 μ s com para-raios

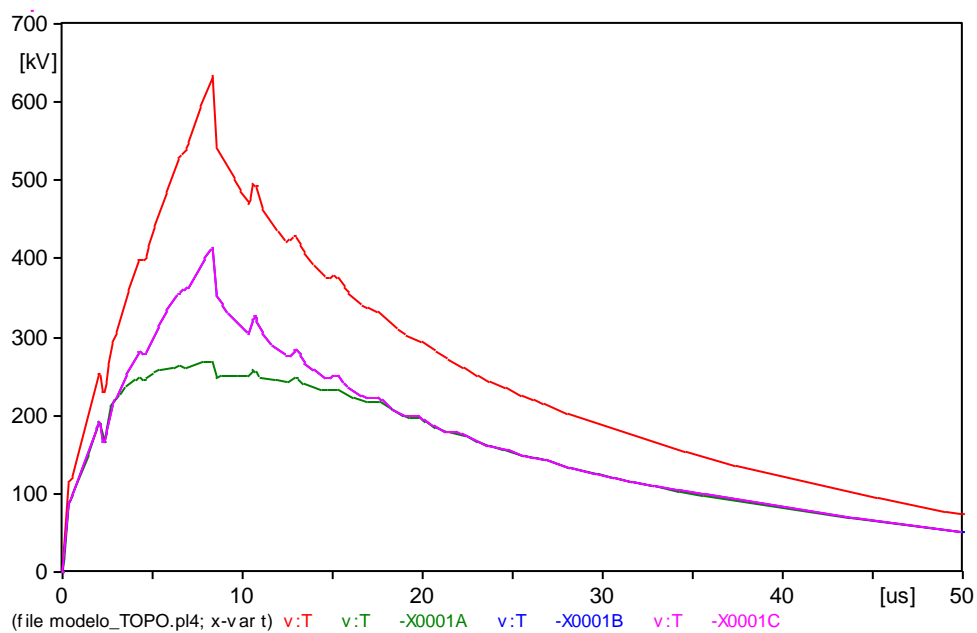


Figura 4-16 – Impedância de aterramento igual a 17 Ω e tempo de frente igual a 8,33 μ s com para-raios

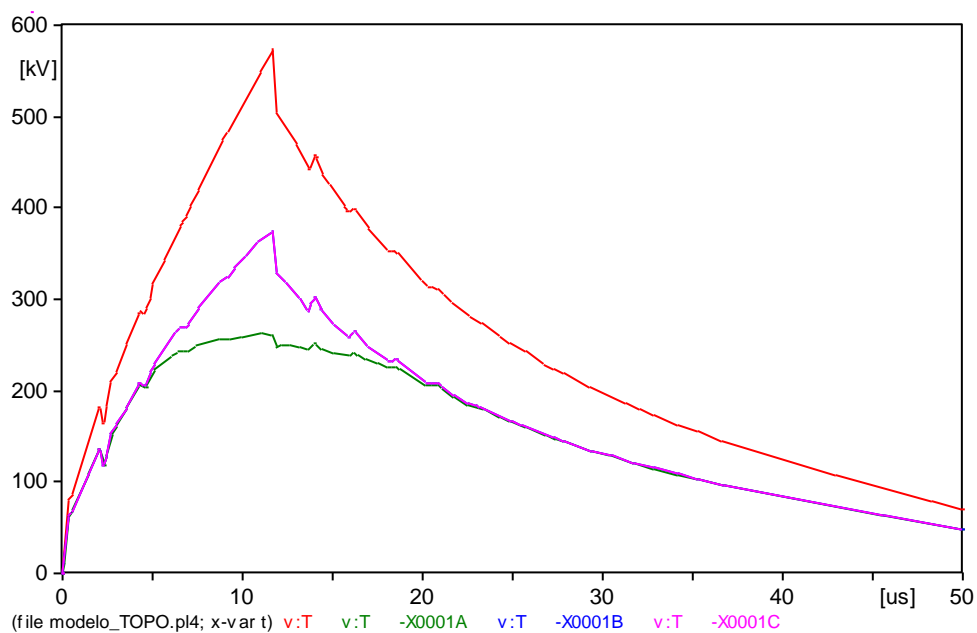


Figura 4-17 – Impedância de aterramento igual a 17 Ω e tempo de frente igual a 11,67 μ s com para-raios

Para um tempo de frente fixo nas Tabelas 4-9 a 4-11, nota-se que a presença do para-raios conectado a uma das fases ocasiona a diminuição das amplitudes nas tensões incidentes na torre e nas cadeias dos isoladores. Esse comportamento se repete para um número maior de para-raios conectado as fases. Outro aspecto interessante a destacar é que o menor tempo de frente corresponde a maior redução percentual na tensão da cadeia do isolador que não está conectada ao para-raios.

Tabela 4-9 – Resultados para as amplitudes das tensões para 5 μ s e impedância de aterramento igual a 17 Ω

Característica	Va (KV)	Vb (KV)	Vc (KV)	Vtorre (KV)
Sem Para-raios	530,47	530,47	530,47	736,23
Com Para-raios na Fase A	276,80	470,26	470,26	719,32
Com Para-raios na Fase A e B	272,03	272,03	431,63	709,00
Com Para-raios nas três Fases	268,77	268,77	268,77	702,15

Tabela 4-10 – Resultados para as amplitudes das tensões para 8,33 μ s e impedância de aterramento igual a 17 Ω

Característica	Va (kV)	Vb (kV)	Vc (KV)	Vtorre (kV)
Sem Para-raios	457,94	457,94	457,94	642,78
Com Para-raios na Fase A	268,47	414,60	414,60	633,30
Com Para-raios na Fase A e B	265,15	265,15	386,15	627,13
Com Para-raios nas três Fases	262,50	262,50	262,50	622,76

Tabela 4-11 – Resultados para as amplitudes das tensões para 11,67 μ s e impedância de aterramento igual a 17 Ω

Característica	Va (kV)	Vb (kV)	Vc (KV)	Vtorre (kV)
Sem Para-raios	407,10	407,10	407,10	579,30
Com Para-raios na Fase A	262,90	374,47	374,47	572,94
Com Para-raios na Fase A e B	260,03	260,03	352,80	568,78
Com Para-raios nas três Fases	257,70	257,70	257,70	565,80

4.3.1.2. Influência do aterramento

Essa parte da simulação apresenta o objetivo de avaliar a influencia do aterramento. Para isso, adota-se como constante o tempo de frente igual a 8 μ s e tempo de meia onda igual a 50 μ s. Além disso, realiza-se a simulação para a impedância de aterramento igual a respectivamente 10 Ω , 30 Ω e 50 Ω . A Figura 4-18 exemplifica a forma de onda incidente no topo da torre. Percebe-se que o pico da amplitude dessa onda equivale a 45 kA.

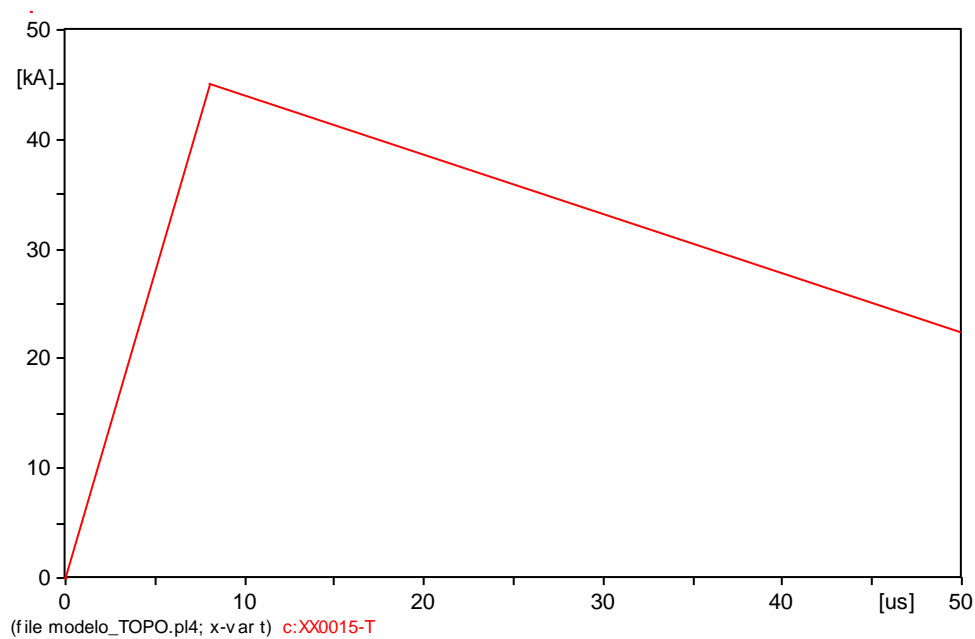


Figura 4-18– Forma de onda que representa a descarga atmosférica

As Figuras 4-19 a 4-21 referem aos resultados obtidos para os diferentes valores de aterramento mencionados anteriormente e as simulações foram realizadas na ausência da conexão do para-raios a uma das fases. Percebe-se que as ondas incidentes na torre e nas fases apresentam comportamento similar.

De acordo com os resultados indicados nas Tabelas 4-12 a 4-14, a tensão incidente na torre corresponde a 425,03 kV, 957,45 kV e 1335,7 kV para as respectivas impedâncias de aterramento 10 Ω , 30 Ω e 50 Ω . Dessa forma, pode-se concluir que a variação da impedância de aterramento de 10 Ω para 30 Ω resulta na elevação de 125,26 % na amplitude da tensão incidente na torre. Para a variação de 30 Ω para 50 Ω , percebe-se um aumento relativo da ordem de 40 % na tensão incidente da torre.

Outro aspecto interessante a destacar consiste no pico das tensões incidentes na cadeia dos isoladores. Percebe-se que o aumento da impedância de aterramento ocasiona um incremento na tensão das cadeias dos isoladores nas fases.

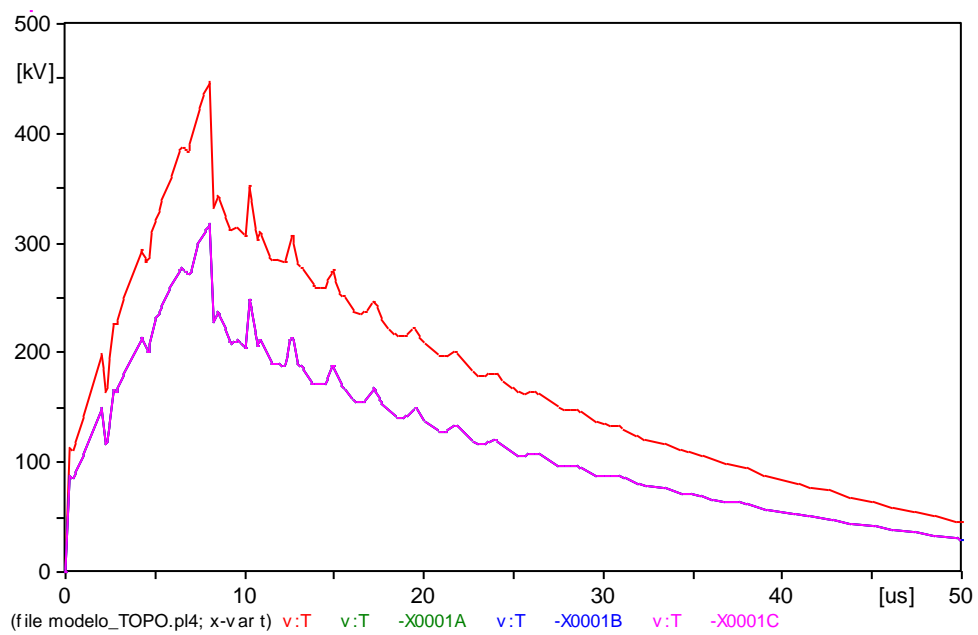


Figura 4-19 – Impedância de aterramento igual a 10 Ω e tempo de frente igual a 8 μ s sem para-raios

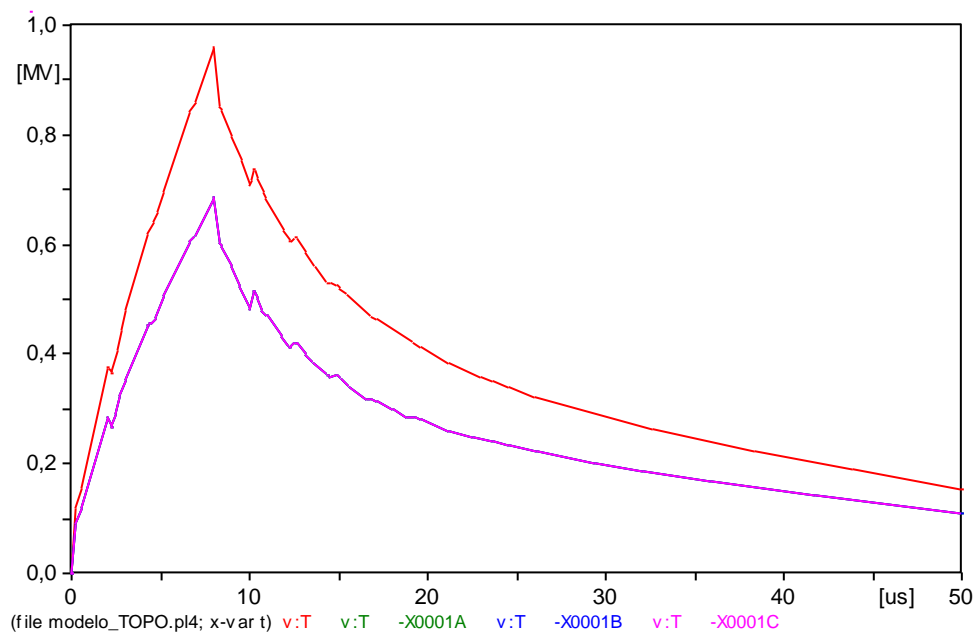


Figura 4-20 – Impedância de aterramento igual a 30 Ω e tempo de frente igual a 8 μ s sem para-raios

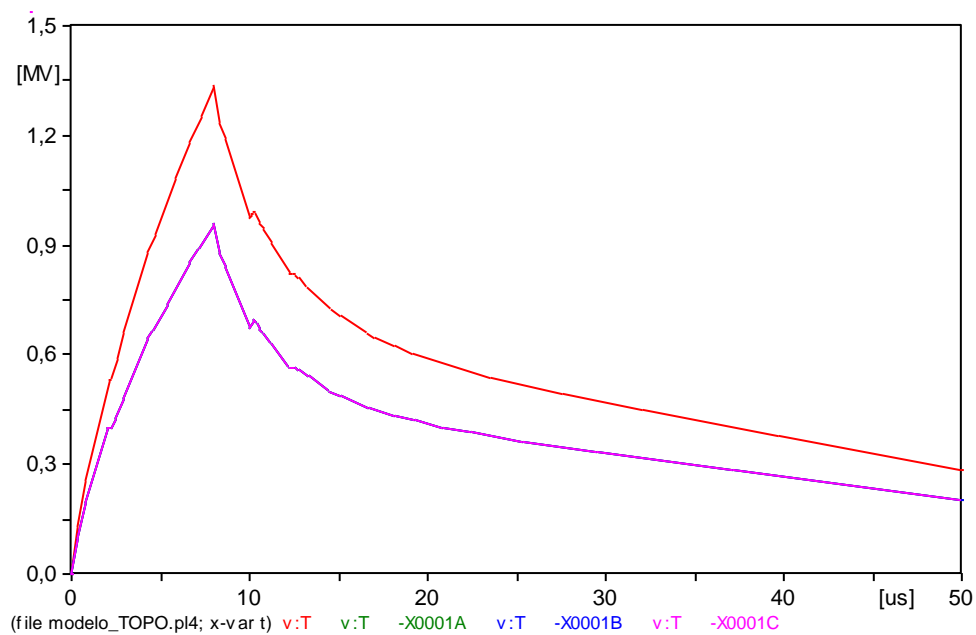


Figura 4-21 – Impedância de aterramento igual a 50 Ω e tempo de frente igual a 8 μ s sem para-raios

A Figura 4-22 a 4-24 refere à simulação anterior, porém com a conexão do para-raios a uma das fases. A presença dessa conexão provoca o grampeamento da tensão na cadeia de isoladores dessa fase. Além disso, percebe-se que o valor da tensão grampeada apresenta uma variação da ordem de 15 % para a variação de 10 Ω para 30 Ω e de 5 % para a variação de 30 Ω para 50 Ω . Com o aumento do valor da impedância de aterramento, verifica-se que as amplitudes das tensões incidentes no topo da torre e cadeia de isoladores sofre uma elevação. Além disso, a presença do dispositivo para-raios provoca uma menor amplitude nas tensões sobre a cadeia de isoladores em relação aos valores obtidos na ausência da conexão do dispositivo.

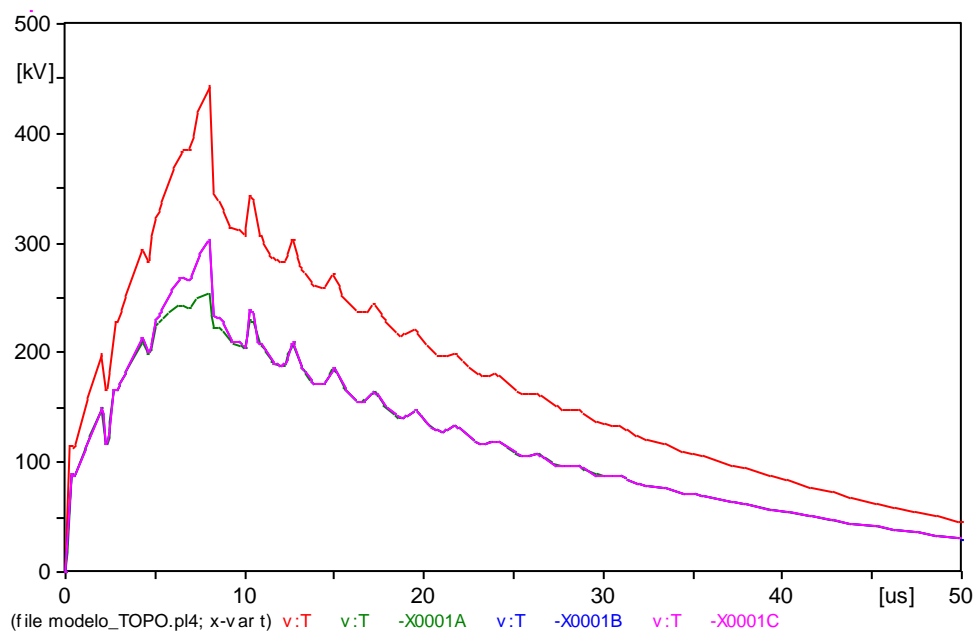


Figura 4-22 – Impedância de aterramento igual a 10 Ω e tempo de frente igual a 8 μ s com para-raios

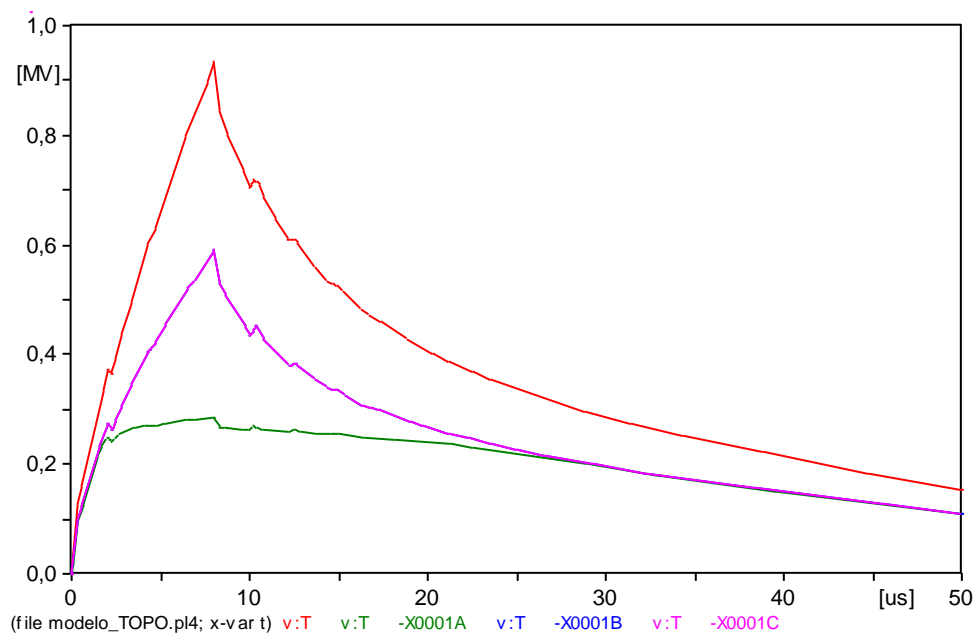


Figura 4-23 – Impedância de aterramento igual a 30 Ω e tempo de frente igual a 8 μ s com para-raios

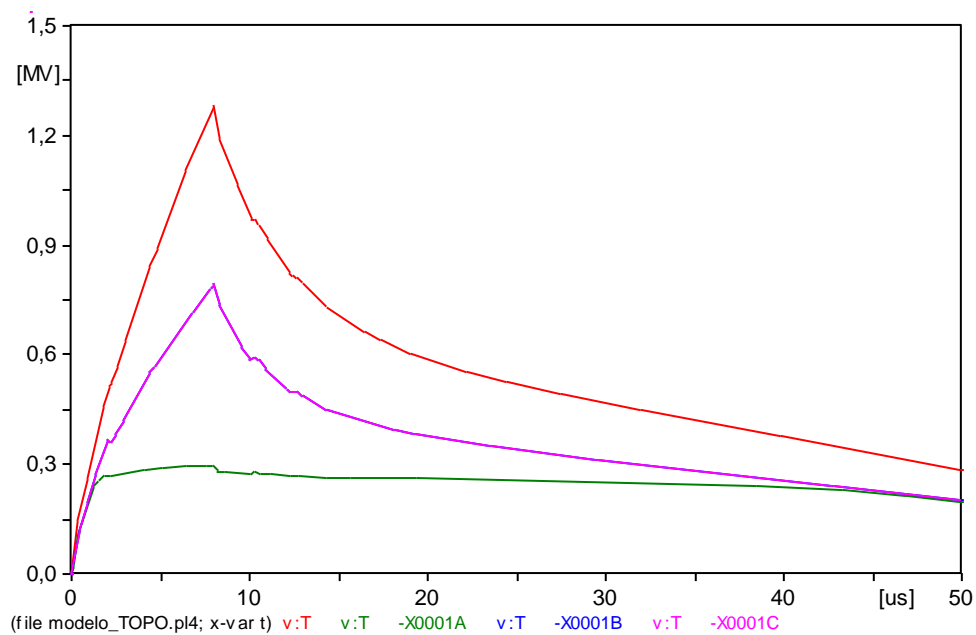


Figura 4-24 – Impedância de aterramento igual a 50 Ω e tempo de frente igual a 8 μ s com para-raios

De acordo com as Tabelas 4-12 a 4-14, percebe-se que para um determinado valor de impedância fixa a presença do para-raios ocasiona a diminuição das tensões sobre a cadeia de isoladores e na torre. Além disso, para a condição anterior, a presença de dois ou mais dispositivos para-raios não ocasiona alterações significativas no topo da torre.

Tabela 4-12 – Resultados para as amplitudes das tensões para impedância de aterramento de 10 Ω

Característica	Va (kV)	Vb (kV)	Vc (kV)	Vtorre (kV)
Sem Para-raios	300,58	300,58	300,58	425,03
Com Para-raios na Fase A	248,08	290,63	290,63	425,65
Com Para-raios na Fase A e B	246,40	246,40	283,09	425,68
Com Para-raios nas três Fases	244,89	244,89	244,89	425,53

Tabela 4-13 – Resultados para as amplitudes das tensões para impedância de aterramento de 30 Ω

Característica	Va (kV)	Vb (kV)	Vc (kV)	Vtorre (kV)
Sem Para-raios	684,35	684,35	684,35	957,45
Com Para-raios na Fase A	285,33	588,63	588,63	930,85
Com Para-raios na Fase A e B	279,54	279,54	527,79	914,05
Com Para-raios nas três Fases	274,96	274,96	274,96	902,3

Tabela 4-14 – Resultados para as amplitudes das tensões para impedância de aterramento de 50 Ω

Característica	Va (kV)	Vb (kV)	Vc (kV)	Vtorre (kV)
Sem Para-raios	958,65	958,65	958,65	1335,7
Com Para-raios na Fase A	296,81	791,23	791,23	1277,5
Com Para-raios na Fase A e B	291,76	291,76	689,45	1242,3
Com Para-raios nas três Fases	287,15	287,15	287,15	1218,4

4.3.2. Incidência no cabo de blindagem (no meio do vão)

Essa segunda etapa da simulação, realiza-se a descarga atmosférica no cabo de blindagem exatamente no meio do vão. Além disso, a descarga elétrica contínua sendo modelada por uma onda de corrente triangular de pico de 45 kA. Este valor corresponde ao valor mediano de descargas elétricas medidas no Morro do Cachimbo – MG. Também, cabe salientar que o tempo de meia onda será de 50 μ s [22]. Também, cabe mencionar que serão utilizados os tempos de frentes 5 μ s, 8,33 μ s e 11,67 μ s já definidos para a incidência da descarga atmosférica no topo da torre.

4.3.2.1. Influência do tempo de frente

As Figuras 4-25 a 4-27 indica que as ondas de tensões incidentes na torre adjacente a incidência da descarga atmosférica e as ondas incidentes nas cadeias dos isoladores apresentam comportamento similar para a simulação. Além disso, as Tabelas 4-15 a 4-17 indica que as tensões incidentes nas cadeias de isoladores correspondem a 316,33 kV, 311,78 kV e 298,99 kV para os respectivos tempos de frentes de 5 μ s, 8,33 μ s e 11,67 μ s. Portanto, para qualquer variação dos tempos de frentes especificados a variação na cadeia de isoladores é menor que 6 %.

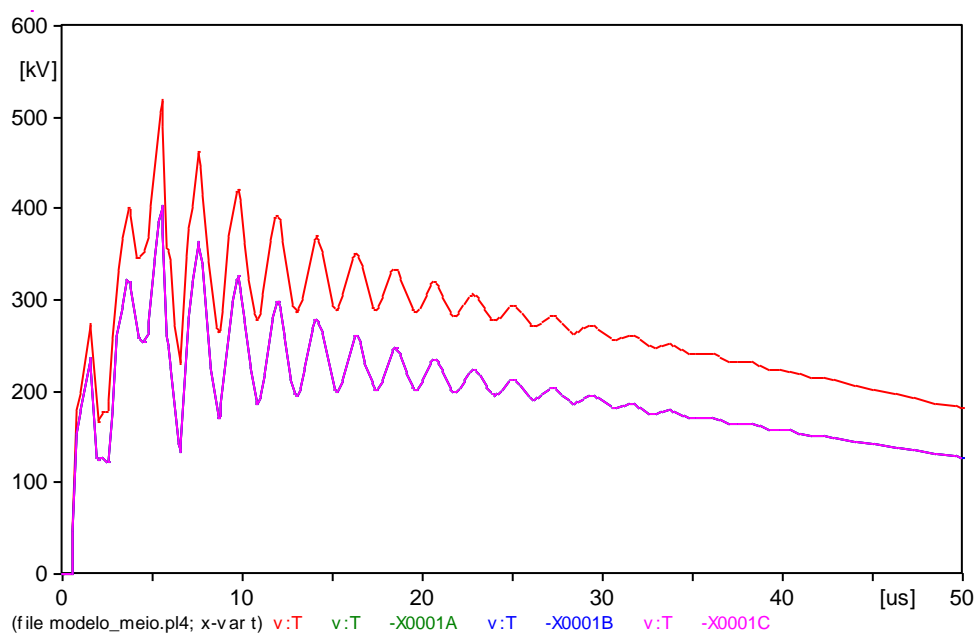


Figura 4-25 – Impedância de aterramento igual a 17 Ω e tempo de frente igual a 5 μ s sem para-raios

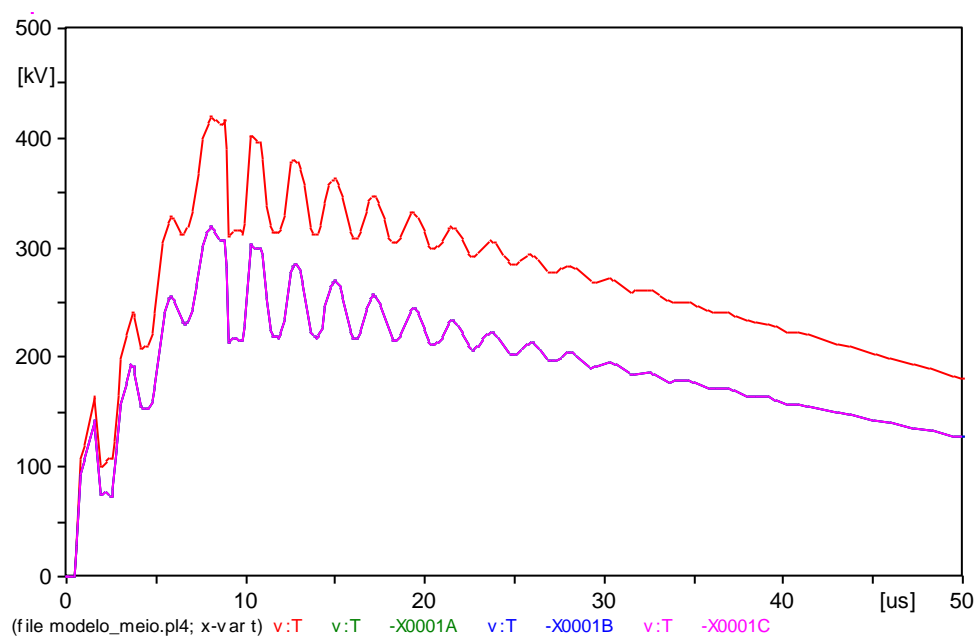


Figura 4-26 – Impedância de aterramento igual a 17 Ω e tempo de frente igual a 8,33 μ s sem para-raios

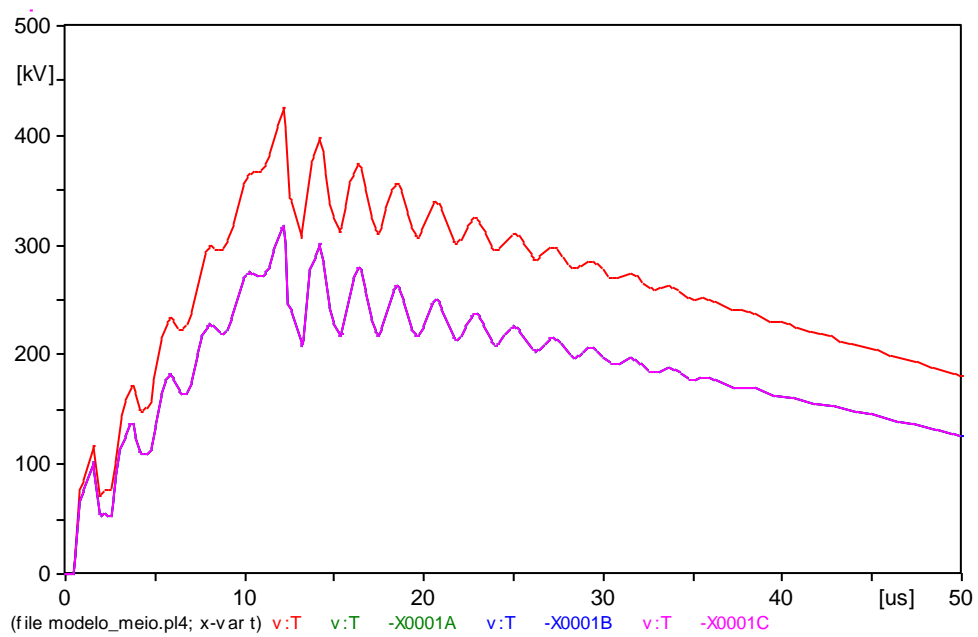


Figura 4-27 – Impedância de aterramento igual a 17Ω e tempo de frente igual a $11,67 \mu s$ sem para-raios

As Figuras 4-28 a 4-30 refere aos resultados obtidos para a simulação anterior, porém com a conexão do para-raios conectado a uma das fases. Nota-se que a tensão da fase conectada ao para-raios sofre um grampeamento. Além disso, a presença do para-raios provoca à redução da amplitude dos picos das tensões incidentes na torre adjacente e nas cadeias dos isoladores em comparação a magnitude dessas tensões na ausência do dispositivo para-raios.

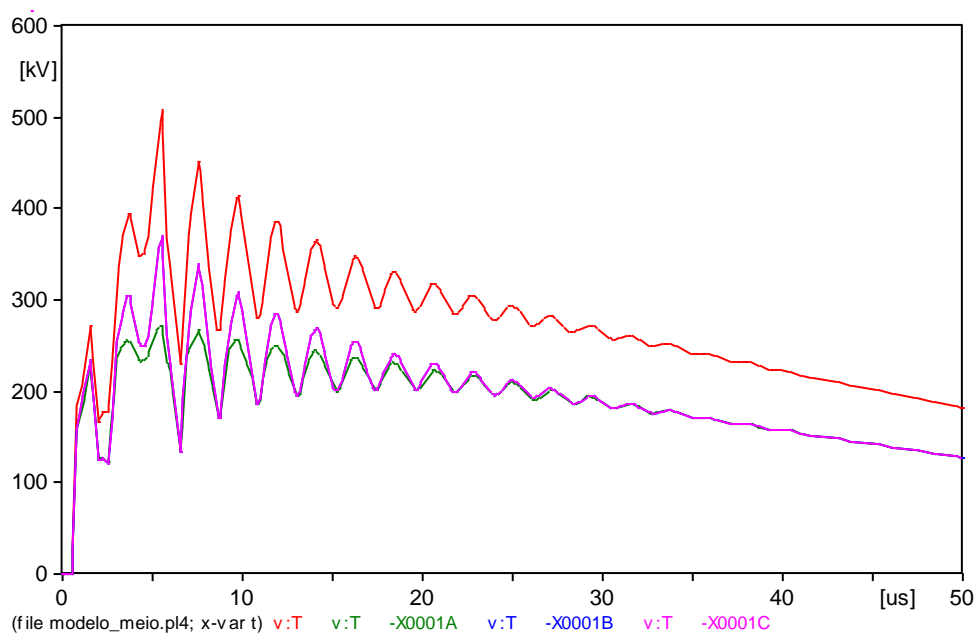


Figura 4-28 – Impedância de aterramento igual a 17 Ω e tempo de frente igual a 5 μ s com para-raios

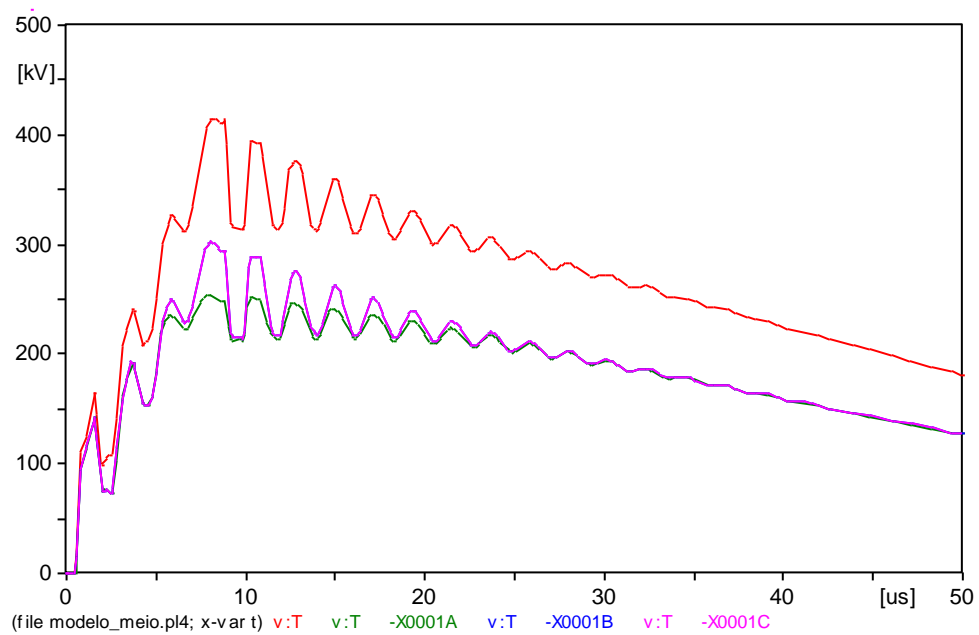


Figura 4-29 – Impedância de aterramento igual a 17 Ω e tempo de frente igual a 8,33 μ s com para-raios

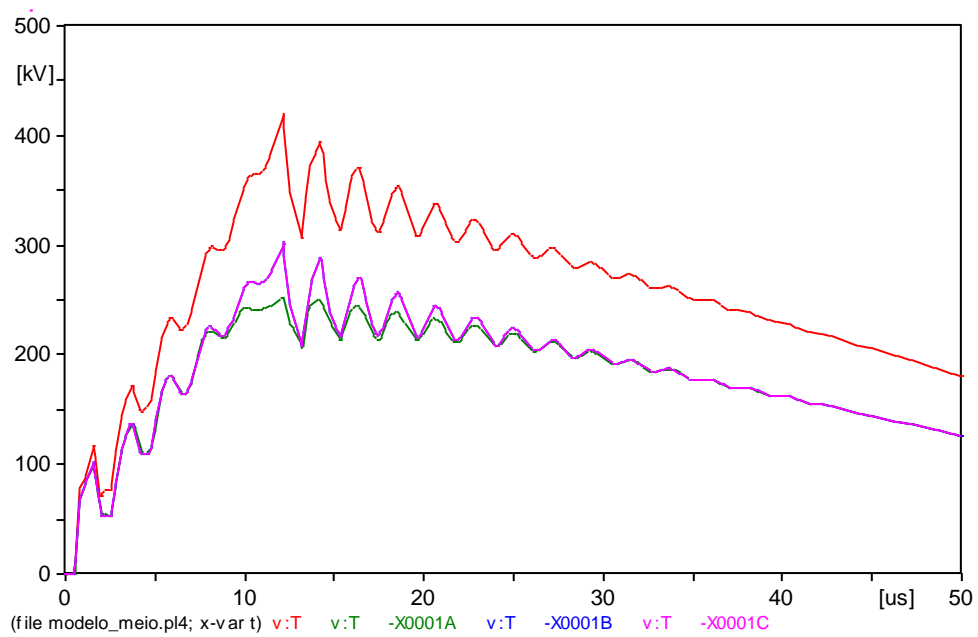


Figura 4-30 – Impedância de aterramento igual a 17Ω e tempo de frente igual a $11,67 \mu\text{s}$ com para-raios

De acordo com os resultados obtidos nas Tabelas 4-15 a 4-17, fixando um valor do tempo de frente, percebe-se que a presença do equipamento para-raios promove a redução dos picos das tensões incidentes na torre adjacente e nas cadeias de isoladores. Além disso, a conexão de dois ou mais para-raios não resulta em alterações significativas no valor da tensão incidente no topo da torre adjacente.

Tabela 4-15 – Resultados para as amplitudes das tensões para tempo de frente igual a 5,0 μ s

Característica	Va (kV)	Vb (kV)	Vc (KV)	Vtorre (kV)
Sem Para-raios	316,33	316,33	316,33	424,27
Com Para-raios na Fase A	255,18	298,79	298,79	415,01
Com Para-raios na Fase A e B	251,26	251,26	287,46	409,28
Com Para-raios nas três Fases	249,40	249,40	249,40	409,31

Tabela 4-16 – Resultados para as amplitudes das tensões para tempo de frente igual a 8,33 μ s

Característica	Va (kV)	Vb (kV)	Vc (KV)	Vtorre (kV)
Sem Para-raios	311,78	311,78	311,78	415,26
Com Para-raios na Fase A	250,08	298,10	298,10	412,71
Com Para-raios na Fase A e B	247,88	247,88	288,53	410,84
Com Para-raios nas três Fases	246,04	246,04	246,04	409,42

Tabela 4-17 – Resultados para as amplitudes das tensões para tempo de frente igual a 11,67 μ s

Característica	Va (kV)	Vb (kV)	Vc (KV)	Vtorre (kV)
Sem Para-raios	298,99	298,99	298,99	402,51
Com Para-raios na Fase A	249,13	286,88	286,88	398,61
Com Para-raios na Fase A e B	246,49	246,49	278,51	395,99
Com Para-raios nas três Fases	244,37	244,37	244,37	394,08

4.3.2.2. Influência do aterramento

Essa parte da simulação apresenta como objetivo avaliar a resposta do para-raios em linha de transmissão frente a descargas atmosféricas. A partir disso, avalia-se a influencia do aterramento da torre da linha de transmissão. Para isso, realiza-se a simulação com uma onda incidente que apresenta o tempo de frente constante é igual a 8 μ s. Além disso, cabe mencionar que a referida onda apresenta amplitude de 45 kA e tempo de meia onda de 50 μ s.

As Figuras 4-31 a 4-33 indica os resultados para a simulação caracterizada pela incidência da descarga atmosférica no meio do vão. Esses gráficos indicam a realização da simulação na ausência de para-raios conectado a uma das fases. Com o aumento da

impedância de aterramento, nota-se que ocorre uma elevação da amplitude da tensão incidente na torre adjacente e principalmente nas cadeias de isoladores das fases.

De acordo com as Tabelas 4-18 a 4-20, a amplitude das tensões incidentes nas cadeias de isoladores correspondem a 225,57 kV, 521,85 kV e 768,69 kV para as respectivas impedâncias de aterramento de 10 Ω , 30 Ω e 50 Ω . Dessa forma, pode-se concluir que na variação da impedância de aterramento de 10 Ω a 50 Ω ocasiona uma elevação de 131,35 % na tensão incidente na fase. Além disso, a variação de 30 Ω a 50 Ω promove a elevação nessa tensão de 47,30 %.

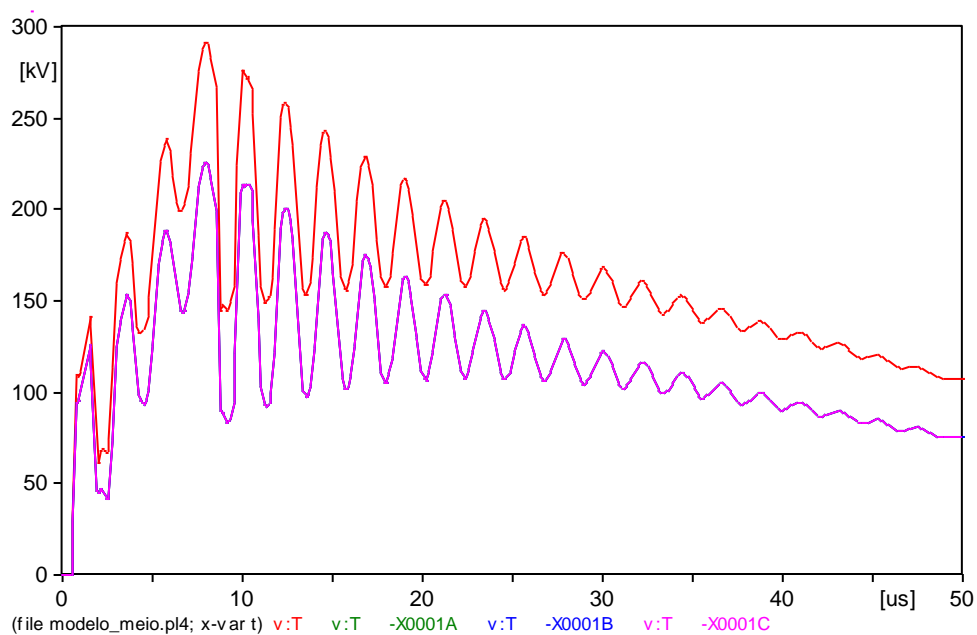


Figura 4-31 – Impedância de aterramento igual a 10 Ω e tempo de frente igual a 8,0 μ s sem para-raios

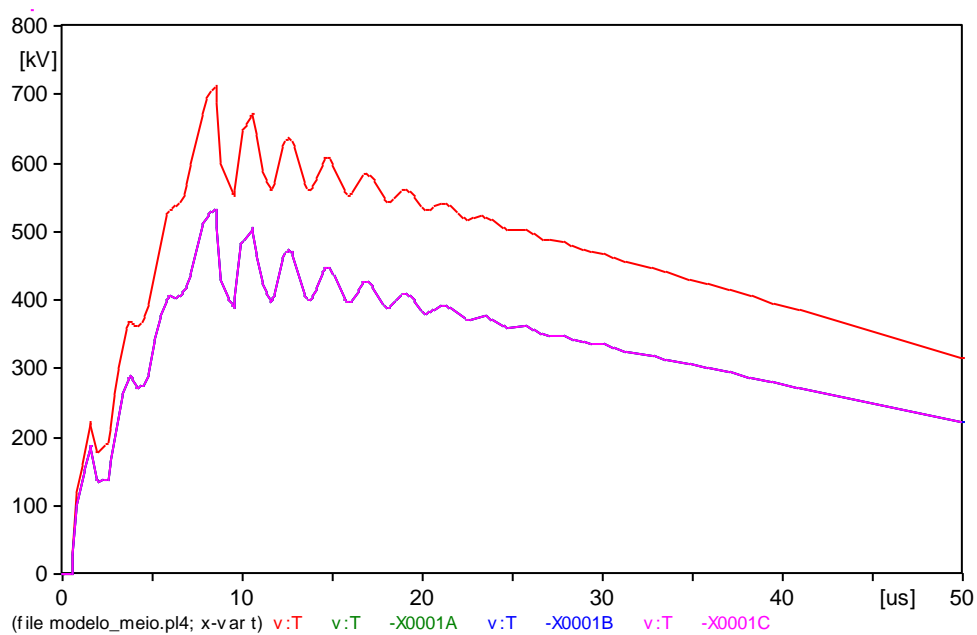


Figura 4-32 – Impedância de aterramento igual a 30 Ω e tempo de frente igual a 8,0 μ s sem para-raios

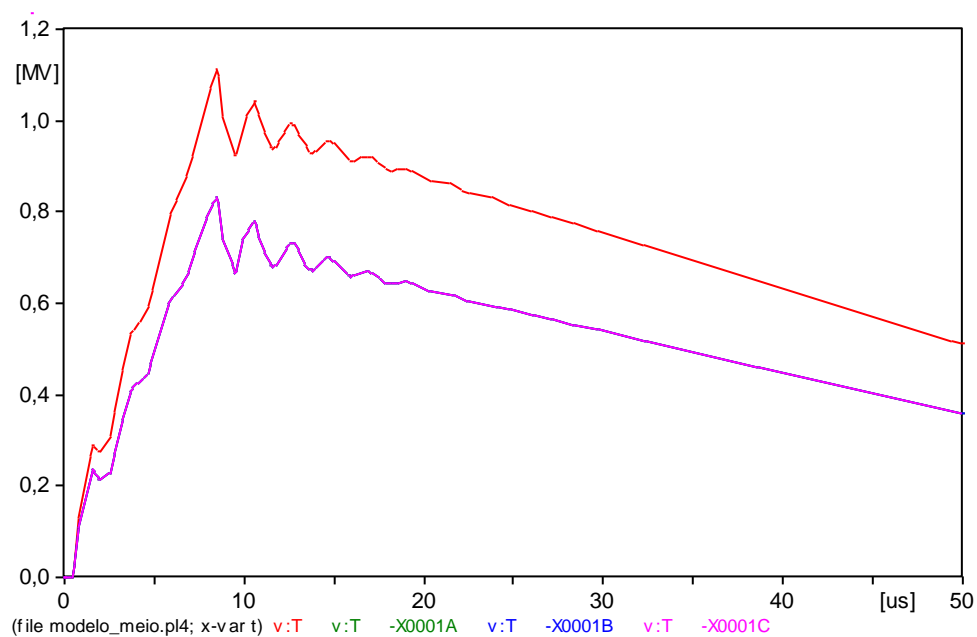


Figura 4-33 – Impedância de aterramento igual a 50 Ω e tempo de frente igual a 8,0 μ s sem para-raios

As Figuras 4-34 a 4-36 indicam os resultados para a simulação anterior, porém com a presença do para-raios conectados a uma das fases. A consequência dessa ligação é o grampeamento da tensão incidente da cadeia de isoladores da fase conectado ao dispositivo para-raios. De acordo com as Tabelas 4-18 a 4-20, percebe-se que a maior redução na cadeia de isoladores ocorre para a impedância de aterramento de 50 Ω . Além disso, essa redução é da ordem de 62 %. Outro aspecto a destacar é que a presença da conexão do para-raios ocasiona

a diminuição nas amplitudes das tensões incidentes na torre adjacente à incidência da descarga e nas cadeias de isoladores independentemente do valor da impedância de aterramento.

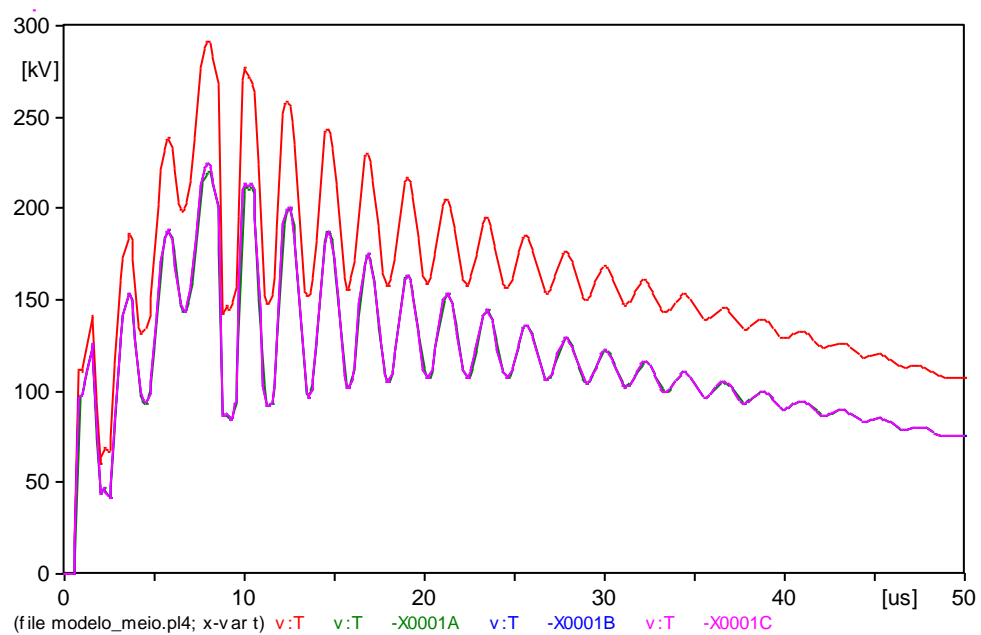


Figura 4-34 – Impedância de aterramento igual a 10 Ω e tempo de frente igual a 8,0 μ s com para-raios

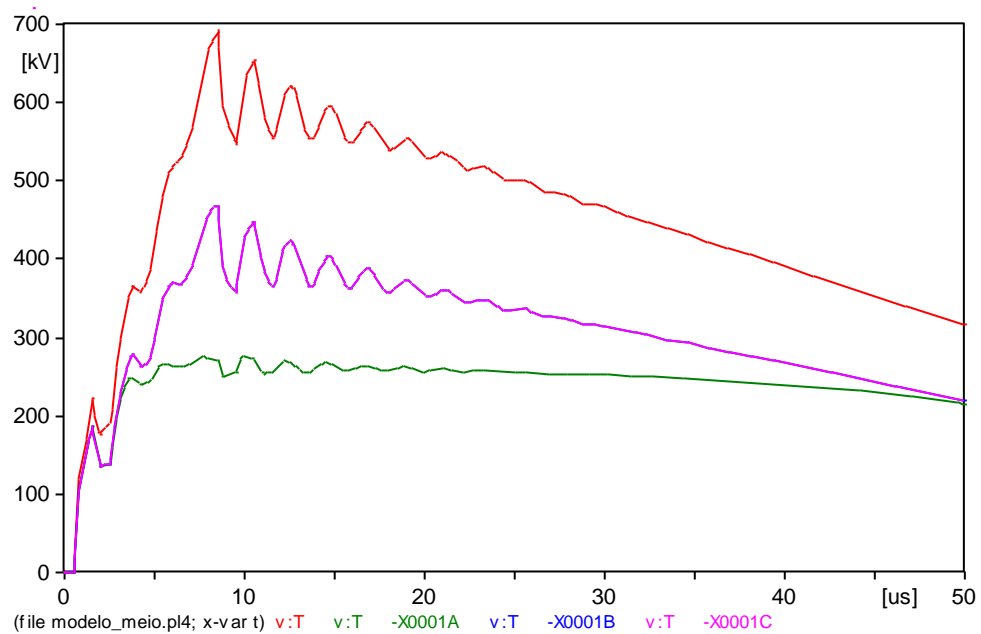


Figura 4-35 – Impedância de aterramento igual a 30 Ω e tempo de frente igual a 8,0 μ s com para-raios

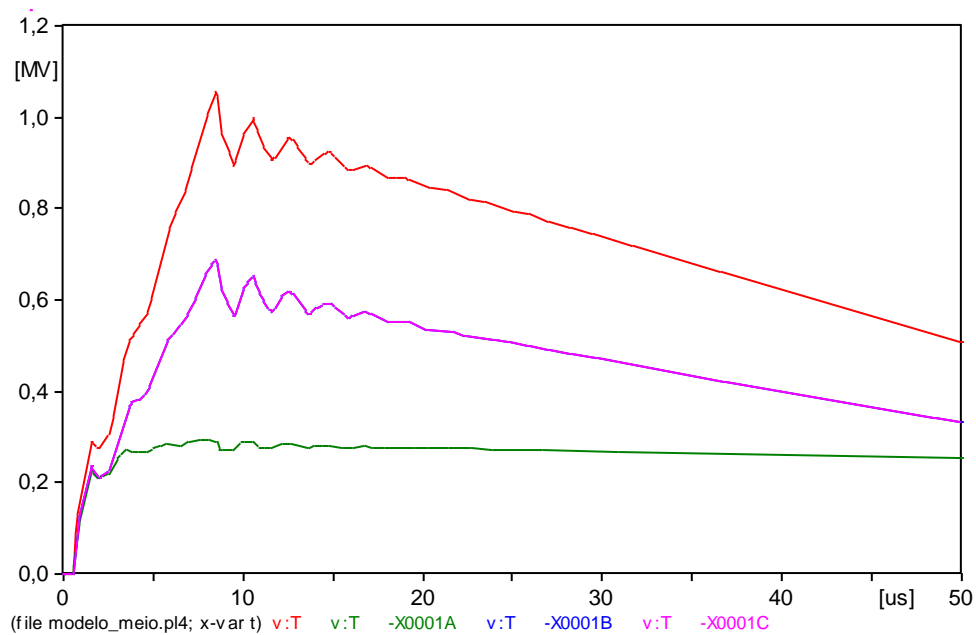


Figura 4-36 – Impedância de aterramento igual a 50 Ω e tempo de frente igual a 8,0 μ s com para-raios

Tabela 4-18 – Resultados para as amplitudes das tensões para impedância de aterramento de 10 Ω

Característica	Va (kV)	Vb (kV)	Vc (KV)	Vtorre (kV)
Sem Para-raios	225,57	225,57	225,57	291,86
Com Para-raios na Fase A	220,05	224,19	224,19	291,39
Com Para-raios na Fase A e B	219,14	219,14	223,00	291,00
Com Para-raios nas três Fases	218,35	218,35	218,35	290,67

Tabela 4-19 – Resultados para as amplitudes das tensões para impedância de aterramento de 30 Ω

Característica	Va (kV)	Vb (kV)	Vc (KV)	Vtorre (kV)
Sem Para-raios	521,85	521,85	521,85	691,61
Com Para-raios na Fase A	274,72	460,01	460,01	670,23
Com Para-raios na Fase A e B	270,37	270,37	421,21	656,90
Com Para-raios nas três Fases	267,14	267,14	267,14	647,79

Tabela 4-20 – Resultados para as amplitudes das tensões para impedância de aterramento de 50 Ω

Característica	Va (kV)	Vb (kV)	Vc (KV)	Vtorre (kV)
Sem Para-raios	798,69	798,69	798,69	1063,80
Com Para-raios na Fase A	293,53	663,52	663,52	1006,40
Com Para-raios na Fase A e B	286,32	286,32	582,43	972,18
Com Para-raios nas três Fases	280,73	280,73	280,73	956,23

4.3.3. Incidência direta no cabo fase

Essa simulação consiste na incidência de uma onda de descarga atmosférica de amplitude igual a 5 kA diretamente no cabo fase. Esse valor de amplitude para a onda de corrente é capaz de romper a blindagem do cabo para-raios. Acrescenta-se que o tempo de meia onda equivale a 20 μ s que é aproximadamente o valor obtido para as descargas subsequentes [22]. Essa descarga atmosférica será modelada através de uma onda triangular. Por fim, cabe destacar que o objetivo inicial é avaliar a influencia do tempo de frente, para isso os tempos de frentes sofrem variações, porém a impedância de aterramento é constante.

4.3.3.1. Influência do tempo de frente

O tempo de frente foi estimado para os valores correspondentes a 20%, 50% e 80% a partir da curva 1 na Figura 4-9. Os valores de tempo correspondentes a essas porcentagens devem ser divididos pelo fator 0,6 com a finalidade de obter o tempo de frente. Os resultados estão representados na Tabela 4-21.

Tabela 4-21 –Resultados para a estimação do tempo de frente

Porcentagem(%)	Tempo de frente [μ s]
20	0,50
50	1,17
80	2,00

As Figuras 4-37 a 4-39 ilustra os resultados obtidos para a simulação descrita anteriormente. Percebe-se que a ocorrência da incidência direta em uma das fases promove o aparecimento de uma sobretensão nas outras fases. De acordo com as Tabelas 4-22 a 4-24, percebe-se que a maior variação na amplitude da tensão incidente a fase submetida à descarga é da ordem de 6 %. Para esse mesmo intervalo, pode-se concluir que a amplitude das tensões incidentes nas cadeias dos outros isoladores não submetidos à incidência direta da descarga varia na ordem de 21 %.

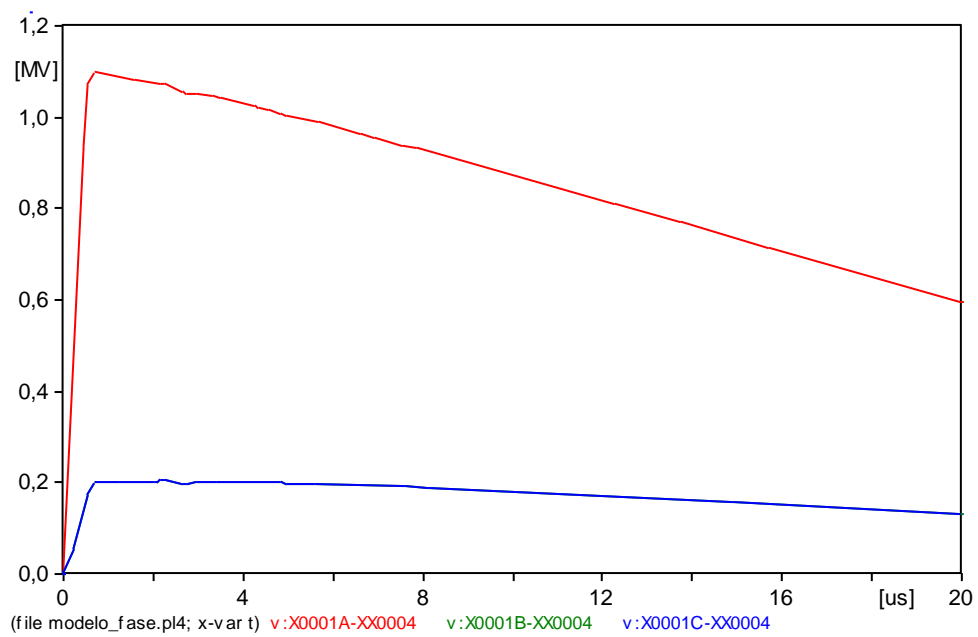


Figura 4-37 – Impedância de aterramento igual a 17 Ω e tempo de frente igual a 0,50 μ s sem para-raios

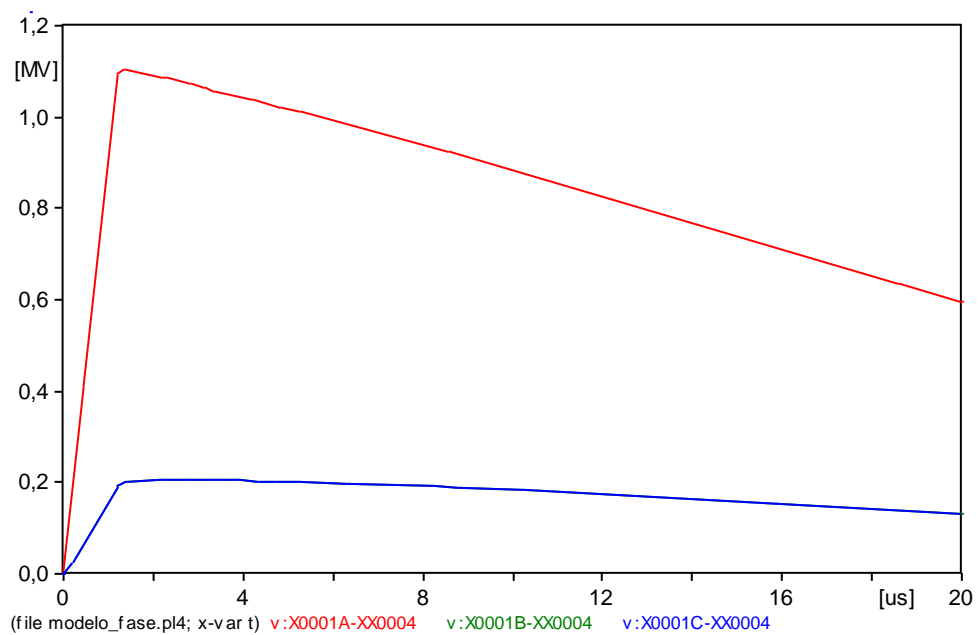


Figura 4-38 – Impedância de aterramento igual a 17 Ω e tempo de frente igual a 1,17 μ s sem para-raios

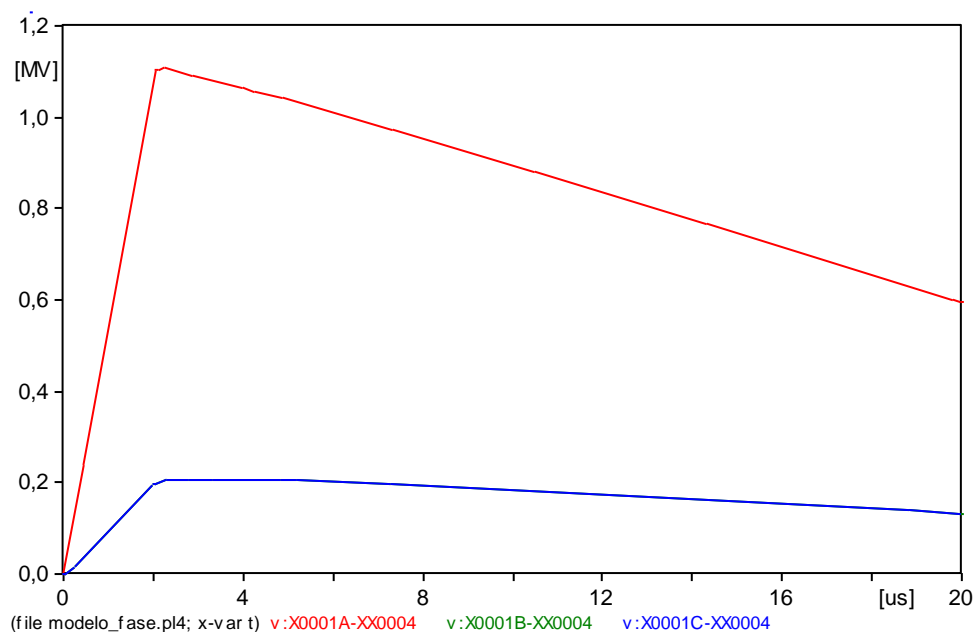


Figura 4-39 – Impedância de aterramento igual a 17Ω e tempo de frente igual a $2,0 \mu\text{s}$ sem para-raios

As Figuras 4-40 a 4-42 indicam os resultados obtidos para a simulação anterior, porém com a conexão do para-raios a uma das fases. A presença do para-raios resulta na diminuição da tensão na cadeia de isoladores conectada a fase submetida à incidência da descarga atmosférica. Além disso, ocorre simultaneamente a diminuição das tensões incidentes nas demais cadeias de isoladores.

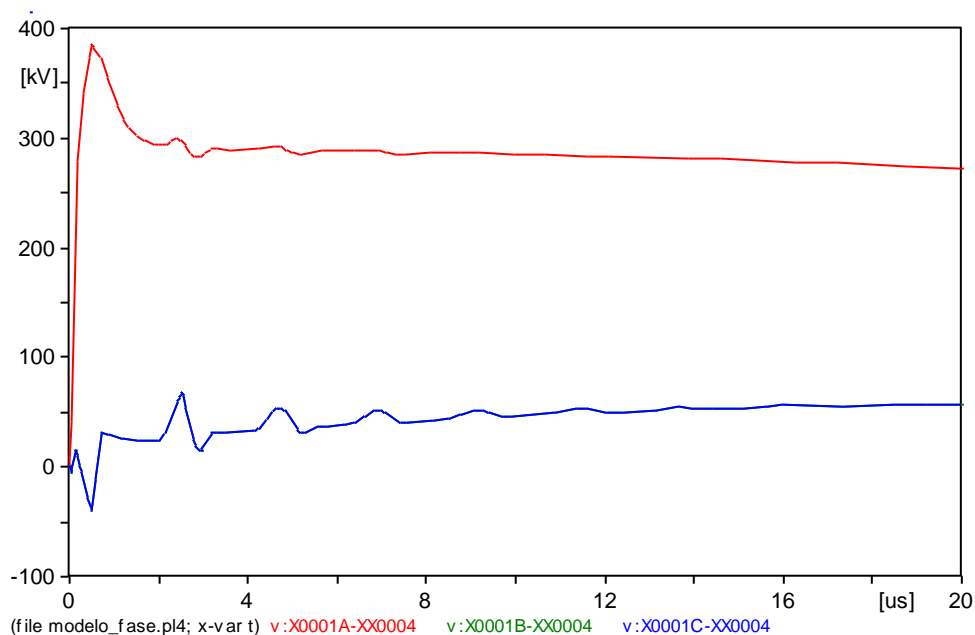


Figura 4-40 – Impedância de aterramento igual a 17Ω e tempo de frente igual a $0,50 \mu\text{s}$ com para-raios

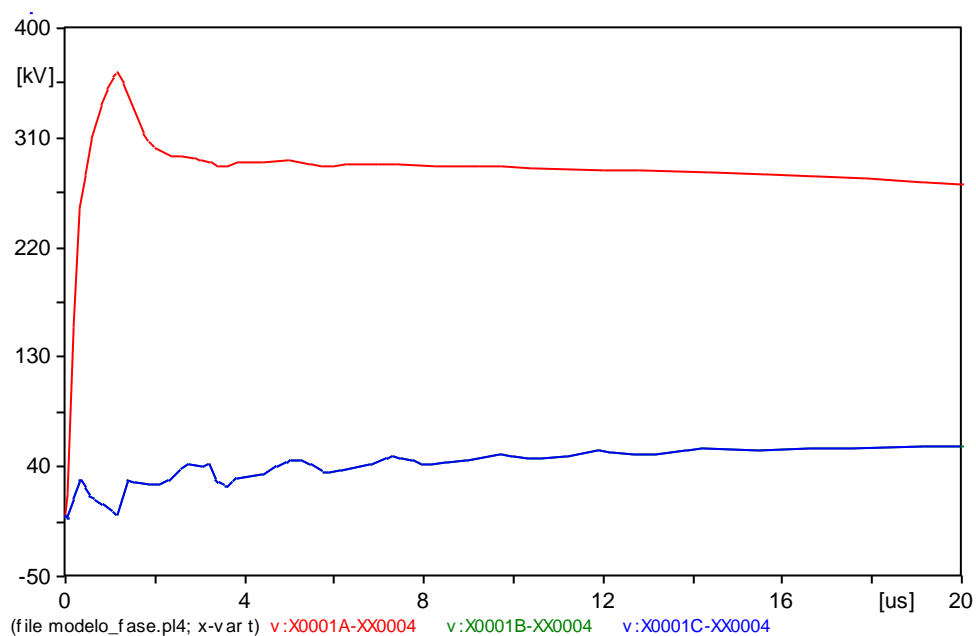


Figura 4-41 – Impedância de aterramento igual a 17 Ω e tempo de frente igual a 1,17 μ s com para-raios

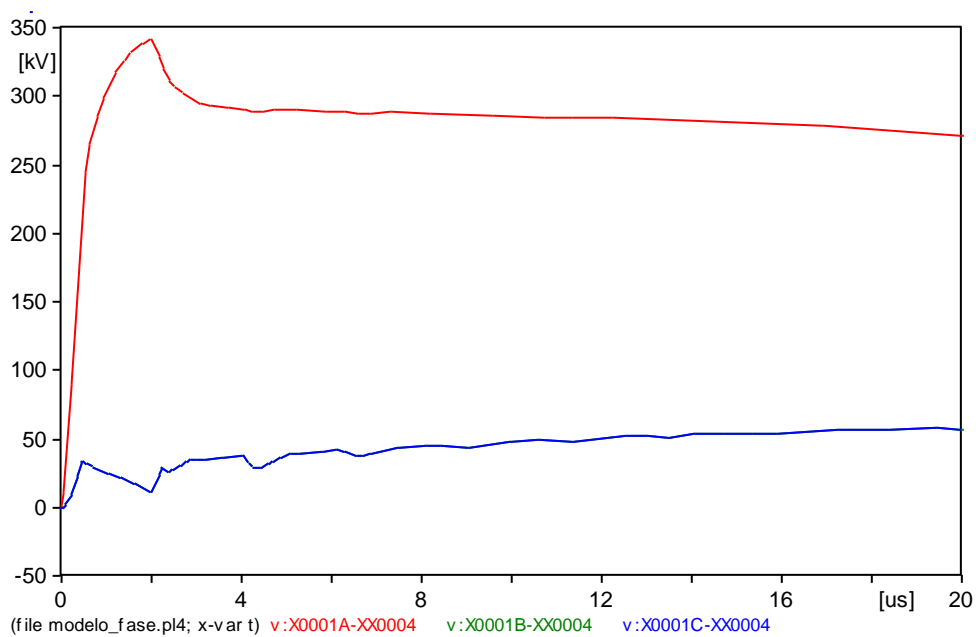


Figura 4-42 – Impedância de aterramento igual a 17 Ω e tempo de frente igual a 2,0 μ s com para-raios

As Tabelas 4-22 a 4-24 refletem que a conexão de um para-raios a uma das fases é essencial para a redução das tensões incidentes diretamente na fase e nas demais cadeias de

isoladores. Por outro lado, nota-se que a conexão de dois ou mais para-raios não promove mudanças significativas nas tensões das cadeias de isoladores.

Tabela 4-22 – Resultados para impedância de aterramento de 17 Ω e tempo de frente igual a 0,5 μ s

Característica	Va (kV)	Vb (kV)	Vc (KV)
Sem Para-raios	1048	162,97	162,97
Com Para-raios na Fase A	384,01	38,485	38,495
Com Para-raios na Fase A e B	383,99	36,665	38,281
Com Para-raios nas três Fases	383,99	36,396	36,396

Tabela 4-23 – Resultados para impedância de aterramento de 17 Ω e tempo de frente igual a 1,17 μ s

Característica	Va (kV)	Vb (kV)	Vc (KV)
Sem Para-raios	1082,1	185,64	185,64
Com Para-raios na Fase A	364,13	0,6	0,6
Com Para-raios na Fase A e B	364,13	1,17	1,17
Com Para-raios nas três Fases	364,14	0,13	0,13

Tabela 4-24 – Resultados para impedância de aterramento de 17 Ω e tempo de frente igual a 2,00 μ s

Característica	Va (kV)	Vb (kV)	Vc (KV)
Sem Para-raios	1101,6	196,46	196,46
Com Para-raios na Fase A	341,71	10,93	10,93
Com Para-raios na Fase A e B	341,71	11,25	10,99
Com Para-raios nas três Fases	341,72	11,31	11,31

4.3.3.2. Influência do aterramento

A realização da simulação correspondente a essa etapa consiste na aplicação direta de uma descarga atmosférica na fase modelada por uma onda triangular. Esta apresenta uma amplitude de 5 kA e tempo de frente e meia onda especificados como 1,2 μ s e 20 μ s respectivamente. Cabe destacar que a simulação será realizada para as impedâncias de aterramento iguais a 10 Ω , 30 Ω e 50 Ω .

As Figuras 4-43 a 4-45 indicam os resultados obtidos para a simulação com os parâmetros descritos anteriormente e na ausência do para-raios. Percebe-se a existência de

uma maior amplitude no pico de tensão na cadeia de isoladores da fase submetida à incidência direta da descarga atmosférica. Também, ocorre o surgimento de tensões nas cadeias dos isoladores das demais fases. De acordo com as Tabelas 4-25 a 4-27, nota-se que independentemente do valor da impedância de aterramento não há mudanças significativas no valor das amplitudes das tensões na cadeia de isoladores da fase de incidência da descarga atmosférica e nas outras cadeias de isoladores.

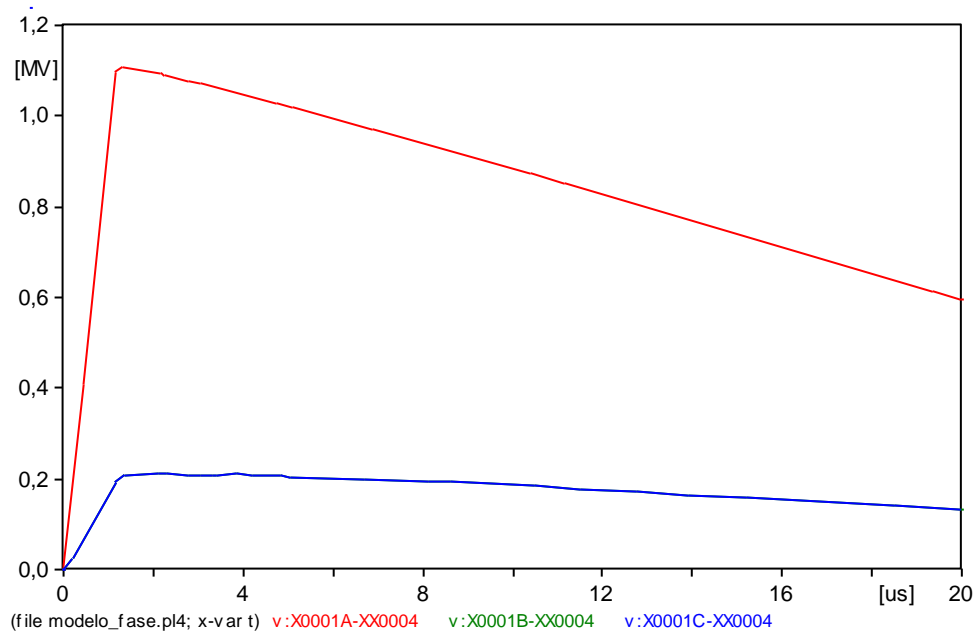


Figura 4-43 – Impedância de aterramento igual a 10 Ω e tempo de frente igual a 1,2 μ s sem para-raios

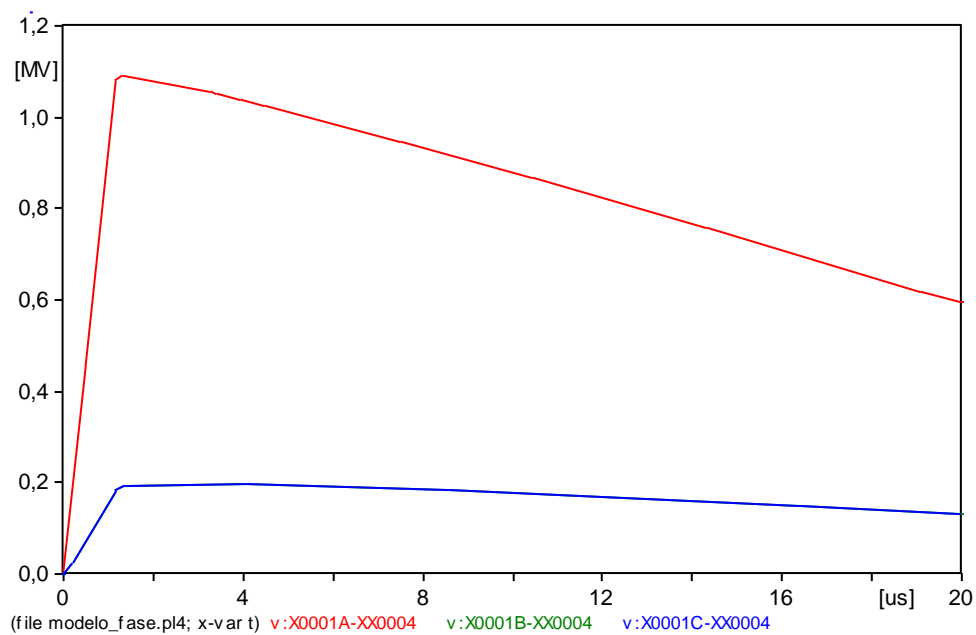


Figura 4-44 – Impedância de aterramento igual a 30 Ω e tempo de frente igual a 1,2 μ s sem para-raios

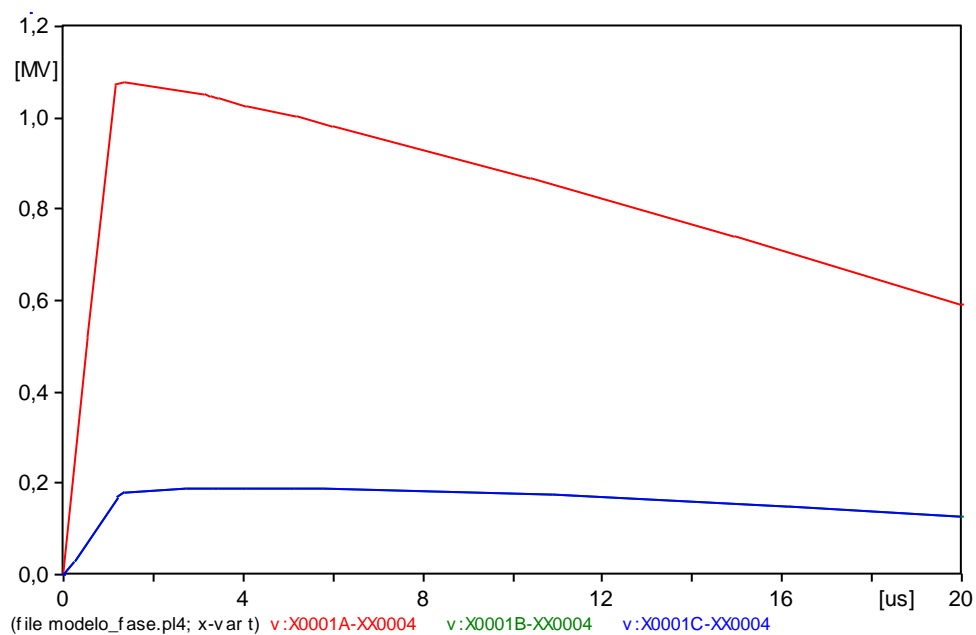


Figura 4-45 – Impedância de aterramento igual a 50 Ω e tempo de frente igual a 1,2 μ s sem para-raios

As Figuras 4-46 a 4-48 indicam os resultados obtidos para a simulação descrita anteriormente. Cabe destacar que a presença da conexão do para-raios ocasionou uma menor sobretensão nas cadeias dos isoladores principalmente naquela que está associado a fase que recebeu a incidência direta da onda de descarga.

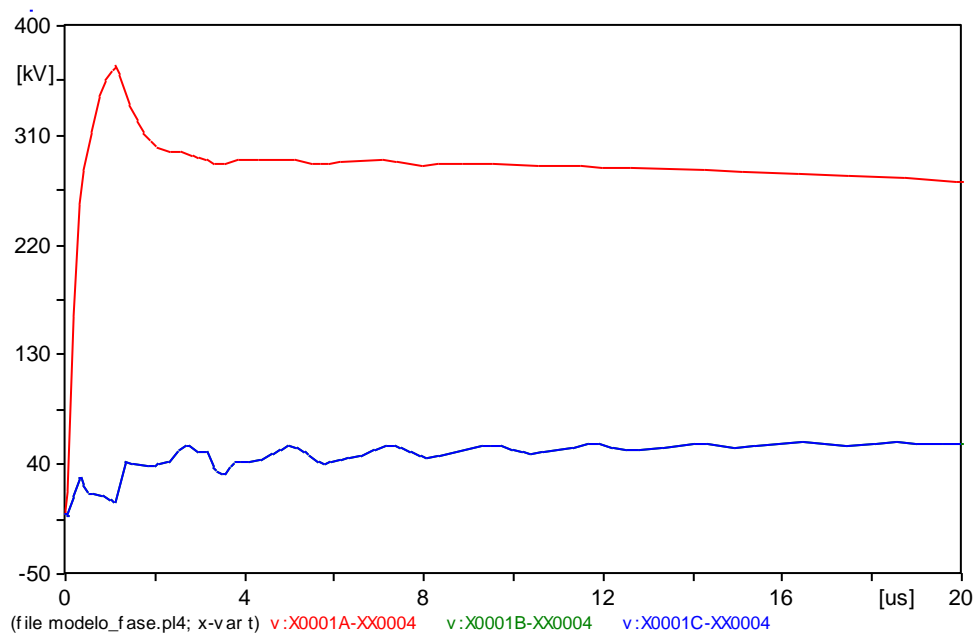


Figura 4-46 – Impedância de aterramento igual a 10 Ω e tempo de frente igual a 1,2 μ s com para-raios

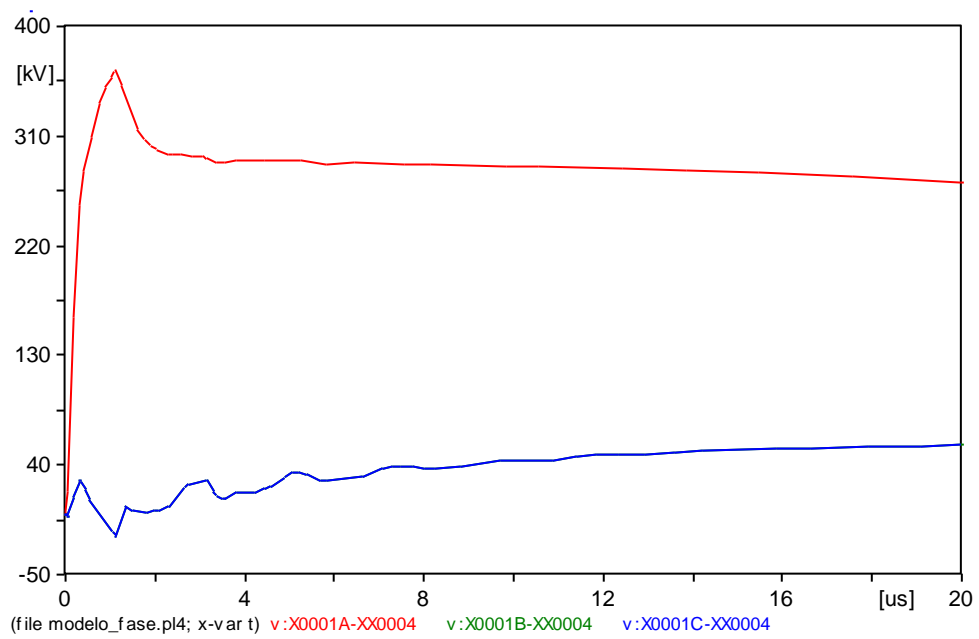


Figura 4-47 – Impedância de aterramento igual a 30 Ω e tempo de frente igual a 1,2 μ s com para-raios

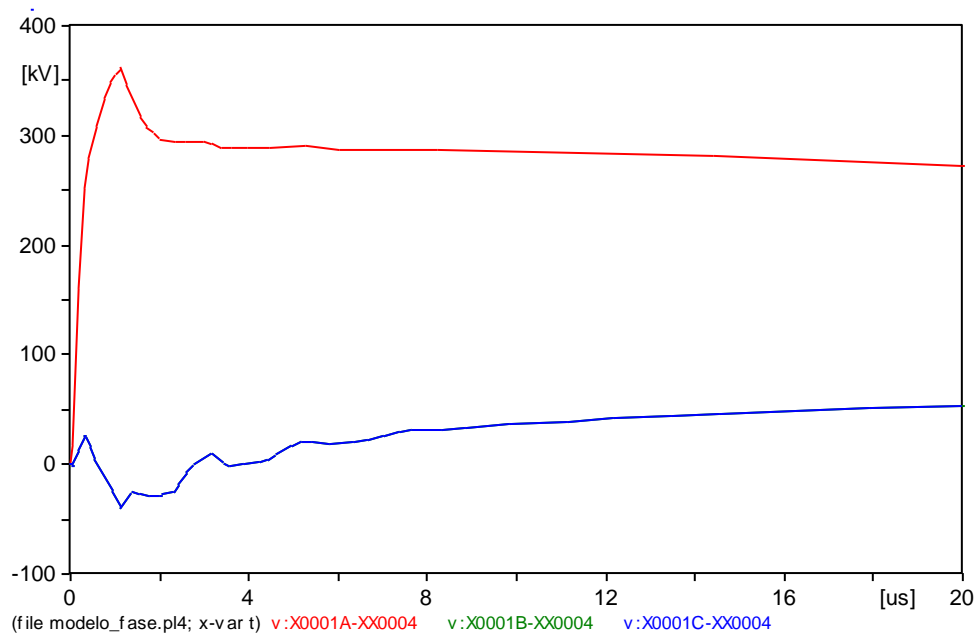


Figura 4-48 – Impedância de aterramento igual a 50 Ω e tempo de frente igual a 1,2 μ s com para-raios

As Tabelas 4-25 a 4-27 indicam que a conexão de dois ou mais para-raios ao sistema praticamente não modifica as tensões nas cadeias dos isoladores.

Tabela 4-25 – Resultados para impedância de aterramento de 10 Ω e tempo de frente igual a 1,20 μ s

Característica	Va (kV)	Vb (kV)	Vc (KV)
Sem Para-raios	1097,1	192,79	192,79
Com Para-raios na Fase A	361,39	12,917	12,917
Com Para-raios na Fase A e B	363,58	12,191	12,750
Com Para-raios nas três Fases	363,53	12,172	12,172

Tabela 4-26 – Resultados para impedância de aterramento de 30 Ω e tempo de frente igual a 1,20 μ s

Característica	Va (kV)	Vb (kV)	Vc (KV)
Sem Para-raios	1083,7	179,48	179,48
Com Para-raios na Fase A	359,96	15,74	15,74
Com Para-raios na Fase A e B	359,88	15,852	15,852
Com Para-raios nas três Fases	359,84	15,723	15,723

Tabela 4-27 – Resultados para impedância de aterramento de 50 Ω e tempo de frente igual a 1,20 μ s

Característica	Va (kV)	Vb (kV)	Vc (KV)
Sem Para-raios	1072,4	168,15	168,15
Com Para-raios na Fase A	356,82	38,963	38,963
Com Para-raios na Fase A e B	356,76	38,479	38,925
Com Para-raios nas três Fases	356,73	38,206	38,206

4.4. Conclusões

Na avaliação do *backflashover* para a incidência da descarga atmosférica no topo da torre e o sistema na ausência de para-raios, pode-se concluir que a probabilidade ruptura da cadeia de isoladores torna-se menor com o aumento do tempo de frente. Esse fato é justificado pelo fato de ocorrer à diminuição das amplitudes nos picos das tensões nas cadeias de isoladores com o incremento do tempo do frente. Por outro lado, ondas de descarga que apresentam tempo de frente pequeno apresenta uma maior probabilidade de ocasionar a ruptura da cadeia de isoladores. Nesse contexto, a presença do equipamento para-raios é fundamental para promover o grampeamento da tensão incidente na fase conectado ao instrumento e a redução nos picos das amplitudes das demais tensões nas cadeias dos isoladores.

Outro aspecto analisado foi a influencia do aterramento para a descarga descrita anteriormente. As simulações indicam que o aumento na impedância de aterramento promove uma maior elevação nas amplitudes das tensões nas cadeias dos isoladores. Dessa forma, torna-se evidente uma maior chance de ocorrência da ruptura dessas cadeias. Por outro lado, a presença do para-raios conectado a uma das fases reduz a probabilidade de ruptura nas cadeias dos isoladores em virtude da redução nas amplitudes das tensões incidentes nas cadeias dos isoladores.

Outra possibilidade de ocorrência do *backflashover* é a incidência da descarga atmosférica a meio vão. Nessa avaliação, pode-se concluir que as conclusões são análogas à simulação com a incidência no topo da torre para os mesmos parâmetros analisados.

A avaliação do *flashover* ocorreu com a incidência de uma descarga atmosférica diretamente na fase e com uma amplitude apropriada para perfurar a blindagem. Na ausência de para-raios, percebe-se uma maior amplitude na tensão na fase submetida à incidência da

descarga. A amplitude dessa tensão não apresenta variações significativas com o incremento do tempo de frente. Além disso, as demais cadeias de isoladores são submetidos a uma onda de amplitude da ordem de 200 kV. Posteriormente a conexão do para-raios a uma das fases, percebe-se uma redução significativa nas tensões em todas as cadeias de isoladores principalmente na fase submetida à onda de descarga. Dessa forma, a utilização do para-raios é de extrema importância para evitar a ocorrência do *flashover*.

Por fim, em relação ao critério da influencia do aterramento para o sistema na ausência do para-raios, pode-se concluir que o aterramento praticamente não resulta em alterações nas amplitudes das tensões nas cadeias dos isoladores. Por fim, a presença da conexão do para-raios diminui ainda mais a probabilidade de ruptura na cadeia dos isoladores.

Capítulo 5

Conclusão

O presente trabalho foi dividido em duas etapas. A primeira consiste na pesquisa dos conceitos fundamentais relacionados à descarga atmosférica e a análise da linha evolutiva dos para-raios. Além disso, ocorreu a definição dos parâmetros relacionados ao para-raios ZnO e principalmente a compreensão do modelo IEEE que foi utilizado na representação do equipamento para-raios escolhido em critérios técnicos no catálogo do fabricante.

A segunda etapa consiste no levantamento do modelo de todo o sistema, linha de transmissão tipicamente brasileira de 138 kV. Posteriormente, o trabalho focou em dois aspectos substanciais para a compreensão do desempenho do para-raios frente a descargas atmosféricas. Esses aspectos mencionados correspondem ao tempo de frente da descarga atmosférica e a impedância de aterramento.

Por critério de organização do texto e facilidade nas análises, optou-se em dividir as simulações em três casos distintos e relevantes para a compreensão dos fenômenos *backflash* e *overflash*. Os dois primeiros casos correspondem respectivamente à incidência da descarga no topo da torre e a incidência da descarga a meio vão. Por último, o terceiro caso corresponde à incidência direta no cabo fase.

Em relação aos dois primeiros casos, pode-se concluir que a maior probabilidade de ocorrer a ruptura por descargas atmosféricas está associado a menores tempos de frentes. Além disso, mesmos para esses tempos de frentes, nota-se que a presença do para-raios reduz a tendência de ocorrer essa ruptura. Outro aspecto a destacar é a elevação nas cadeias dos isoladores em virtude do incremento da impedância de aterramento. Esse fato justifica a utilização dos para-raios conectado a uma das fases para diminuir a probabilidade da ocorrência da ruptura na cadeia de isoladores. Para o terceiro caso analisado, percebe-se que o tempo de frente é mais significativo para a ocorrência do *flashover* em relação a impedância do aterramento. Existem outras possibilidades para a realização da continuidade do estudo direcionado para essa área. Uma delas está relacionada a absorção de energia pelo dispositivo para-raios. Outra razão consiste na utilização do para-raios ZnO nas subestações.

Referências Bibliográficas

- [1] FILHO, Silvério Visacro. **Descargas atmosféricas: uma abordagem de engenharia**. São Paulo: Artliber Editora, 2005.
- [2] PEDROSA, Rodrigo de Oliveira. **Estudo da absorção de energia de para-raios de ZnO instalados e linhas de transmissão de 138 KV**. Belo Horizonte, mar. 2013.
- [3] PORTO, Eudes Weber. **Cálculo de sobre tensões em linhas de distribuição devido a descargas atmosféricas laterais**. Belo Horizonte, 1990. Disponível em: <<http://www.ppgee.ufmg.br/defesas/780M.PDF>>. Acesso em: 09 dez. 2014
- [4] FRANCO, J.L; PIANTINI, A. **Estudo de avaliação do desempenho de redes de distribuição frente a descargas atmosféricas**. Relatório Técnico PFE- 001/03, Franco Engenharia Ltda, março 2003.
- [5] SILVA, Adelino Pereira. **Melhorias de desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas: desenvolvimento de sistema de informações e análise de casos**. Belo Horizonte, dez. 2007.
Disponível em: <http://www.geocities.ws/adelinopsf/Trabalhos/MESTRADO_2007.pdf>. Acesso em: 05 jan.2015.
- [6] Disponível em:
< http://www.arresterworks.com/history/pdf_files/lightning_protection_milestones.pdf>
Acesso em: 15 dez. 2014.
- [7] ÁLVARES, Ricardo Costa. **Diagnóstico de falhas em para-raios utilizando termografia**. 2008. 119 p. Dissertação de mestrado do curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.
- [8] FILHO, João Mamede. **Manual de Equipamentos Elétricos**. 3ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2005.
- [9] Disponível em:
<http://www.arresterworks.com/history/pdf_files/lightning_protection_milestones.pdf>
Acesso em 17 dez. 2014. Modificado de *History of Arresters on Power Systems 1930-1965* de 2011.

- [10] JUNIOR, Luiz Cera Zanetta. **Transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência**. EUSP, 2003.
- [11] VIDEIRA, André Gomes. **Desenvolvimento de subsídios para aplicação em testes de avaliação de para-raios de ZnO**. Florianópolis, mar. 2011. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/96065/289520.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 17 jan. 2015.
- [12] MARTINEZ, J.A; DURBAK, D. **Parameter determination for modeling systems transients**. Part V: Surge arresters, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20 (3), 2073 – 2078, July 2005.
- [13] CIGRE WG 33.02, Guidelines for Representation of Network Elements when Calculating Transients, CIGRE Brochure 39, 1990.
- [14] VIANA, Júnio Cesar Cunha. **Estudo de aplicação de para-raios ZnO em linhas de transmissão em regiões de nível cerâmico e resistência de aterramento elevados**. Belo Horizonte, set. 2009. Disponível em: <<http://www.ppgee.ufmg.br/defesas/103M.PDF>>. Acesso em: 24 dez. 2014.
- [15] FILHO, Clever S. Pereira; ALMEIDA, Fuad de S.; CONTI, Alberto R. de. **Análise de redes elétricas no domínio do tempo: cálculo de parâmetro de linhas – LCC**. Disponível em: <<http://www.cpdee.ufmg.br/~clever/10especializa/AnaliseDeRedesTempo/ApresentacaoAula5.pdf>>. Acesso em: 01 jun. 2015.
- [16] R. Alipio and S. Visacro, *"Impulse efficiency of grounding electrodes: effect of frequency dependent soil parameters," IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 29, no. 2, pp. 716–723, Apr. 2014.
- [17] R.S. Alípio, **Modelagem eletromagnética de aterramentos elétricos nos domínios do tempo e da frequência**, Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (PPMMC/CEFET-MG), dezembro de 2008.
- [18] ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica. **Módulo 8: Qualidade da Energia Elétrica**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Modulo8_F.pdf>. Acesso em: 02 jun. 2015.

- [19] HINRICHSSEN, Volker. **Metal-oxide surge arresters in high-voltage power systems**. Disponível em: <http://www.energy.siemens.com/br/pool/hq/power-transmission/high-voltage-products/surge-arresters-and-limiters/aboutus/Arrester_Book_Ed%20_3_en.pdf>. Acesso em: 02. jun. 2015.
- [20] SIEMENS. **High-voltage surge arresters**. Disponível em: <http://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/power-transmission/high-voltage-products/surge-arresters-and-limiters/Catalogue_HV_surge_arresters_en.pdf>. Acesso em: 03 jun. 2015.
- [21] IEEE Working Group on Surge Arrester Modeling. ***Modeling of metal oxide surge arresters***. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 7(1), 302-309, January 1992.
- [22] VISACRO, Silvério; JUNIOR, Amilton Soares; SCHROEDER, Marco Aurélio O.; CHERCHIGLIA, Luiz C. L.; SOUSA, Vander de José. ***Statistical analysis of lightning current parameters: Measurements at Morro do Cachimbo Station***.