

**Universidade Federal de Minas Gerais**  
**Escola de Engenharia**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

**UTILIZAÇÃO DE CABO GUARDA EXTRA PARA MELHORIA DE  
DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO**

Alexandre Marmelo dos Passos Júnior

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA  
DESIGNADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA DE  
ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS,  
COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DE TÍTULO DE MESTRE EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA.

Orientador: Prof. Wallace do Couto Boaventura

Belo Horizonte - MG

Julho de 2010

À minha família.

## **Agradecimentos**

Agradeço à minha esposa, Manu, pela dedicação, compreensão e pelas palavras de conforto, muito importantes nos momentos de dificuldades. Agradeço principalmente pelo seu incentivo. Não apenas pelo incentivo verbal, como também pelo incentivo moral, expressado nos seus exemplos diários de ética, dedicação, persistência e disciplina na busca de seus objetivos.

Agradeço a minha “estrelinha” Sofia, que mesmo com poucos dias de existência, conseguiu colocar sentido em cada palavra desta dissertação.

Agradeço aos meus pais e irmãos, pela educação e caráter, moldados em cada momento da nossa história, a qual conclui nestas palavras, mais um parágrafo do capítulo de conquistas.

Agradeço aos colegas de trabalho da Gerdau Açominas pelo apoio, incentivo e compreensão.

Destaco o agradecimento aos colegas de trabalho Guilherme Barros e Manoel Eustáquio, pela confiança e por acreditarem e incentivarem a busca por conhecimento como forma de desenvolvimento e crescimento.

Agradeço ao professor Wallace pela orientação, compreensão e ainda pela confiança e tranquilidade transmitidas nos momentos oportunos.

Agradeço também aos amigos, a alguns pelo incentivo, a outros pela compreensão durante minhas ausências. A todos vocês, obrigado pelos momentos de descontração e desabafos, imprescindíveis para a conclusão deste trabalho.

Finalmente agradeço a Deus pela proteção e saúde.

---

## ***Resumo***

As sobretensões em linhas de transmissão oriundas de descargas atmosféricas são objeto de grande preocupação nas empresas e concessionárias envolvidas com transmissão e distribuição de energia elétrica. Em sua maioria, falhas no sistema de transmissão e distribuição de instalações industriais de grande porte geram, além de longas interrupções no processo produtivo, quebra de equipamentos e perda de insumos e produtos pré-acabados, caracterizando assim grandes prejuízos financeiros. Estes e outros fatores como o custo da energia elétrica no produto final, fazem deste insumo um fator estratégico na gestão dos processos industriais, tornando também estratégica, toda a instalação de geração e transmissão de energia elétrica nos grandes parques industriais.

Dessa forma, gerenciar o risco operacional de um sistema elétrico industrial de grande porte, no que tange a transmissão e distribuição de energia elétrica, envolve também estudos e investimentos para melhoria do desempenho de linhas de transmissão.

Neste contexto, este trabalho tem o intuito de apresentar a utilização de cabo guarda extra, como alternativa de melhoria do desempenho de linhas de transmissão, comparando-a com alternativas convencionais.

O trabalho se desenvolve a partir de simulações no software PSCAD, onde são aplicadas descargas atmosféricas em uma linha de transmissão em 69 kV, para simulação do fenômeno de *backflashover*. Para compor a massa de dados, são utilizados diferentes valores para os parâmetros de impacto mais relevante no desempenho de linhas de transmissão: tempo de frente de onda, valor da resistência de pé de torre e comprimento do vão. Estas mesmas simulações são realizadas para uma linha de transmissão de características semelhantes, porém, utilizando um cabo guarda extra, posicionado em diferentes pontos sob os cabos fases. A partir destes dados, foi aplicado um tratamento estatístico para determinar os comparativos

entre o desempenho da linha de transmissão convencional e da linha de transmissão com a utilização de cabos guarda extra.

Em outra etapa, são simuladas alterações nas resistências de aterramento e no nível de isolamento da linha de transmissão, de forma que seja atingido o mesmo desempenho conseguido através da prática de utilização do cabo guarda extra, para que enfim, sejam comparadas as três alternativas.

## **Abstract**

Overvoltages in transmission lines originated from lightning are objects of big concern in companies and utilities involved with transmission and distribution of electric energy. In most cases, failures in the transmission and distribution systems of large industrial parks generate long production interruptions, equipments failures, raw material and pre-finished products losses, characterizing huge financial losses. These and other factors, as the cost of electric energy in the final product, make this input a strategic factor in the management of industrial processes, as well as strategic throughout the installation of generation and transmission of electric power in large industrial parks.

Thus, managing the operational risk of a power system in large industrial parks, with respect to transmission and distribution, involve studies and investments for improving the performance of transmission lines.

In this context, this work aims to present the use of EGW – Extra Ground Wire as an alternative to improve the performance of transmission lines, comparing it to conventional alternatives.

This work is developed by simulations in the PSCAD software, where are simulated flashes in a 69kV transmission line, for backflashover simulations. To build the set of data for analysis, the simulations are done for different values of relevant parameters on the overhead transmission lines performance: front time current wave, footing tower resistance value and span length. These same simulations are performed for a transmission line with similar characteristics, however, using EGW positioned at different locations under phase conductors. From these data, a statistical analysis is applied to determine the comparative performance between the EGW transmission line and the conventional transmission line

Further studies are performed simulating changes in footing resistance and insulation level of the transmission line, in order to reach the same performance improvement achieved with EGW providing an overall comparison of three alternatives.

## Sumário

<b>Agradecimentos</b> .....	III
<b>Sumário</b> .....	VIII
<b>Lista de Figuras</b> .....	X
<b>Lista de Tabelas</b> .....	XII
<b>Glossário</b> .....	XIII
Capítulo 1 .....	1
<b>Introdução Geral</b> .....	1
1.1 Introdução .....	1
1.2 Objetivo .....	3
1.3 Proposta de Trabalho .....	3
1.4 Contribuições .....	4
1.5 Organização do Texto .....	5
Capítulo 2 .....	7
<b>Conceitos Envolvidos em Estudo de Desempenho de Linhas de Transmissão</b> .....	7
2.1 Introdução .....	7
2.2 Descargas Atmosféricas.....	8
2.2.1 Descrição do Fenômeno .....	8
2.2.2 Descargas Subseqüentes .....	11
2.2.3 Parâmetros de Descargas Atmosféricas.....	12
2.3 Aterramentos Elétricos de Linhas de Transmissão.....	17
2.3.1 Resistividade do Solo .....	18
2.3.2 Impedância de Aterramento.....	20
2.4 Suportabilidade dos Isolamentos .....	22
2.5 Impedância de Surto das Torres.....	23
2.6 Distúrbios em Qualidade de Energia .....	25
2.6.1 Transitório Impulsivo .....	27
2.6.2 Transitório Oscilatório.....	27
2.7 Distúrbios de Tensão .....	28
2.7.1 Variação de Tensão de Curta Duração .....	29
2.7.2 Variação de Tensão de Longa Duração.....	30
2.7.3 Desbalanceamento de Tensão.....	30
2.7.4 Distorção Harmônica de Tensão.....	30
2.7.5 Flutuação de Tensão .....	31
2.7.6 Variações na Freqüência.....	31
2.8 Sobretensões .....	32
2.8.1 Sobretensões Temporárias.....	33
2.8.2 Sobretensões de Manobra.....	34
2.8.3 Sobretensões Atmosféricas.....	35
2.9 Descargas Atmosféricas em Linhas de Transmissão .....	35
2.9.1 Ondas Viajantes (Propagação de surtos) .....	36
2.9.2 Descargas Diretas .....	38
2.9.3 Descargas Indiretas.....	40
2.10 Solicitação do Isolamento .....	44
2.10.1 Acoplamento.....	45
Capítulo 3 .....	49
<b>Simulações</b> .....	49
3.1 Introdução .....	49
3.2 Objetivos.....	50

---

3.3	Descarga Atmosférica.....	50
3.2.1	Dupla exponencial.....	51
3.2.2	Curva de Heidler.....	51
3.2.3	Triangular.....	52
3.4	Torre.....	53
3.5	Aterramento.....	56
3.6	Dados Mecânicos Gerais.....	59
3.7	Circuito de Simulações.....	61
	Capítulo 4.....	63
	<b>Desenvolvimento</b> .....	63
4.1	Introdução.....	63
4.2	Etapa 1 – Teste de Modelos.....	65
4.3	Etapa 2 – Testes com Cabo Guarda Extra.....	70
4.4	Etapa 3 – Simulações Comparativas.....	74
4.5	Etapa 4 – Probabilidades de Disrupção.....	83
4.6	Etapa 5 – Alternativas de Melhoria de Desempenho.....	91
	Capítulo 5.....	99
	<b>Conclusões e Propostas de Continuidade</b> .....	99
5.1	Conclusões.....	99
5.2	Propostas de Continuidade.....	101
	<b>Referências Bibliográficas</b> .....	102

## Lista de Figuras

<i>Figura 1 – Campo Elétrico Induzido entre Nuvem e Solo [5] .....</i>	9
<i>Figura 2 – Evolução do Canal Precursor [5] .....</i>	10
<i>Figura 3 – Processo de conexão dos canais [5] .....</i>	11
<i>Figura 4 – Processo de Formação de Descarga Positiva [5] .....</i>	12
<i>Figura 5 – Formas de Onda de Corrente de Descargas [5] .....</i>	14
<i>Figura 6 – Onda Dupla Exponencial e Circuito de Geração [5] .....</i>	15
<i>Figura 7 – Efeito da umidade na resistividade do solo [2] .....</i>	19
<i>Figura 8 – Tensão Crítica Disruptiva em Função do Número de Isoladores [15] .....</i>	22
<i>Figura 9 – Comparação entre Valores Calculados e Medidos [15] .....</i>	24
<i>Figura 10 – Classificação dos Distúrbios de Tensão [11] .....</i>	29
<i>Figura 11 – Representação Esquemática dos Diferentes Tipos de Sobretensão em Sistema EAT .....</i>	33
<i>Figura 12 - Modelo Eletrogeométrico de uma Linha de Transmissão [15] .....</i>	40
<i>Figura 13 – Descarga na torre [15] .....</i>	42
<i>Figura 14 - Parâmetros Necessários para o Cálculo dos Fatores de Acoplamento de Linhas (a) com um Cabo Pára-Raios e (b) com dois Cabos Pára-Raios [6] .....</i>	46
<i>Figura 15 – Elementos Básicos Presentes na Formação de Sobretensão nos Isoladores .....</i>	47
<i>Figura 16 – Forma de Onda da Corrente de Descarga no PSCAD .....</i>	53
<i>Figura 17 – Aproximação da Impedância de Surto <math>Z_t</math> por Classes de Geometria [6] .....</i>	54
<i>Figura 18 – Estrutura Tipo S13 .....</i>	55
<i>Figura 19 – Gráfico da Estratificação do Solo .....</i>	57
<i>Figura 20 – Diagrama da Estratificação do Solo em Duas Camadas .....</i>	57
<i>Figura 21 – Resistência de Aterramento Medida .....</i>	58
<i>Figura 22 – Resultado da Medição da Impedância de Aterramento .....</i>	59
<i>Figura 23 – Máscara de Entrada de Dados da LT no SW PSCAD .....</i>	60
<i>Figura 24 – Circuito de Simulação .....</i>	62
<i>Figura 25 – Sobretensão na Cadeia de Isoladores – Torre Representada por Indutâncias ...</i>	66
<i>Figura 26 – Representação da Torre por Segmentos .....</i>	67
<i>Figura 27 - Sobretensão na Cadeia de Isoladores – Torre Representada por LT monofásica</i>	68
<i>Figura 28 – Sobretensões nas fases para Injeção de 1kA com frente de onda de 5<math>\mu</math>s .....</i>	69
<i>Figura 29 - Sobretensões nos isolamentos para Injeção de 1kA com frente de onda de 5<math>\mu</math>s ..</i>	70
<i>Figura 30 – Alternativas de posicionamento do cabo guarda extra .....</i>	71
<i>Figura 31 – Circuito trifásico com cabo guarda extra à 15,75 metros do solo .....</i>	72
<i>Figura 32 - Circuito trifásico com cabo guarda extra à 15,00 metros do solo .....</i>	72
<i>Figura 33 - Circuito trifásico com cabo guarda extra à 12,70 metros do solo .....</i>	73
<i>Figura 34 – Circuitos de Simulação e Perfil das Curvas Trabalhadas .....</i>	75
<i>Figura 35 – Valores da Tensão de Pico .....</i>	77
<i>Figura 36 – Resultados Comparativos - Tempo de Frente de Onda Fixo em 5<math>\mu</math>s .....</i>	78
<i>Figura 37 – Resultados Comparativos – Valor de Comprimento de Vão Fixo .....</i>	79
<i>Figura 38 – Simulações Comparativas – Valor de Resistência de pé de Torre Fixo .....</i>	80
<i>Figura 39 – Corrente Crítica de Descarga .....</i>	81
<i>Figura 40 – Elevação da Corrente Crítica de Descarga com a Variação do Comprimento do Vão .....</i>	82
<i>Figura 41 – Frequência de Distribuição da Corrente de Pico para Descargas Negativas [6] .....</i>	83
<i>Figura 42 – Probabilidade da Corrente de Descarga Exceder a Corrente Crítica .....</i>	84
<i>Figura 43 – Fluxograma Básico das Etapas de Desenvolvimento do Trabalho .....</i>	85
<i>Figura 44 – Redução da Probabilidade com a Aplicação do EGW .....</i>	86

---

<i>Figura 45 – Redução EGW vs GW em Função da Resistência de Pé de Torre .....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 46 - Redução da Probabilidade de Falha em Função da Resistência de pé de Torre – Curva Fiting .....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 47 – Redução da Probabilidade de Falhas em Função de R(ohms) – LT em Estudo..</i>	<i>90</i>
<i>Figura 48 – Histograma das Resistências de Pé de Torre Medidas .....</i>	<i>93</i>

---

## Lista de Tabelas

<i>Tabela 1 Faixa de valores de resistividade para certos tipos de solo [2] .....</i>	19
<i>Tabela 2 Características de Fenômenos Eletromagnéticos no sistema Elétrico [12] .....</i>	26
<i>Tabela 3 Curvas de Representação da Corrente de Descarga .....</i>	53
<i>Tabela 4 Etapas do Desenvolvimento .....</i>	65
<i>Tabela 5 Valores de Indutância por Segmento da Torre .....</i>	67
<i>Tabela 6 Variações nos Parâmetros de Linha para Simulação .....</i>	75
<i>Tabela 7 Resultado das Simulações Comparativas com Variação de Parâmetros da Linha ..</i>	76
<i>Tabela 8 Redução Comparativa Simulação vs Expressão da Probabilidade de Falha em %</i>	89
<i>Tabela 9 Elevação do Nível de Isolamento – Resultado das Simulações .....</i>	96
<i>Tabela 10 Melhoria no Aterramento – Resultado das Simulações .....</i>	97

---

## Glossário

EGW – Extra Ground Wire

BFO – BackFlashover

$N_g$  – Densidade de Descarga Atmosférica (descargas/km<sup>2</sup>/ano)

$\rho$  – Resistividade do solo ( $\Omega$ .m)

R – Resistência Elétrica ( $\Omega$ )

h – Altura do cilindro equivalente (m)

r – Raio do cilindro equivalente (m)

L – Indutância por unidade de comprimento (H)

C – Capacitância por unidade de comprimento (F)

$V_\phi$  – Tensão no cabo fase (kV)

$V_{PR}$  – Tensão no cabo pára-raios (kV)

$V_{qn}$  – Tensão acoplada no condutor fase (kV)

$V_{pn}$  – Tensão estabelecida na mísula (kV)

$V_{sn}$  – Tensão resultante na cadeia de isoladores (kV)

$K_{PR}$  – Coeficiente de acoplamento entre cabo pára-raios e cabo fase

## Capítulo 1

# Introdução Geral

## 1.1 Introdução

O Estado de Minas Gerais, por suas características geográficas e meteorológicas, apresenta um alto índice de descargas atmosféricas, de modo que 70% dos desligamentos em linhas de transmissão são devidos a este fenômeno [1]. Quando observado em escala mais reduzida, constata-se que há grande variação na incidência de descargas atmosféricas nas diversas regiões do Estado, com destaque para as proximidades das cidades de Congonhas e Juiz de Fora, onde são encontrados os índices mais elevados.

Além do alto nível cerâmico, outro fator tem relevante contribuição nos índices de desempenho das linhas de transmissão que percorrem o Estado, a resistividade característica do solo. Minas Gerais constitui-se numa região cujos solos superficiais são compostos predominantemente de formações antigas, principalmente do período Pré-Cambriano. Assim a resistividade desses solos é geralmente muito elevada [2]. Características regionais do solo,

como pouca umidade e presença de erosão, caracterizam variações significantes nos valores de resistividades encontrados ao longo do Estado, podendo atingir resistividades superiores a  $10.000\Omega.m$ . Valores dessa grandeza situados na faixa entre  $5.000$  e  $10.000\Omega.m$  são comuns em locais onde são implantadas instalações elétricas [2].

As sobretensões em linhas de transmissão oriundas de descargas atmosféricas são objeto de grande preocupação nas empresas e concessionárias envolvidas com transmissão e distribuição de energia elétrica.

Esta preocupação se traduz em diversos estudos e profissionais dedicados ao tema, se materializando então, em grandes investimentos visando o desempenho adequado do sistema.

Vários são os estudos relacionados ao tema [3], [1], [4], [9]. O maior conhecimento do fenômeno, através de análises das modelagens desenvolvidas para o estudo de descargas atmosféricas e seus impactos no sistema elétrico, tem trazido ótimos resultados e sugestões de melhorias no sistema elétrico.

Assim como nas concessionárias, alguns setores industriais de grande porte e de grandes áreas instaladas como os setores siderúrgicos e de mineração, estão sujeitos à interferências em seus processos devido ao fenômeno.

Em sua maioria, falhas no sistema de transmissão e distribuição de instalações industriais geram, além de grandes interrupções no processo produtivo, quebra de equipamentos e perda de insumos e produtos pré-acabados, caracterizando assim, grandes prejuízos financeiros.

Estes e outros fatores como o custo da energia elétrica no produto final, fazem deste insumo um fator estratégico na gestão dos processos industriais, tornando também estratégica toda a instalação de geração e transmissão de energia elétrica nos grandes parques industriais.

Dessa forma, gerenciar o risco operacional de um sistema elétrico industrial de grande porte, no que tange a transmissão e distribuição de energia elétrica, envolve também, estudos e investimentos para melhoria do desempenho de linhas de transmissão.

Medidas convencionais aplicadas à linhas de transmissão para aumento do desempenho, como por exemplo, melhoria no aterramento, na blindagem ou isolamento, ou a instalação de pára-raios, nem sempre são suficientes [4] ou mesmo não são a melhor alternativa quando analisadas por uma ótica de investimento e geração de capital para o acionista.

Neste contexto, a presente dissertação tem o intuito de apresentar a utilização de cabos guarda extras, como alternativa de melhoria no desempenho de linhas de transmissão.

## **1.2 Objetivo**

O objetivo deste trabalho é apresentar soluções de engenharia para melhoria do desempenho de uma linha de transmissão de 69kV, considerando a utilização de cabo guarda extra, sob a ótica de análise de viabilidade de investimento.

## **1.3 Proposta de Trabalho**

Neste trabalho é proposta a modelagem de uma linha de transmissão em 69kV, onde são simuladas descargas atmosféricas com diferentes valores de tempo de frente de onda. Nesta linha de transmissão, são simulados diferentes valores de resistência de aterramento e diferentes valores de comprimento de vão.

Estas mesmas simulações são realizadas para uma linha de transmissão de características semelhantes, porém, utilizando um cabo guarda extra, posicionado em diferentes pontos sob os cabos fases.

A partir desta massa de dados, são compostos comparativos entre o desempenho da linha de transmissão convencional e da linha de transmissão com a utilização de cabos guarda extras.

Em outra etapa, são simuladas alterações nas resistências de aterramento e no nível de isolamento da linha de transmissão, de forma que seja atingida a mesma melhoria de desempenho conseguida através da prática de utilização do cabo guarda extra.

Definidas as melhorias necessárias nas resistências de aterramento e nível de isolamento, são enfim, comparados os investimentos necessários para implantação das três alternativas.

## **1.4 Contribuições**

A principal contribuição deste trabalho é apresentar uma nova alternativa de melhoria do desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas, comparando-a com alternativas convencionais, utilizando para tal, simulações e tratamento estatístico. Para este fim, são disponibilizadas informações relacionadas aos seguintes itens:

- Comparações de sobretensões em linhas de transmissão com cabo guarda extra e convencionais, formuladas através de simulações realizadas no software PSCAD;
- Formulação do percentual de redução da probabilidade de falha da linha de transmissão por rompimento do isolamento em função dos valores de resistência de aterramento, em função da utilização do cabo guarda extra.

## 1.5 Organização do Texto

Este texto foi estruturado em cinco capítulos. No capítulo 2, está apresentada toda a conceituação teórica utilizada no desenvolvimento do trabalho. A seqüência de apresentação se inicia conceituando o fenômeno da descarga atmosférica, ressaltando alguns aspectos essenciais para o entendimento do fenômeno e de seus efeitos. Em seguida, são apresentados alguns parâmetros típicos de descargas atmosféricas, relacionando-os com suas características e seus efeitos.

Na seqüência, são conceituados os diversos tipos de distúrbios de tensão e apresentadas suas principais características, dando maior ênfase aos distúrbios oriundos de descargas atmosféricas.

Posteriormente, são apresentados os parâmetros de linhas de transmissão relevantes ao estudo de desempenho frente à descargas atmosféricas e suas influências no desempenho da linha de transmissão, frente ao fenômeno. Certa ênfase é atribuída aos assuntos aterramento, blindagem e nível básico de isolamento, visto suas relevâncias no objeto deste estudo.

Para finalizar o capítulo 2, é apresentada a conceituação teórica do funcionamento do cabo guarda extra no circuito eletromagnético da linha de transmissão.

No Capítulo 3, estão apresentados e justificados os parâmetros utilizados nas modelagens das linhas de transmissão e os circuitos de simulações utilizados no desenvolvimento do trabalho.

O capítulo 4 apresenta todo o desenvolvimento do trabalho e os resultados das simulações. Este capítulo foi estruturado em etapas que respeitam a cronologia da metodologia aplicada.

Finalizando, o capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho e propostas de continuidade.

## Capítulo 2

# Conceitos Envolvidos em Estudo de Desempenho de Linhas de Transmissão

## 2.1 Introdução

O estudo de desempenho de linhas de transmissão envolve vários componentes e parâmetros destes equipamentos e do meio onde estão instalados. De acordo com o objetivo do estudo e conseqüentemente, com a linha adotada para desenvolvimento de alternativas, alguns destes componentes e parâmetros são mais expressivos e têm maior relevância nos resultados encontrados.

Para melhores entendimento e alinhamento de conceitos, este capítulo apresenta uma conceituação dos componentes, fenômenos e parâmetros determinantes ao desenvolvimento deste estudo. Serão abordados os seguintes temas:

- Descargas Atmosféricas
- Sistemas de Aterramento Elétrico de Linhas de Transmissão

- Suportabilidade dos Isolamentos;
- Impedância de Surto;
- Distúrbios em Qualidade de Energia
- Distúrbios de Tensão
- Descargas Atmosféricas em Linhas de Transmissão
- Solicitação do Isolamento - Acoplamento Eletromagnético

Dentro de cada um dos temas citados, alguns conceitos serão apenas citados e outros serão mais aprofundados, de acordo com suas relevâncias no desenvolvimento do estudo.

## **2.2 Descargas Atmosféricas**

### **2.2.1 Descrição do Fenômeno**

Em média, ocorrem permanentemente cerca de 2.000 tempestades simultâneas em todo o globo terrestre. Vários são os processos de transporte de cargas na região abaixo da nuvem, porém, as descargas atmosféricas têm contribuição predominante na transferência de cargas negativas para o solo, resultando no fluxo de corrente do circuito global.

Em termos médios, cada tempestade gera uma carga de 0,5 A da nuvem para o solo. Assim, pode-se considerar o fluxo contínuo de uma corrente típica de 1 kA no circuito global.

Uma combinação de vários processos químicos e físicos resulta por promover a eletrificação de partes das nuvens, separando as cargas positivas nas regiões superiores, deixando então, as regiões inferiores das nuvens, com carga resultante negativa. A distribuição de cargas no interior da nuvem gera campos elétricos muito intensos que

determinam valores elevadíssimos de diferença de potencial entre os centros de cargas positivas e negativas, que podem alcançar valores superiores a 200 MV.

A base da nuvem fortemente carregada com cargas negativas é capaz de induzir no solo sob sua sombra, uma distribuição de cargas positivas de mesma intensidade, gerando também, um forte campo elétrico na região intermediária entre a nuvem e o solo, com valores elevados de diferença de potencial associada [5].

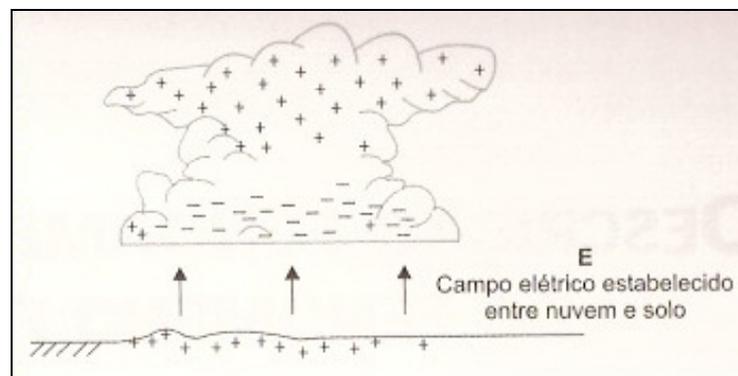


Figura 1 – Campo Elétrico Induzido entre Nuvem e Solo [5]

Estas regiões, internas e externas à nuvem sustentadas sobre elevados valores de diferença de potencial criam as condições necessárias para o surgimento do fenômeno da descarga atmosférica.

O valor do campo elétrico em determinadas regiões internas à nuvem atinge valores superiores à rigidez dielétrica do ar, determinando o aparecimento de uma descarga elétrica intensa, constituindo um canal ionizado de plasma que se estende por vários metros. Neste canal de características condutoras, há o acúmulo de cargas negativas provenientes das regiões circunvizinhas da nuvem, ionizada negativamente. O acúmulo de cargas resulta no aumento do campo elétrico nas extremidades do canal, o que tende a gerar descargas elétricas semelhantes à inicial. Este canal, carregado negativamente, tende a ser impelido para baixo, saindo então para a região externa à nuvem.

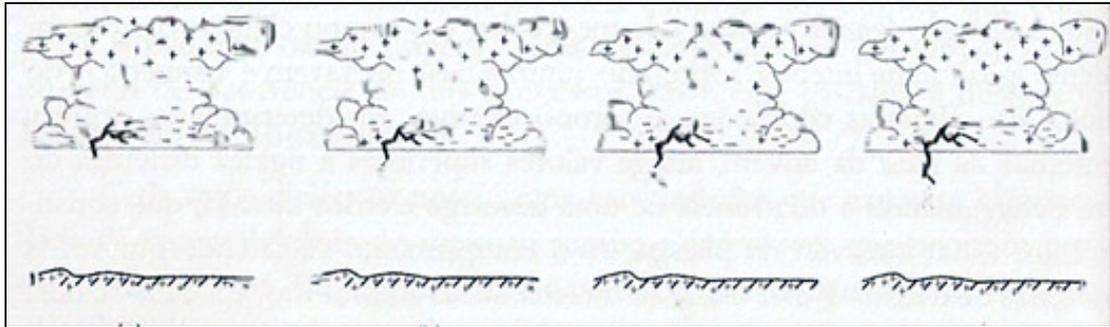


Figura 2 – Evolução do Canal Precursor [5]

Novamente ocorre o acúmulo de cargas negativas na extremidade do canal de plasma, expelidas pela base negativa da nuvem. Assim, o processo que culmina na ruptura se repete, ampliando o comprimento do canal em cerca de 50 metros. Uma vez mantidas as condições de intensidade de campo elétrico, este processo pode se repetir por mais algumas vezes, em intervalos de  $50 \mu\text{s}$ , formando o chamado canal precursor de descarga.

Na medida em que este canal se aproxima do solo, há um acúmulo de cargas negativas na região abaixo do canal precursor, aumentando assim o campo elétrico associado. Quando o canal descendente atinge distâncias próximas a algumas centenas de metros do solo, o campo elétrico nesta região é tal que começam a originar descargas elétricas ascendentes. Respeitando um processo semelhante ao descrito para as descargas descendentes, as descargas ascendentes, chamadas de canais concorrentes, evoluem na direção do canal descendente.

Quando o canal descendente e um dos canais concorrentes atingem uma distância crítica – determinada pelo valor de carga acumulada no canal descendente – pode ocorrer uma descarga final que os interliga, por meio de um salto final.

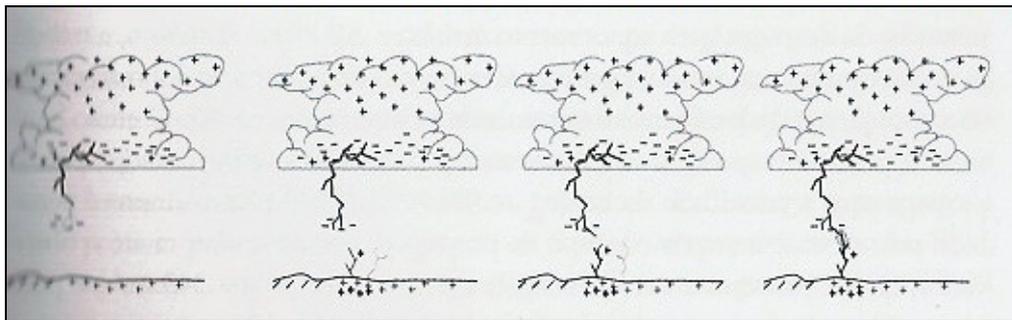


Figura 3 – Processo de conexão dos canais [5]

No momento em que ocorre o fechamento do canal entre nuvem e solo, é estabelecida uma onda de corrente de alta intensidade que se propaga pelo canal, a partir do ponto de conexão, neutralizando as cargas ali acumuladas e dando origem a uma onda de corrente na base do canal.

### 2.2.2 Descargas Subseqüentes

Na maioria dos casos, cerca de 80%, após o término da corrente de retorno, a atividade elétrica não cessa. Ocorrem outras descargas pelo mesmo canal da descarga inicial.

Estas descargas são alimentadas por outros centros de cargas presentes nas regiões inferiores da nuvem.

Estas ocorrências podem suceder por até um intervalo de tempo limite da ordem de 100ms após a ocorrência da primeira descarga, após a qual, o canal se dissipa [5].

Outros comportamentos da corrente de descarga atmosférica caracterizam fenômenos menos comuns do que as descargas negativas, porém não menos importantes, são as descargas positivas e as descargas bipolares.

As descargas positivas ocorrem quando devido a fatores climáticos, há um deslocamento da parte superior da nuvem, desta forma, a blindagem exercida pela região inferior deixa de ser eficaz. Uma saliência no terreno, como montes e montanhas, por exemplo, pode ser

suficiente para iniciar o processo de descarga entre a parte superior positiva da nuvem e o solo. A Figura 4 representa basicamente, as etapas deste fenômeno.

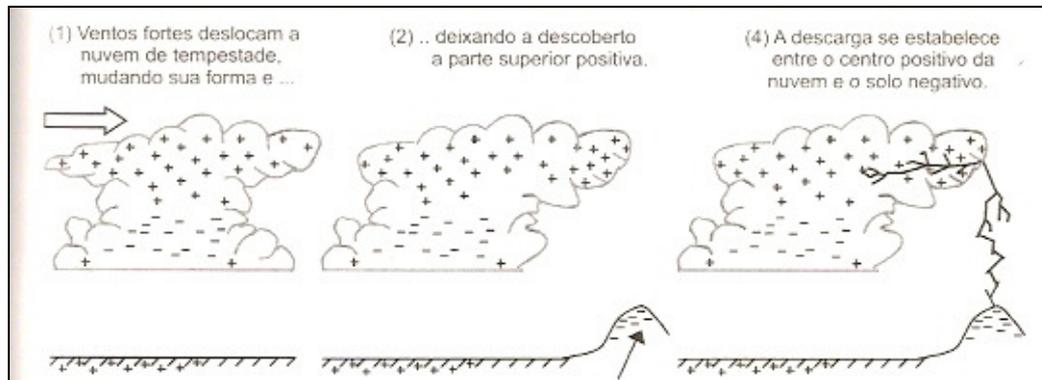


Figura 4 – Processo de Formação de Descarga Positiva [5]

As descargas bipolares, ainda menos comuns do que as descargas positivas, são caracterizadas por um comportamento particular da onda medida, onde há variação do sinal de corrente.

Este comportamento é atribuído ao fato de que durante uma descarga negativa, sua extremidade superior encontra um canal conectado a um centro de carga positiva da nuvem, dessa forma o canal originalmente transportando cargas negativas, passa a transportar cargas de um centro de cargas positivas.

### 2.2.3 Parâmetros de Descargas Atmosféricas

São vários os parâmetros relativos às descargas atmosféricas. Alguns deles são comuns à todos os diferentes tipos de descargas, outros porém, apontam as especificidades.

Neste item serão citados os parâmetros referentes às descargas nuvem-solo, detalhando àqueles de influência relevante no desenvolvimento do trabalho.

- Densidade de descarga

Este parâmetro é a primeira informação, cujo conhecimento se requer de imediato nas avaliações de proteção contra descargas atmosféricas [5].

É o parâmetro que mede o número médio de descargas atmosféricas que atingem determinada região em determinado intervalo de tempo. Normalmente representado pelo parâmetro  $N_g$ , é dado por “descargas/km<sup>2</sup>/ano”.

- Forma de onda

A forma de onda da corrente de descarga, em uma primeira análise, pode parecer bastante aleatória, porém, quando determinadas referências de tempo adequadas e normalizadas as amplitudes do pico de corrente, nota que o corpo principal apresenta dispersão relativamente discreta [5], sendo então, possível traduzir através de uma abordagem estatística, um comportamento característico de cada tipo de descarga atmosférica.

A Figura 5 mostra formas de ondas típicas, medidas em San Salvatore, na Suíça, por Berger [7].

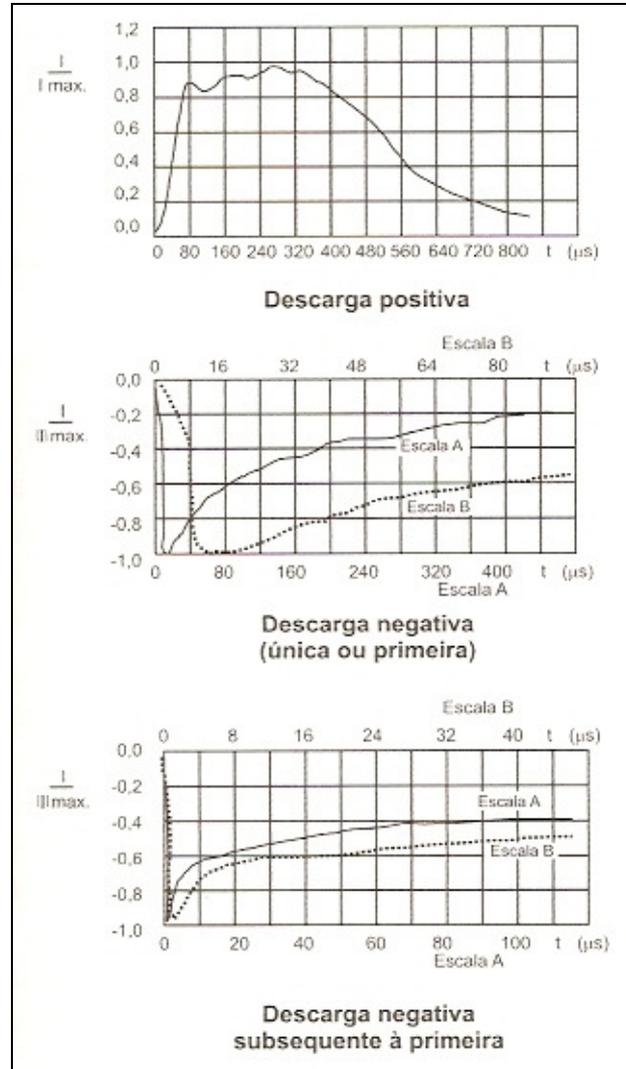


Figura 5 – Formas de Onda de Corrente de Descargas [5]

Usualmente e de acordo com o objetivo da pesquisa, a corrente de descarga é representada pela *curva dupla exponencial*. Apesar de não representar fielmente a forma de onda média medida, sua aplicação permite a padronização em experimentos e é facilmente gerada em laboratório.

A Figura 6 ilustra a forma de onda dupla exponencial e mostra o circuito gerador da onda.

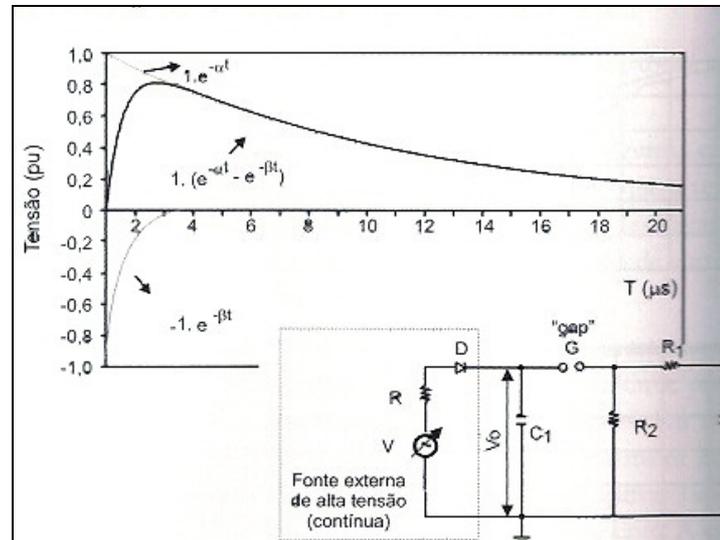


Figura 6 – Onda Dupla Exponencial e Circuito de Geração [5]

Outra forma de onda empregada é a *curva de Heidler*. Basicamente, a curva de Heidler difere da dupla exponencial no comportamento côncavo dos seus instantes iniciais.

Ainda há outras formas mais simples de representação da forma de onda de descarga atmosférica, também adotadas em ensaios e simulações. A escolha da representação adequada tem estreita relação com o objetivo do estudo.

- Tempo de frente de onda

O tempo de frente de onda é um parâmetro de influência significativa na amplitude da tensão induzida nos sistemas e redes de energia elétrica quando de uma descarga atmosférica. Sua relevância em estudos de desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas ainda se eleva devido ao fato da relação estreita entre a suportabilidade de isolamentos elétricos e eletrônicos e a inclinação da frente de onda das sobretensões geradas pelas correntes de descargas atmosféricas.

Está relacionado com o intervalo de tempo compreendido entre o início da onda impulsiva até o tempo correspondente ao pico da onda.

- Tempo de meia onda

O tempo de meia onda é definido como o tempo decorrido entre o início da onda impulsiva e o instante em que a corrente, após ter ultrapassado o valor de pico, tem sua intensidade reduzida para 50% deste valor [5].

Seus efeitos, diferentemente do tempo de frente de onda que define o estágio mais crítico da solicitação dos isolamentos, estão relacionados com fenômenos térmicos nos isolamentos, visto a grande energia acumulada.

- Tempo total de duração

O tempo total de duração é definido como o tempo decorrido entre o início da onda impulsiva e o instante em que ela se anula. Segundo as medições de Berger, valores médios típicos na ordem de 180 ms, 85 ms e 13 ms são encontrados respectivamente, para descargas positivas, negativas primeiras e subseqüentes.

- Amplitude da corrente

Este parâmetro é definido como o valor de pico ou de crista da onda de corrente, correspondente ao valor máximo alcançado pela corrente de descarga.

Valores medianos típicos para descargas negativas primeiras e descargas positivas estão na ordem de 30 kA, porém podem alcançar valores máximos bem distintos, chegando na

ordem de 100 kA para descargas negativas primeiras e cerca de 200 kA para descargas positivas.

Outros parâmetros trazem informações sobre o fenômeno da descarga atmosférica, sendo considerados mais ou menos importantes de acordo com o objetivo do estudo.

Para o estudo em questão, não serão detalhados os parâmetros a seguir.

- Derivada máxima
- Energia por unidade de resistência
- Carga transferida

## **2.3 Aterramentos Elétricos de Linhas de Transmissão**

A função fundamental do aterramento de um sistema de proteção contra descargas atmosféricas consiste em minimizar os potenciais gerados no sistema e no solo durante o eventual fluxo de uma corrente de descarga no sistema, com conseqüente redução de riscos aos seres e equipamentos presentes no local [8].

O aterramento de uma linha de transmissão tem participação fundamental no seu desempenho. Portanto, para atingimento do desempenho desejado, deve dedicar certa atenção a este tópico.

O aterramento deve ser dimensionado de modo a atender tanto às solicitações lentas, como os curto circuitos, onde as frequências representativas são na ordem da frequência fundamental, assim como às solicitações rápidas, como são os casos das descargas atmosféricas.

A seguir serão descritos os principais elementos de aterramentos elétricos, envolvidos no desempenho de linhas de transmissão.

### 2.3.1 Resistividade do Solo

Pode-se definir a resistividade do solo ( $\rho$ ) como a resistência elétrica  $R$ , medida entre as faces oposta de um cubo de dimensões unitárias (aresta  $l$  de 1 m, área das faces  $A$  de 1 m<sup>2</sup>) preenchido com este solo. Sua unidade é  $\Omega.m$  [2].

$$\rho = R \frac{A}{l}$$

*Equação 1*

Naturalmente, o solo pode ser considerado um mal condutor de eletricidade, porém, é difícil estabelecer um valor típico de resistividade, uma vez que os valores de resistividade encontrados em medições variam consideravelmente. Em solos mais comuns, é possível encontrar valores de resistividade variando entre 5 e 20.000  $\Omega.m$ .

Vários parâmetros contribuem para esta variação. A seguir, serão descritas breves considerações sobre os parâmetros mais relevantes.

- Tipo de solo

Não há distinção clara entre os tipos de solo e conseqüentemente, é difícil definir valores específicos para cada tipo. Porém, é possível definir uma faixa de valores de resistividade para os tipos de solo mais comumente encontrados. A Tabela 1, mostra a relação dos diferentes tipos de solos com sua faixa de resistividade típica.

Tabela 1  
Faixa de valores de resistividade para certos tipos de solo [2]

Tipos de Solo	Resistividade ( $\Omega.m$ )
Lama	5 a 100
Húmus	10 a 150
Limo	20 a 100
Argilas	80 a 330
Terra de Jardim	140 a 480
Calcário Fissurdo	500 a 1000
Calcário Compacto	1000 a 5000
Granito	1500 a 10000
Areia Comum	3000 a 8000
Basalto	10000 a 20000

- Umidade do solo

A água é o principal elemento de condução de corrente no solo [2]. Assim a resistividade do solo se altera sensivelmente em função da quantidade de água contida no solo.

A Figura 7 constrói uma relação entre a resistividade do solo e o índice de umidade presente. Nota-se que há uma sensível diminuição da resistividade para concentrações de água no solo entre 0 e 18%. A partir desta concentração, o aumento da umidade já não tem tanta influência na resistividade.

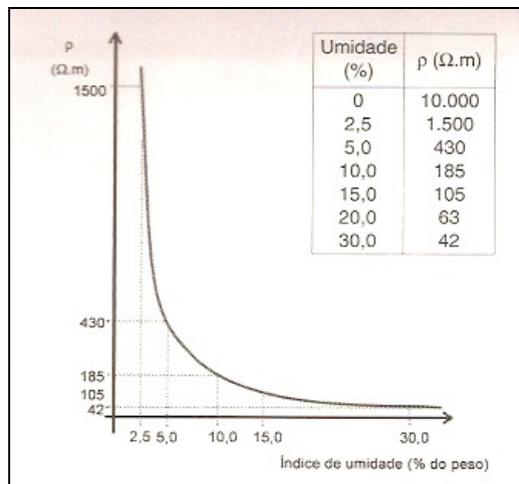


Figura 7 – Efeito da umidade na resistividade do solo [2]

- Compacidade do solo

Quanto mais compacto é o solo, maior é sua continuidade física e conseqüentemente, maior é sua capacidade de conduzir corrente elétrica.

- Granulometria

A existência de grãos maiores tende a aumentar a resistividade, pois permite uma menor retenção de água – maior capacidade de fluir para regiões mais profundas ou mesmo evaporar.

Outros parâmetros que também influenciam na resistividade do solo, porém com menor relevância, são:

- Concentração e tipos de sais dissolvidos na água
- Temperatura do solo
- Estrutura geológica

### 2.3.2 Impedância de Aterramento

Entende-se como aterramento, a conexão elétrica à terra, de um sistema elétrico ou equipamento elétrico, por meio de condutores elétricos especificamente dimensionados para este fim.

Uma conexão à terra tem componentes resistivos, capacitivos e indutivos, portanto, o comportamento de um aterramento pode variar significativamente em função das características da onda de corrente que o percorre. Em baixas frequências, as componentes

capacitivas e indutivas podem ser desconsideradas e assim, a impedância de aterramento de aproxima de uma resistência. Porém, em altas frequências, o aterramento se comporta como uma impedância complexa.

Este comportamento variável com a frequência da onda corrente tem impacto no desempenho do sistema de aterramento e conseqüentemente, no desempenho da linha de transmissão.

Este mesmo comportamento variável que impacta no desempenho dos equipamentos, influencia nas terminologias utilizadas para nomear esta conexão à terra. *Impedância de Aterramento*, *Resistência de Aterramento*, *Resistência de Terra* e *Resistência de Pé de Torre*, são termos comumente encontrados, sendo o último utilizado para designar o aterramento de linhas de transmissão.

Vários são os fatores que influenciam nos valores de resistência de terra de um sistema de aterramento. Porém, de uma forma geral, pode-se agrupá-los em dois:

- Configuração dos eletrodos de aterramento
- Resistividade do solo

Dentro destes dois grupos, são conhecidas várias técnicas de melhoria dos valores de resistência de terra.

No caso de aterramentos de linhas de transmissão, as técnicas mais empregadas consistem no tratamento químico ou físico do solo e alterações nas configurações dos eletrodos, onde são consideradas técnicas como utilização de anéis de equalização de potencial, alteração na profundidade de hastes, cabos contra peso de comprimentos adequados e grelhas.

## 2.4 Suportabilidade dos Isolamentos

A suportabilidade dos isolamentos é avaliada a partir de ensaio em laboratórios, donde pode-se destacar algumas conclusões mais relevantes.

- O isolamento é afetado pela altitude, sendo recomendada uma redução de 2,5% para cada 300 metros de altitude.
- A presença de chuva não altera o comportamento do isolamento quando submetido a surtos atmosféricos.

Uma linha de transmissão apresenta basicamente três tipos de configurações diferentes para análise do isolamento a surtos atmosféricos: espaçamento condutor-estrutura, espaçamento condutor-condutor e espaçamento condutor-solo [15].

A tensão crítica disruptiva para surtos atmosféricos está indicada na Figura 8, para polaridade positiva e negativa, em função da quantidade de isoladores tipo padrão.

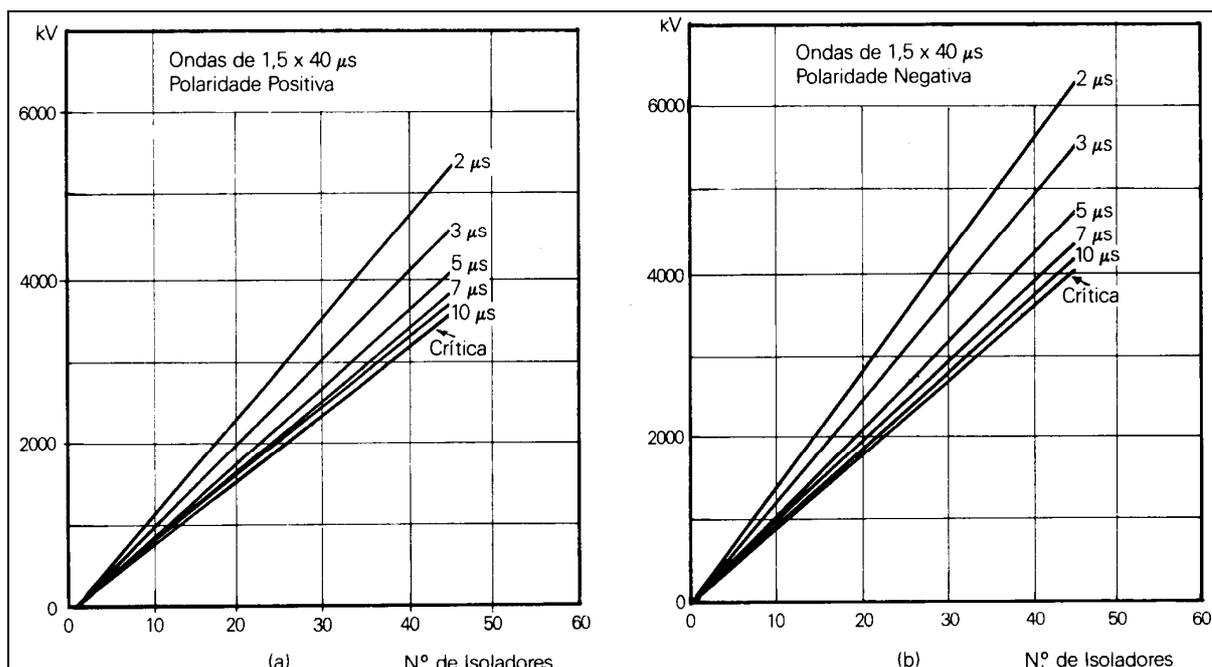


Figura 8 – Tensão Crítica Disruptiva em Função do Número de Isoladores [15]

## 2.5 Impedância de Surto das Torres

A impedância de surto das torres de uma linha de transmissão varia ao longo da torre e com o tempo, mas é possível se estabelecer uma magnitude constante, para a qual se obtém uma variação da tensão de topo de torre bastante próxima daquela que ocorreria na prática [15].

Através da utilização de modelos em escala reduzida e análises baseadas em métodos de ondas trafegantes, foi possível determinar a impedância de surto de torres de linhas de transmissão.

Foram injetadas correntes com várias formas de onda e medidas as tensões de topo de torre. Para cada forma de onda de corrente considerada, foram calculadas as tensões de topo de torre para vários valores de impedância de surto das torres. Inicialmente, foram considerados valores invariantes com o tempo e, caso a correlação entre os valores medidos e os valores calculados não estivesse satisfatória, novos cálculos eram realizados, assumindo uma característica dependente com o tempo.

A Figura 9 mostra uma comparação entre valores de tensões de topo de torre medidos no modelo e valores calculados, apresentados em unidade de volts por 1 A aplicado.

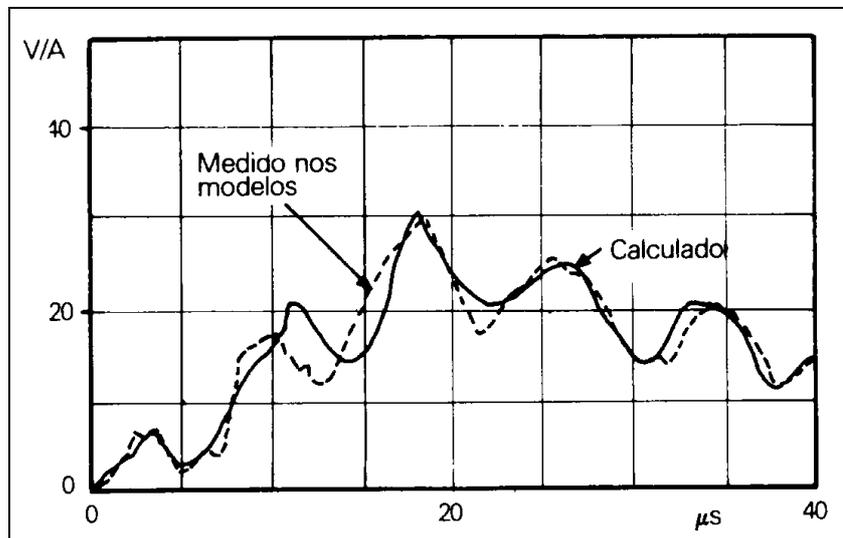


Figura 9 – Comparação entre Valores Calculados e Medidos [15]

Os resultados dos estudos, realizados nos modelos em escala reduzida, indicaram que a torre poderia ser corretamente representada através de uma linha de transmissão de impedância de surto constante e tempo de propagação obtido da altura da torre, considerando a velocidade de propagação da luz.

Dessa forma, é recomendada a utilização das Equação 2 e Equação 3 para torres de circuito duplo e de configuração cilíndrica, respectivamente.

$$Z = 60L_n \left( \frac{\sqrt{2}}{S} \right) \quad \text{Equação 2}$$

$$Z = 60L_n \sqrt{2} \left( 2 \cdot \frac{h}{r} \right) - 60 \quad \text{Equação 3}$$

Onde,

S = valor do seno da metade do ângulo superior de um cone fictício superposto à torre;

h = altura do cilindro equivalente

r = raio do cilindro equivalente

## 2.6 Distúrbios em Qualidade de Energia

O termo qualidade de energia é aplicado a uma ampla faixa de fenômenos eletromagnéticos ocorridos em sistema elétricos. Estes fenômenos, genericamente estão resumidos às variações da forma de onda ideal de corrente e de tensão, caracterizando respectivamente, os distúrbios de tensão e os distúrbios de corrente.

Os fenômenos de qualidade de energia podem ser divididos em dois tipos.

- As características de tensão e corrente são constantemente diferentes das formas de ondas ideais.
- As características desviam significativamente e momentaneamente das formas de ondas ideais de corrente e tensão.

Estas duas vertentes são caracterizadas por diferentes distúrbios e devem ser tratadas de forma diferenciada.

A Tabela 2 Mostra os diferentes tipos de distúrbios de tensão, categorizados por duração e magnitude [12].

*Tabela 2*  
*Características de Fenômenos Eletromagnéticos no sistema Elétrico [12]*

	<b>Categorias</b>	<b>Contudo Espectral Típico</b>	<b>Duração Típica</b>	<b>Magnitude de</b>
1.0	Transitórios			
1.1	Impulsivo			
1.1.1	Nanosegundo	Taxa de Crescimento de 5ns	<50ns	
1.1.2	Microsegundo	Taxa de Crescimento de 1 $\mu$ s	50ns ~ 1ms	
1.1.3	Milisegundo	Taxa de Crescimento de 0,1ms	>1ms	
1.2	Oscilatório			
1.2.1	Baixa Freqüência	<5kHz	0,3 ~ 50ms	0 ~ 4pu
1.2.2	Média Freqüência	5 ~ 500kHz	20 $\mu$ s	0 ~ 8pu
1.2.3	Alta Freqüência	0,5 ~ 5MHz	5 $\mu$ s	0 ~ 4pu
2.0	Variações de Curta Duração			
2.1	Instantâneo			
2.1.1	Interrupção		0,5 ~ 30ciclos	<0,1pu
2.1.2	Sag		0,5 ~ 30ciclos	0,1 ~ 0,9pu
2.1.3	Swell		0,5 ~ 30ciclos	1,1 ~ 1,8pu
2.2	Momentâneo			
2.2.1	Interrupção		30ciclos ~ 3s	<0,1pu
2.2.2	Sag		30ciclos ~ 3s	0,1 ~ 0,9pu
2.2.3	Swell		30ciclos ~ 3s	1,1 ~ 1,4pu
2.3	Temporário			
2.3.1	Interrupção		3s ~ 1min	<0,1pu
2.3.2	Sag		3s ~ 1min	0,1 ~ 0,9pu
2.3.3	Swell		3s ~ 1min	1,1 ~ 1,2pu
3.0	Variações de Longa Duração			
3.1	Interrupção Mantida		>1min	0,0pu
3.2	Subtensão		>1min	0,8 ~ 0,9pu
3.3	Sobretensão		>1min	1,1 ~ 1,2pu
4.0	Desbalanceamento de Tensão		Estado Permanente	0,5 ~ 2%
5.0	Distorção na Forma de Onda			
5.1	Deslocamento DC		Estado Permanente	0 ~ 0,1%
5.2	Harmônicos	Harmônicas de 0 ~ 100°	Estado Permanente	0 ~ 20%
5.3	Interharmônicos	0 ~ 6kHz	Estado Permanente	0 ~ 2%
5.4	Notching		Estado Permanente	
5.5	Ruído	Em toda a banda	Estado Permanente	0 ~ 1%
6.0	Flutuações de Tensão	< 25Hz	Intermitente	0,1 ~ 7%
7.0	Variações na Freqüência de Linha		<10s	

A seguir serão conceituados alguns dos distúrbios eletromagnéticos mais representativos em desempenho de linhas de transmissão.

### 2.6.1 Transitório Impulsivo

São caracterizados por variação repentina nas condições de estado permanente da tensão, corrente ou ambos, sendo unidirecional em polaridade. O transitório impulsivo é normalmente caracterizado pelos seus tempos de subida e descaimento. Como já mencionado em itens anteriores deste trabalho, uma onda tipicamente utilizada para representar a onda de corrente de descarga, tem como parâmetros de tempos os valores de  $1,2 \times 50 \mu\text{s}$ , o que representa um transitório impulsivo que cresce de zero até seu valor de pico em  $1,2 \mu\text{s}$  e então decai para metade deste valor de amplitude em  $50 \mu\text{s}$ .

Em linhas de transmissão, a causa principal de transitórios impulsivos são as descargas atmosféricas.

O transitório impulsivo pode por sua vez, excitar as frequências naturais do sistema elétrico produzindo os *transitórios oscilatórios*.

### 2.6.2 Transitório Oscilatório

Trata-se de uma variação repentina nas condições de estado permanente da tensão, corrente ou ambos, onde estão presentes variações de polaridade positivas e negativas.

O transitório oscilatório é normalmente caracterizado pelo seu conteúdo espectral, duração e magnitude.

Os transitórios oscilatórios cuja componente de frequência fundamental seja inferior a 5 kHz, com duração típica de 0,3 a 50 milisegundos são considerados transitórios de baixa frequência. São geralmente gerados por efeitos de energização de equipamentos como transformadores e capacitores, podendo também, estarem relacionados com fenômenos de ferroressonância.

Os transitórios oscilatórios cuja componente de frequência fundamental se encontre entre 5 e 500kHz, com duração típica de dezenas de milisegundos são considerados transitórios de média frequência. Os transitórios de média frequência são geralmente, resultantes de respostas do sistema elétrico à excitação por transitórios impulsivos ou da energização de capacitores.

Os transitórios oscilatórios cuja componente de frequência fundamental seja superior a 500kHz, com duração típica na ordem de microssegundos são considerados transitórios de alta frequência. São tipicamente resultantes da excitação do sistema elétrico por transitórios impulsivos.

Em todas as suas características, os transitórios oscilatórios devem ser bem entendidos e interpretados quando se estuda o desempenho de linhas de transmissão.

## **2.7 Distúrbios de Tensão**

A maioria absoluta dos eventos de interesse está associada aos eventos de redução ou elevação da tensão nominal de trabalho – distúrbios de tensão.

Um distúrbio de tensão é um (significante) desvio da tensão nominal de trabalho por um período limitado [11].

A Figura 10 sugere uma classificação destes distúrbios de uma forma bem clara e de fácil interpretação.

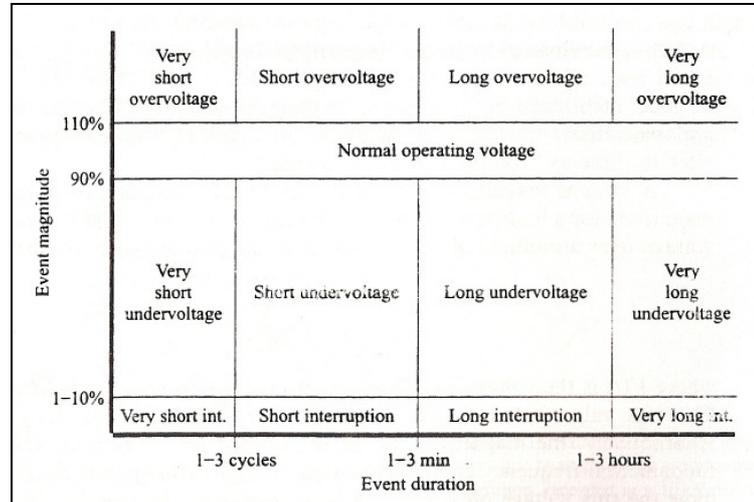


Figura 10 – Classificação dos Distúrbios de Tensão [11]

### 2.7.1 Variação de Tensão de Curta Duração

Dependendo de sua duração, pode ser designada como momentânea, instantânea ou temporária. Ocorre devido a vários fatores que podem ser caracterizados pelo efeito causado no sistema elétrico. Por exemplo, a energização de grandes cargas, como a partida direta de grandes motores, pode causar afundamentos momentâneos no perfil da tensão, fenômeno também conhecido como *sag*. A energização de bancos de capacitores, por exemplo, pode causar elevação no perfil da tensão, fenômeno também conhecido por *swell*. Outro tipo ocorrência também comum em sistemas de energia são as interrupções rápidas que podem ter como causadoras, as más conexões, por exemplo.

A condição da falta pode estar perto ou longe do ponto de interesse. Em ambos os casos, o impacto da tensão durante as condições de falta representa uma variação de curta duração, até que os dispositivos de proteção, devidamente ajustados, entrem em operação para eliminar a falta [4].

### 2.7.2 Variação de Tensão de Longa Duração

As subtensões, sobretensões e interrupções, quando com duração superior a 1 minuto são classificadas como variações de tensão de longa duração. Diferentemente das variações de curta duração, estas não são devidas a faltas no sistema, podendo portanto, serem consequência destas. Suas causas mais comuns são manobras no sistema elétrico com grandes despachos de carga, rejeição de carga e chaveamento no sistema.

### 2.7.3 Desbalanceamento de Tensão

É dado por um fenômeno ocorrido em sistema trifásico, onde o valor rms de tensão ou o ângulo entre fases consecutivas, não são iguais[11]. A intensidade do desbalanceamento pode ser dada por três parâmetros:

- Desbalanceamento e corrente negativa
- Amplitude do desbalanceamento
- Desbalanceamento de fase.

A causa principal deste tipo de distúrbio no sistema é devida a grandes cargas monofásicas conectadas ao sistema trifásico.

### 2.7.4 Distorção Harmônica de Tensão

Quando a forma de onda da tensão é constantemente diferente de uma senoide, constata-se uma distorção harmônica de tensão. Esta forma de onda periódica pode ser considerada como a soma de ondas senoidais com frequências múltiplas da fundamental.

A maior contribuição para a geração da distorção harmônica em sistemas de energia são as cargas não lineares. Há uma crescente demanda por cargas alimentadas por conversores

eletrônicos de potência que por suas características de funcionamento, produzem correntes não senoidais com componentes harmônicos.

### 2.7.5 Flutuação de Tensão

Se o fluxo de potencia para a carga varia, a amplitude da tensão também varia. Quando esta variação é grande suficiente ou está dentro de uma faixa crítica de frequência, a performance dos equipamentos pode ser afetada [11]. Esta cintilação é claramente percebida em cargas de iluminação. Também conhecido por *flicker*, este fenômeno é caracterizado por variações geralmente entre 1 e 10Hz, na iluminação, perceptíveis pelo cérebro humano.

### 2.7.6 Variações na Frequência

Assim como a amplitude da tensão, sua frequência também não é constante. As variações ocorrem em função do balanço entre carga e geração.

Variações acima dos limites aceitáveis de operação em regime permanente podem ter conseqüências relevantes à operação dos sistemas de energia.

São geralmente geradas por desconexão de grandes blocos de carga ou perda de grandes fontes geradoras.

Os itens anteriores têm por função passar uma visão geral dos principais fenômenos de qualidade de energia presentes nos sistemas de energia elétrica.

As descargas atmosféricas são fontes de vários dos distúrbios de tensão apresentados nos itens acima. Alguns, como os transitórios impulsivos e as sobretensões, têm relação direta com a corrente de descarga, outros, porém, têm sua geração como conseqüência dos distúrbios diretos.

Para melhores entendimento e desenvolvimento deste trabalho, dar-se-á maior ênfase ao distúrbio *sobretensão*, caracterizado pelo principal causador de desligamentos em linhas de transmissão devido a descargas atmosféricas.

## 2.8 Sobretensões

Por definição, uma sobretensão é uma tensão variável no tempo, entre fase e terra ou entre fases, cujo valor de crista é superior ao valor de crista da tensão máxima de um sistema [15].

De acordo com a origem da sobretensão, pode-se classificá-las em dois tipos, internas e externas. As sobretensões internas recebem esta classificação devido aos fenômenos que a originam serem iniciados dentro do sistema de potência, como manobras de cargas ou curtos circuitos. As sobretensões externas têm sua origem em fenômenos externos ao sistema de potência, sendo as descargas atmosféricas, o maior responsável.

Utilizando o grau de amortecimento e o tempo de duração de uma sobretensão, pode-se elaborar a uma distinção mais criteriosa, chega-se então a três categorias de sobretensão: Sobretensões Temporárias, Sobretensões de Manobra e Sobretensões Atmosféricas.

O conhecimento das características de cada uma das categorias de sobretensões citadas acima e de seus impactos no sistema de energia elétrica é de suma importância para definições de projeto e de operação do sistema.

Este texto tem, entre as categorias apresentadas, as sobretensões atmosféricas como foco absoluto de seu desenvolvimento, porém, a seguir serão citadas e exemplificadas as sobretensões de manobra e também as sobretensões temporárias.

Antes, porém, vale dizer que a transição entre as categorias pode não ser fielmente definida. É possível que alguns surtos possam se enquadrar em mais de uma categoria, como é o caso de surtos atmosféricos transferidos do primário para o secundário de transformadores que têm características semelhantes a surtos de manobra.

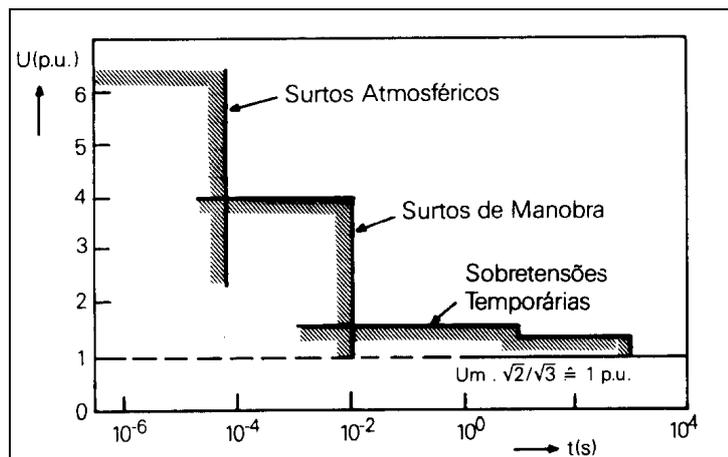


Figura 11 – Representação Esquemática dos Diferentes Tipos de Sobretensão em Sistema EAT

### 2.8.1 Sobretensões Temporárias

A sobretensão temporária é uma sobretensão fase terra ou entre fases, dada em um determinado ponto do sistema, oscilatória, de duração relativamente longa e fracamente amortecida ou mesmo não amortecida.

De forma geral, podem ser caracterizadas pelos parâmetros seguintes:

*Amplitude:* inferior a 1,5 pu.

*Frequência de oscilação:* igual, maior ou menor que a fundamental.

*Duração total:* superior a dezenas de milisegundos.

Estas características de amortecimento e duração, a fazem uma sobretensão determinante em projetos de isolamento de equipamentos, mesmo tendo suas amplitudes inferiores às das outras categorias de sobretensões.

Faltas para a terra e rejeições de blocos de cargas são os motivos mais comuns destes tipos de sobretensões.

### 2.8.2 Sobretensões de Manobra

Sobretensão de manobra é uma sobretensão fase terra ou entre fases, em um dado ponto do sistema, devido à operação de um equipamento, de manobra, falta ou outra causa, cuja forma de onda, para fins de coordenação do isolamento, é similar á onda de impulso de manobra utilizada para ensaio. Tal sobretensão é em geral, fortemente amortecida e de curta duração [15].

Os parâmetros de tempo citados acima são relacionados ao tempo de frente de onda e ao tempo até meio valor. A diferença entre estes valores faz a distinção entre sobretensões de manobra e atmosféricas. Dessa forma, sobretensões com tempo de frente de onda entre 100 e 500  $\mu\text{s}$  (correspondentes às frequências de 10 kHz a 2 kHz) e com tempo de meio valor na ordem de 2500  $\mu\text{s}$ , são geralmente consideradas como sobretensões de manobra.

A amplitude e a duração das sobretensões de manobra podem variar dadas as condições e a configuração do sistema no momento da manobra.

A energização e religamento de linhas e aplicação e eliminação de faltas são exemplos comuns de originadores de sobretensões de manobra.

### 2.8.3 Sobretensões Atmosféricas

São caracterizadas por sobretensões fase terra ou entre fases em um dado ponto do sistema, devida a uma descarga atmosférica ou outra causa, cuja forma de onda pode ser considerada para fins de coordenação do isolamento, similar a uma onda de impulso atmosférico normalizada utilizada em laboratório.

As sobretensões atmosféricas se distinguem das sobretensões de manobra nos parâmetros de tempo. Tempos de frente de onda até 20  $\mu\text{s}$  (correspondentes à frequências de 50 kHz) e tempo de meia onda da ordem de 50  $\mu\text{s}$ , caracterizam os surtos atmosféricos.

## 2.9 Descargas Atmosféricas em Linhas de Transmissão

Conforme dito anteriormente, ao atingir um sistema de energia elétrica, uma descarga atmosférica provoca sobretensões de elevada amplitude nos equipamentos componentes do sistema. Esta sobretensão varia em função de vários parâmetros já conceituados neste capítulo podendo chegar a patamares superiores à suportabilidade da isolação.

Quando isto ocorre, como conseqüência haverá a rompimento do dielétrico desta isolação e um arco elétrico será formado, o qual será mantido pela tensão de regime do sistema.

Neste momento os dispositivos de proteção do sistema devem entrar em ação, eliminando este curto circuito o mais rápido possível.

Os efeitos deste arco elétrico no isolamento de equipamentos pode ser devastador assim como pode sequer ser sentido. Em cadeias de isoladores ou gaps de isolamento à ar por

exemplo, esta sobretensão com conseqüente disrupção dielétrica, geralmente não produz dano algum. Porém, em equipamentos com isolamento sólido, como motores e geradores, o dano usualmente é permanente.

Para se entender melhor o efeito das sobretensões em sistemas de potência e posteriormente se discutir os métodos de proteção aplicáveis, é necessário o entendimento dos conceitos de propagação de surtos, impedância de surto e amortecimento que serão apresentados a seguir.

### 2.9.1 Ondas Viajantes (Propagação de surtos)

Ao atingir uma linha de transmissão, uma descarga atmosférica gera ondas trafegantes de tensão e de corrente que se propagam pelos meios físicos do sistema, refletindo e refratando em toda conexão que apresente mudança de impedância.

Antes, porém, de entrarmos nos conceitos de propagação de ondas, vale ressaltar que são os surtos de tensão os causadores dos danos em sistemas de potência e não os surtos de corrente. A corrente de descarga, apesar de elevada amplitude, tem tempos de duração bastante reduzidos, permitindo, portanto, que mesmo um condutor de diâmetro pequeno suporte sua condução. Já os surtos de tensão associados podem facilmente atingir valores superiores à suportabilidade do dielétrico, resultando então, nos danos aos equipamentos do sistema e nas interrupções no fornecimento de energia elétrica.

Usando uma linha ideal e infinita como condutor, pode-se dizer que ao excitá-la, surgirão ondas trafegantes de tensão e corrente donde pode-se concluir o seguinte:

- O tempo de variação da tensão e da corrente em qualquer ponto é idêntico ao tempo de variação na fonte, considerando apenas a defasagem entre os pontos considerados.

- As formas de onda da corrente e da tensão em qualquer ponto são geometricamente similares, respeitando a relação  $\frac{v}{i} = Z_0$ , onde  $Z_0$  é a impedância de surto, dada por  $Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$ .
- A velocidade da propagação é dada por  $c = \sqrt{\frac{1}{LC}}$ . Em resumo, uma onda trafegando em uma linha ideal se propaga sem amortecimento por uma impedância  $Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$  com velocidade  $c = \sqrt{\frac{1}{LC}}$  [16].

Onde:

$L$  = indutância por unidade de comprimento

$C$  = capacitância por unidade de comprimento

Uma vez apresentados os principais conceitos sobre ondas viajantes, pode-se passar para a descrição dos efeitos nos sistemas de energia elétrica, causados pelas descargas atmosféricas.

Uma linha de transmissão pode sofrer desligamentos provenientes da incidência de descargas atmosféricas diretamente nos cabos condutores, nos cabos pára-raios e nas torres ou mesmo da incidência de descargas próximas à linha de transmissão.

Desta forma, pode-se classificar as descargas atmosféricas em duas categorias. *Descargas diretas*, quando ocorrem diretamente nos cabos condutores da linha e *descargas indiretas*, quando ocorrem nas torres, cabos pára-raios ou nas proximidades.

Neste estudo, não será tratada a incidência de raios nas proximidades linha, visto que a probabilidade de um desligamento por este motivo é muito pequena em linhas de transmissão

de 69 kV e se reduz ainda mais na medida em que a tensão de operação se eleva, podendo ser considerado como irrelevante em linhas de transmissão em extra alta tensão.

### 2.9.2 Descargas Diretas

A incidência direta de uma descarga atmosférica nos cabos condutores de uma linha de transmissão é denominada *Falha de Blindagem* e resulta em uma elevada sobretensão que depende do valor da corrente de descarga, da impedância de surto da linha, do valor instantâneo da tensão de fase, mas que geralmente causa desligamento no sistema de transmissão. Para ter-se parâmetros mais reais, considerada uma descarga de 30 kA no cabo fase de em uma linha de transmissão com impedância característica de 400  $\Omega$ , surgirá uma sobretensão de aproximadamente 6.000 kV. Valor suficiente para exceder a suportabilidade de qualquer um dos equipamentos envolvidos no sistema de transmissão.

Portanto, o emprego de artifício limitadores destas sobretensões se torna obrigatório para atingir um desempenho satisfatório.

Para melhor entendimento, será apresentada uma breve descrição do conceito de blindagem de linhas de transmissão.

Conforme já mencionados neste capítulo, os parâmetros envolvidos na formação de uma descarga atmosférica são muitos e de entendimento bastante complexo. Porém, modelos baseados em medições e estudos analíticos apresentam excelentes aproximações e resultados.

Há um modelo utilizado para simulação de desempenho de linhas de transmissão denominado *Modelo Eletrogeométrico* que pode nos ilustrar com clareza e simplicidade o mecanismo de blindagem de linhas de transmissão. Este modelo recebe este nome por relacionar a geometria das linhas de transmissão com o mecanismo de formação de descargas atmosféricas, através da distância crítica de atração ou salto final.

Esta relação entre o mecanismo de formação de descargas atmosféricas e a geometria da linha de transmissão pode ser melhor compreendida se considerarmos que campos elétricos de grande intensidade são estabelecidos nas proximidades de uma linhas de transmissão devidos às cargas deslocadas pela descarga piloto em sua progressão descendente, provocando um movimento ascendente de cargas em direção á ponta da descarga piloto.

Esse movimento ascendente pode deslocar o curso original da descarga piloto, redirecionando-a para o solo, cabo condutor ou cabos guarda. Desta forma, pode afirmar que o ponto de conexão do canal de descarga é indefinido até que a descarga piloto atinja uma determinada distância acima do solo.

Basicamente, a distância crítica de atração ( $r_s$ ) está relacionada com a intensidade de corrente de descarga ( $I_o$ ) através do fator  $r_s = 9I_o^{0,65}$ . Dessa forma, o salto final tende a se direcionar para o caminho mais próximo, que pode ser o solo, os cabos pára-raios e as torres ou mesmo os cabos condutores.



efeitos podem ser minimizados e absorvidos pelo sistema elétrico, sem que haja maiores danos ou prejuízos.

A incidência de uma descarga atmosférica nos cabos pára-raios ou nas torres de uma linha de transmissão dá início a um complexo mecanismo de formação de sobretensão no isolamento desta linha, onde todos os seus componentes, desde o cabo condutor até a resistividade do solo nas proximidades do ponto da descarga, são variáveis de influência na composição e nos valores da tensão final na cadeia de isoladores.

O entendimento deste mecanismo é fundamental para a compreensão do desenvolvimento deste trabalho e, portanto, o presente capítulo abordará com maiores detalhes, os conceitos e componentes envolvidos na sua formação. Para tal, serão conceituados, separadamente cada mecanismo de formação do *backflashover* de acordo com os três possíveis pontos de conexão do canal de descarga.

- Descargas nas Torres

Quando uma descarga atmosférica atinge uma das torres de uma linha de transmissão, inicia-se um processo de propagação de ondas de corrente e tensão nos cabos pára-raios, nas torres vizinhas e nos aterramentos das torres. Em cada ponto de descontinuidade ou mudança de impedância, ocorrem reflexões.

A Figura 13 ilustra o início deste mecanismo.

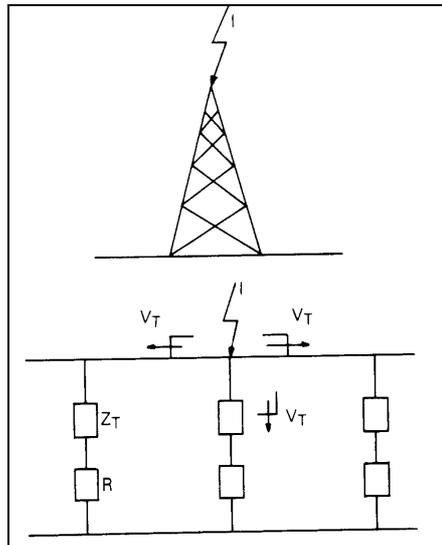


Figura 13 – Descarga na torre [15]

A tensão resultante da descarga é calculada pelo produto da corrente de descarga que percorre a torre, pelo valor da impedância de surto equivalente, vista neste ponto. Conforme mencionado, a cada descontinuidade ou diferença de impedâncias, ocorrem reflexões que alteram o formato desta onda de tensão.

A propagação de surtos nos cabos pára-raios induz, nos condutores fase, o aparecimento de ondas de tensão acopladas – fenômeno que será detalhado no próximo item do presente capítulo. Dessa forma, a cadeia de isoladores, que é o ponto onde o isolamento entre os cabos pára-raios e condutores é mais fraco, ficará sujeita à diferença entre a tensão no topo da torre e a tensão induzida no condutor.

O valor da resistência de pé de torre é bastante significativo para o desenvolvimento da tensão de topo de torre porque, sendo normalmente inferior à impedância de surto da torre, o coeficiente de reflexão para as ondas que são refletidas na base da torre é negativo, fazendo com que o crescimento da tensão no topo da torre sofra uma acentuada redução num intervalo de tempo relativamente pequeno por causa da altura da torre.

O coeficiente de reflexão para as ondas refletidas nas torres adjacentes é também negativo, fazendo com que as tensões refletidas sejam de polaridade inversa, mas, como o tempo de propagação relativo ao vão é da ordem de 10 vezes superior ao tempo de propagação na torre, estas ondas refletidas podem chegar à torre atingida num instante em que a tensão no topo da torre já tenha passado pelo seu valor máximo [15].

- Descarga nos cabos pára raios

Quando um raio atinge o cabo pára-raios apresenta como característica básica uma tensão no ponto de incidência muito maior do que para a incidência nas torres. Para uma descarga atingindo o cabo pára-raios em algum ponto ao longo do vão, a tensão resultante será dada por:

$$V_M = \frac{I}{2} \cdot Z_g \quad \text{Equação 4}$$

Esta tensão atingirá valores tanto maiores quanto maior for o afastamento em relação às torres.

Portanto, o meio do vão será o ponto de incidência que provoca o maior crescimento da tensão. Este fato pode ser facilmente entendido se considerarmos que a impedância de surto vista do ponto de incidência é muito maior neste caso do que no caso de descargas nas torres, além do que o efeito das torres adjacentes e sistemas de aterramento só começa a ser sentido após duas vezes o tempo de propagação até as torres mais próximas.

A tensão à qual o isolamento em ar entre os cabos pára-raios e condutores ficará submetido, é consideravelmente maior do que a tensão à qual a cadeia de isoladores ficaria submetida se uma descarga de mesma intensidade atingisse a torre. Normalmente, a flecha

dos cabos pára-raios é bem menor do que a dos condutores e logo, eles estarão suficientemente afastados para impedir a ocorrência de desligamentos devido à ruptura do isolamento entre condutores e pára-raios ao longo do vão.

Assumindo que não ocorreu a falha no meio do vão, a onda de tensão  $V_M$  irá trafegar pelo cabo pára-raio em direção às torres adjacentes, onde será atenuada por reflexões. A torre se apresenta como uma descontinuidade para as ondas que chegam pelos cabos pára-raios. Assim, ondas refletidas retomam ao ponto de impacto da descarga atmosférica enquanto duas ondas refratadas são geradas. Uma seguirá para o próximo vão pelo cabo pára-raios e a outra pela torre até o solo.

Para descargas atingindo os cabos pára-raios, as máximas solicitações que serão impostas ao isolamento das torres são da mesma ordem de grandeza daquelas onde a torre é atingida diretamente.

Assim, descargas no meio do vão podem resultar na ocorrência de falhas na torre embora nada tenha ocorrido ao longo do vão.

## 2.10 Solicitação do Isolamento

Durante a queda de raios nas torres ou nos cabos pára-raios de uma linha de transmissão, a solicitação sobre o isolamento da linha é uma composição da tensão no ponto de fixação da cadeia de isoladores, da tensão instantânea de cada fase e da tensão induzida em cada fase. No caso da solicitação no ponto de incidência, para queda nos pára-raios ao longo do vão considera-se a tensão no próprio ponto incidência, a tensão induzida em cada fase e a tensão instantânea de cada fase.

### 2.10.1 Acoplamento

Devido à proximidade existente entre os cabos pára-raios e cabos condutores, o acoplamento resultante entre eles é significativo, sendo de natureza eletromagnética. Os valores envolvidos neste fenômeno dependem das intensidades das ondas viajantes de tensão e corrente provenientes da corrente de descarga atmosférica e, conseqüentemente das impedâncias características próprias e mutuas dos cabos envolvidos.

Tal efeito se dá devido à sobretensão no cabo pára-raios, originada pela incidência de uma descarga de corrente atmosférica no mesmo. A tensão induzida nos cabos fase é dada em função da tensão nos cabos pára-raios. Logo, há uma relação de proporção fixa entre estes valores.

$$K_{PR} = \frac{V_{\phi}}{V_{PR}} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

$V_{\phi}$  = tensão no cabo fase

$V_{PR}$  = tensão no cabo pára-raios

Esta relação é conhecida como coeficiente de acoplamento entre um cabo pára-raios e um cabo fase,  $K_{PR}$ , é dado pela Equação 6, cujas variáveis  $b$ ,  $a$ ,  $H$  e  $r$  são indicadas na Figura 14(a).

$$K_{PR} = \frac{\log\left(\frac{b}{a}\right)}{\log\left(\frac{2 \cdot H}{r}\right)} \quad \text{Equação 6}$$

Caso haja dois cabos pára-raios, o fator de acoplamento,  $K_{PR2}$ , é dado pela Equação 7 cujas variáveis  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $H$ ,  $r$ ,  $b_1$  e  $b_2$  são indicadas na Figura 14(b).

$$K_{PR} = \frac{\log\left(\frac{b_1 b_2}{a_1 a_2}\right)}{\log\left(\frac{2 \cdot H}{\sqrt{ar}}\right)}$$

Equação 7

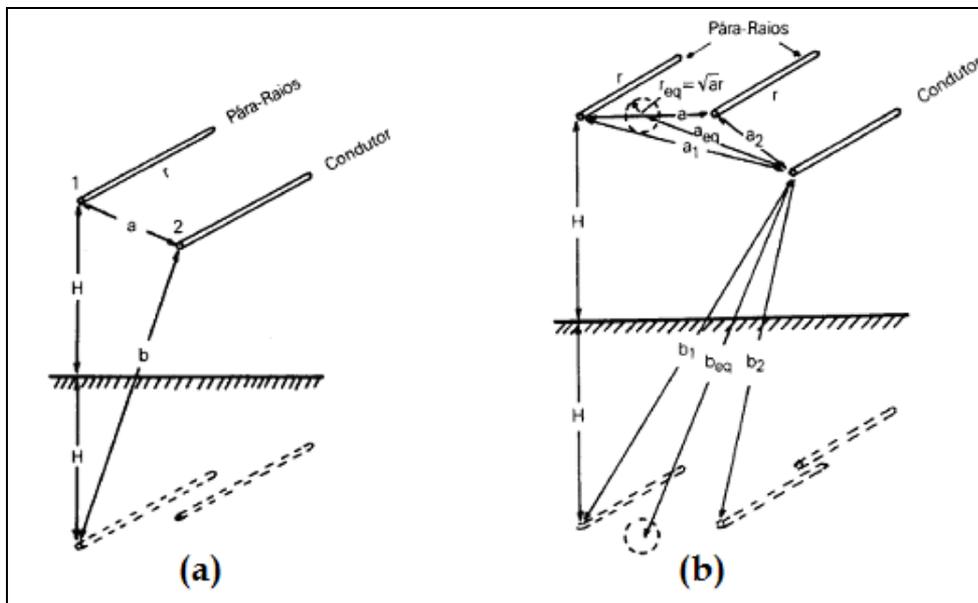


Figura 14 - Parâmetros Necessários para o Cálculo dos Fatores de Acoplamento de Linhas (a) com um Cabo Pára-Raios e (b) com dois Cabos Pára-Raios [6]

O fundamento principal deste trabalho baseia-se no conceito apresentado anteriormente.

A introdução de um cabo guarda extra no circuito de uma linha de transmissão, localizado abaixo dos cabos condutores, apesar do nome atribuído, nada tem a ver com a blindagem contra descargas diretas. O objetivo é aumentar o acoplamento com as fases inferiores da torre, apontadas como as fases mais solicitadas durante um processo de *backflashover*.

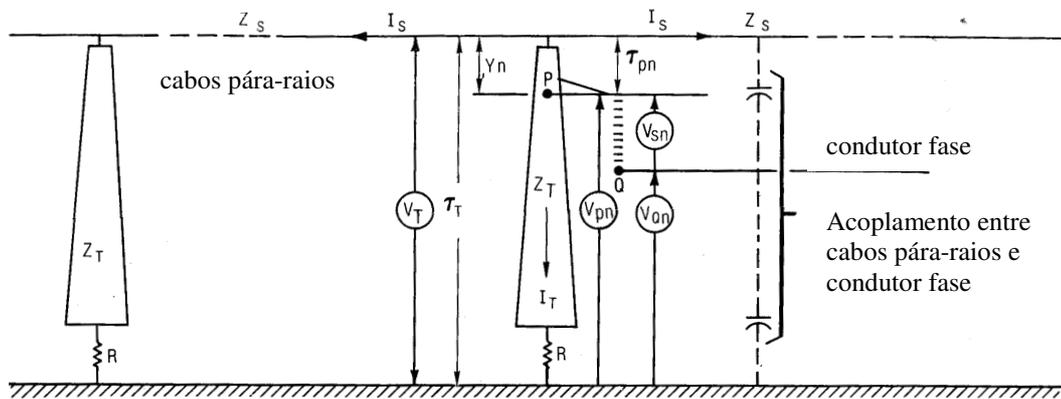


Figura 15 – Elementos Básicos Presentes na Formação de Sobretensão nos Isoladores

A Figura 15 representa os elementos básicos presentes na formação de uma sobretensão na cadeia de isoladores de uma linha de transmissão com um cabo para-raios sobre o condutor fase.

Neste caso, a tensão acoplada no condutor fase,  $V_{qn}$  é bem inferior à tensão estabelecida na mísula,  $V_{pn}$ . Uma vez que a tensão resultante na cadeia de isoladores,  $V_{sn}$ , é dada pela diferença entre  $V_{qn}$  e  $V_{pn}$ , tem-se uma tensão elevada na cadeia de isoladores, propiciando a disrupção.

Com o cabo guarda extra - EGW,  $V_{qn}$  assume um novo valor, definido entre as tensões do cabo pára-raios superior e do próprio EGW, se tornando próxima a  $V_{pn}$  e consequentemente diminuindo a tensão resultante na cadeia de isoladores,  $V_{sn}$ .

## Capítulo 3

# Simulações

## 3.1 Introdução

Descargas atmosféricas quando atingem as torres, cabos ou qualquer outro componente de um sistema de transmissão de energia elétrica, podem provocar interrupções no fornecimento ou mesmo danos à equipamentos, provenientes das elevadas sobretensões geradas no fenômeno.

Estes fenômenos, por sua natureza física, são imprevisíveis quanto à maioria de seus parâmetros, portanto, usualmente, estudos envolvendo descargas atmosféricas utilizam informações estatísticas baseadas nestes parâmetros [17].

Experimentos em laboratórios são na sua maioria, caros e limitados às capacidades de corrente e tensão dos geradores e dos componentes envolvidos nos testes [18]. Ferramentas computacionais para simulação deste tipo de fenômeno que permitem a modelagem de redes

complexas envolvendo componentes elétricos são, portanto largamente utilizadas como uma alternativa barata, sem riscos e de excelentes resultados.

## 3.2 Objetivos

A formulação dos resultados deste trabalho passa por duas etapas principais, simulações e tratamento estatístico. A primeira delas, a etapa de simulações, será apresentada neste capítulo.

As simulações se desenvolvem com base em dois objetivos, já citados previamente, mas que para melhor compreensão da seqüência de simulações, serão comentados a seguir.

*Avaliação comparativa do desempenho da linha de transmissão frente a backflashover, considerando a utilização de cabo guarda extra.*

*Cálculo explícito das tensões impostas á cadeia de isoladores durante o fenômeno.*

Para tal, os itens a seguir apresentam os parâmetros trabalhados para modelamento da linha em estudo e das condições definidas para as simulações. Apresenta ainda os parâmetros que representam a inclusão do segundo cabo pára-raios no circuito desta linha de transmissão.

Para encerrar, é apresentado o circuito definido para realização das simulações, que determinarão a massa de dados necessária para o conhecimento das tensões resultantes nas cadeias de isoladores.

## 3.3 Descarga Atmosférica

Conforme mencionado no capítulo anterior, a forma de onda e os parâmetros da corrente de descarga podem apresentar variações bastante significativas, porém, ao se constituir referências adequadas para comparação entre os registros adquiridos, nota-se que a composição do corpo principal da onda e as variações nos parâmetros mantêm determinados comportamentos que nos permite criar representações com resultados bastante satisfatórios.

No intuito de propiciar simulações envolvendo a injeção de corrente de uma descarga atmosférica em um circuito elétrico, diferentes funções analíticas são propostas e encontradas na literatura, algumas mais complexas, outras, com funções matemáticas mais simples.

A escolha da função que melhor represente a corrente descarga atmosférica depende do objeto de estudo. São comumente utilizadas três representações, a *Dupla Exponencial*, a *Curva de Heidler* e a *Triangular*.

### 3.2.1 Dupla exponencial

A grande utilização desta representação decorre da facilidade de sua geração em laboratório. Pode ser obtida através da simples descarga de um capacitor sobre um circuito *R//RC*.

A onda constitui-se da soma de duas ondas exponenciais de sinais contrários e constantes de tempo de valores muito diferentes. No instante inicial, ambas as ondas têm mesma amplitude, resultando em um valor nulo para a soma. Enquanto a onda positiva se atenua lentamente no tempo, muito rapidamente a onda negativa se anula e a onda resultante tem aspecto impulsivo [1].

É prudente destacar que esta onda não é absolutamente representativa da onda real de descarga, porém tem resultados muito satisfatórios em simulações e é, conforme mencionado, de fácil geração em laboratório.

### 3.2.2 Curva de Heidler

No intuito de suprir a falta de representatividade de curva Dupla Exponencial, o alemão Heidler [22] propôs esta função.

Sua principal diferença frente à Dupla Exponencial é a composição da característica côncava encontrada nos instantes iniciais da onda real de corrente de descarga.

A introdução das constantes apresentadas abaixo na expressão analítica permite o ajuste independente da amplitude, derivada máxima e da carga transferida. Esta facilidade é refletida na extensa utilização desta representação, sobretudo nas simulações para avaliação dos efeitos gerados pelo fluxo de corrente de retorno.

$$I(t) = \frac{I_0}{\eta} \frac{(t/\tau_1)^n}{1 + (t/\tau_1)^n} e^{(-t/\tau_2)}, \text{ onde } \eta = e^{[-(\tau_1/\tau_2)(n\tau_2/\tau_1)^{(1/n)}]} \quad \text{Equação 8}$$

$I_0$  = Amplitude de corrente na base do canal

$\tau_1$  = Relacionada ao tempo de frente da onda de corrente

$\tau_2$  = Relacionada ao tempo de decaimento da onda de corrente

$\eta$  = Fator de correção da amplitude

$n$  = Expoente (2 a 10)

### 3.2.3 Triangular

A curva triangular é a de expressão matemática mais simples dentro das apresentadas neste tópico. Porém, é bastante utilizada e tem resultados excelentes em determinadas aplicações.

Os resultados deste trabalho são de caráter comparativo, portanto, uma representação mais complexa da onda de corrente, não se faz necessária. Dessa forma, foi utilizada a representação pela Curva Triangular, conseguida através da função *Surge Generator* do *PSCAD*.

A função foi parametrizada de forma gerar três diferentes tipos de forma de onda, conforme a Tabela 3

Tabela 3  
Curvas de Representação da Corrente de Descarga

Parâmetro	Tempo ( $\mu\text{s}$ )		
Início da subida	0	0	0
Fim da subida	1	2	5
Início do decaimento	1,1	2,1	5,1
Fim do decaimento	100	100	100

A Figura 16, mostra as três diferentes representações das correntes de descargas atmosféricas utilizadas no estudo.

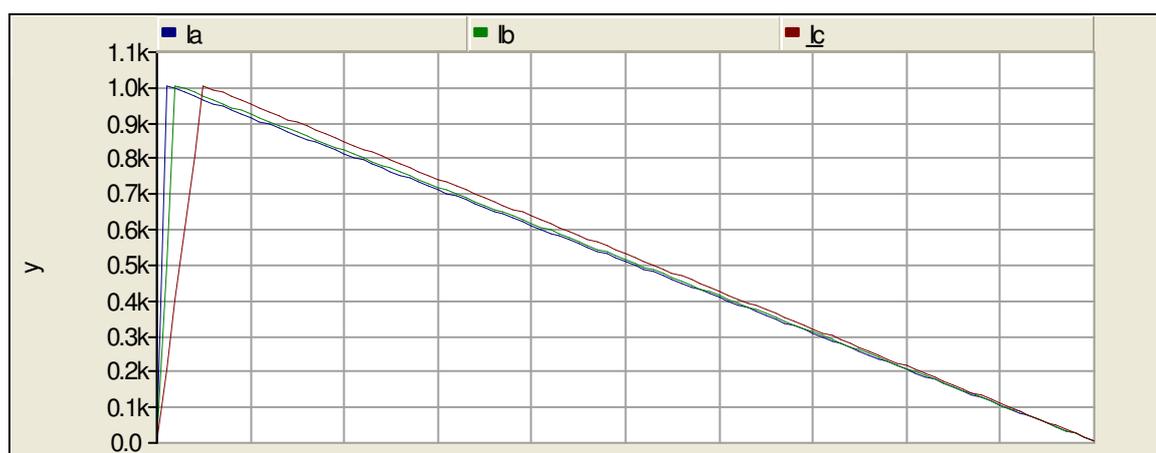


Figura 16 – Forma de Onda da Corrente de Descarga no PSCAD

### 3.4 Torre

As torres de uma linha de transmissão podem ser representadas por diferentes maneiras. Indutâncias simples, modelos tridimensionais e parâmetros de linhas de transmissão verticais são algumas opções.

A representação por meio de uma linha de transmissão vertical curta com impedância de surto constante e aterrada em uma extremidade pela impedância de pé de torre é

usualmente adotada, pois possibilita uma integração completa com outras modelagens de equipamentos elétricos e tem excelentes resultados.

Esta representação considera o comprimento da torre, impedância de surto e a velocidade de propagação. Dessa forma, o tempo de propagação é facilmente determinado.

Foi utilizada neste estudo, a representação através de uma linha de transmissão vertical com o modelo de Bergeron. Os dados de entrada no modelo são a impedância de surto e o tempo de propagação.

Valores típicos de impedância de surto variam entre  $100\Omega$  e  $300\Omega$ . Aproximações por classes de geometria de torres, conforme a Figura 17, são práticas de resultados bastante próximos dos encontrados em medições e simulações com modelos em escala reduzida.

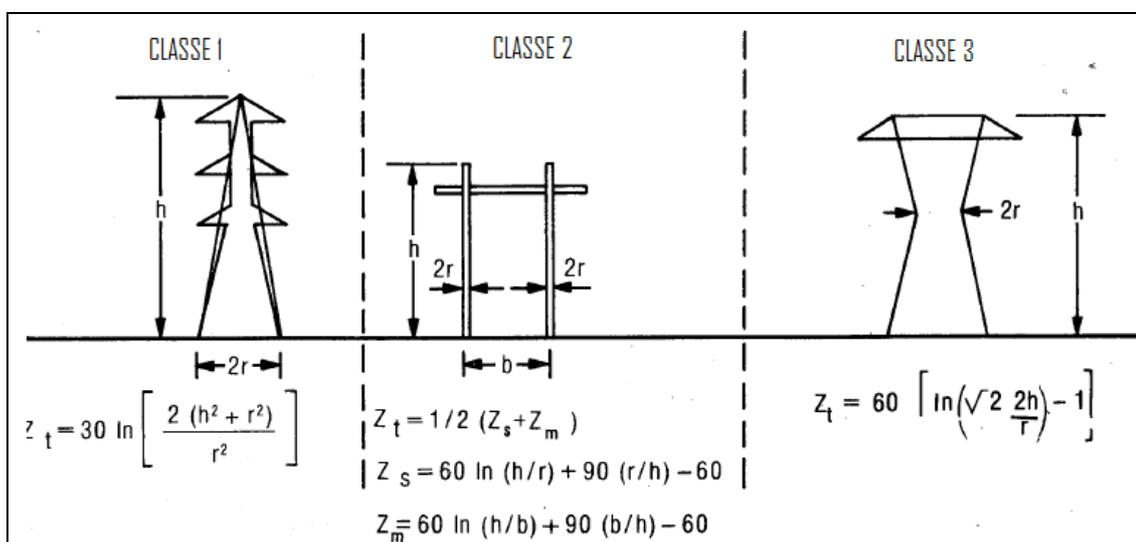


Figura 17 – Aproximação da Impedância de Surto  $Z_t$  por Classes de Geometria [6]

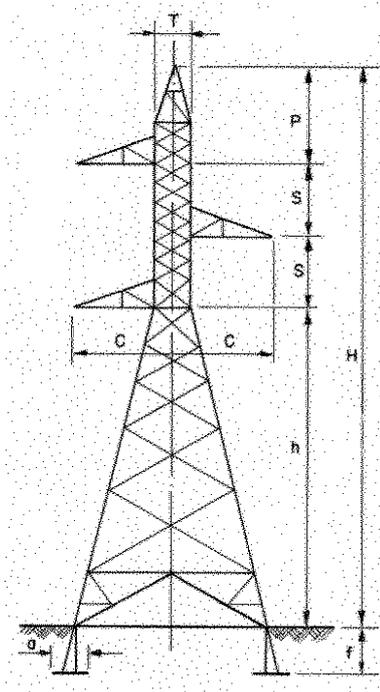
A torre utilizada neste estudo tem geometria semelhante as torres de Classe 1 (ver Figura 18), portanto, para cálculo da impedância de surto, foi utilizada a seguinte expressão:

$$Z_t = 30 \ln \left( 2 \frac{h^2 + r^2}{r^2} \right)$$

*Equação 9*

Onde:

- altura da torre (h) = 20,30 metros
- raio da base (r) = 4 metros



Estrutura	h	H	T	P	S	C	a	f
S13	15.00 m	20.30 m	0.70 m	2.30 m	1.50 m	2.00 m	0.86 x 0.90 m	1.75 m

*Figura 18 – Estrutura Tipo S13*

$$Z_t = 30 \ln \left( 2 \frac{h^2 + r^2}{r^2} \right)$$
$$Z_t = 30 \ln \left( 2 \frac{20,30^2 + 4^2}{4^2} \right) = 120 \Omega$$

O tempo de trânsito ( $\tau$ ) é dado pelo comprimento total da torre dividido pela velocidade de propagação da onda através do corpo da torre, dada pela velocidade da luz, 300 m/ $\mu$ s.

### 3.5 Aterramento

Para modelar o sistema de aterramento da linha de transmissão em estudo, foram levantados os dados referentes às características do solo e referentes ao tipo de aterramento utilizado.

Conforme mencionando no Capítulo 1 deste trabalho, a região geográfica onde está a instalação em estudo tem solo de características próprias e com variações significativas quando comparadas às características da região.

Desta forma, foi realizada a medição da resistividade do solo ao longo das instalações da linha de transmissão. Para tal, foi utilizado o método de Frank Werner, com sondas cravadas a profundidade de 0,30 metros. A norma utilizada como referência é a NBR 7117/1981.

As Figura 19 e Figura 20 mostram o gráfico da estratificação do solo em duas camadas e o respectivo diagrama, ilustrando os valores encontrados nas medições.

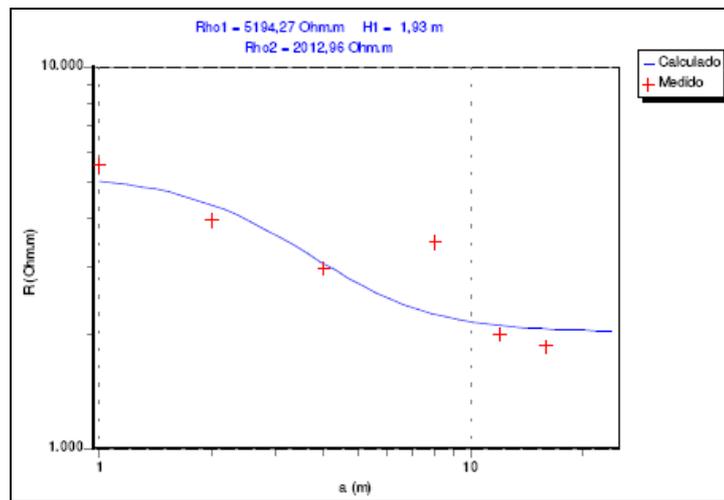


Figura 19 – Gráfico da Estratificação do Solo

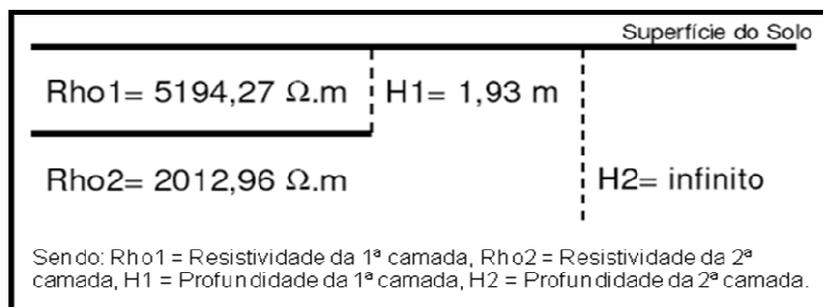


Figura 20 – Diagrama da Estratificação do Solo em Duas Camadas

O sistema de aterramento utilizado na linha de transmissão em estudo é composto por quatro cabos contra peso formados por fio tipo arame galvanizado de 5 mm de bitola.

A determinação da resistência equivalente desta configuração para modelagem no software PSCAD, apesar de simples, não se fez necessária, uma vez que há a medição recente da impedância de aterramento de todas as torres da linha em estudo.

O método utilizado para medição da impedância de aterramento foi o Método da Queda de Potencial, com comprimento da sonda de corrente de 100 metros. Norma 5410/1997.

A Figura 21 apresenta os valores encontrados e a Figura 22 ilustra as medições realizadas na Torre n° 4.

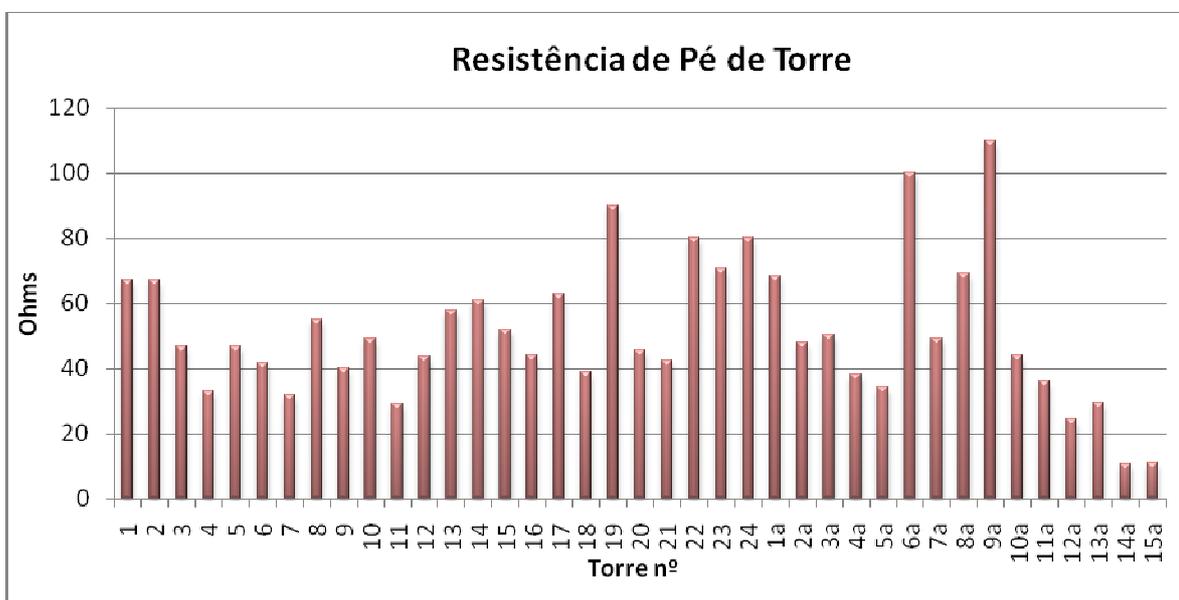


Figura 21 – Resistência de Aterramento Medida

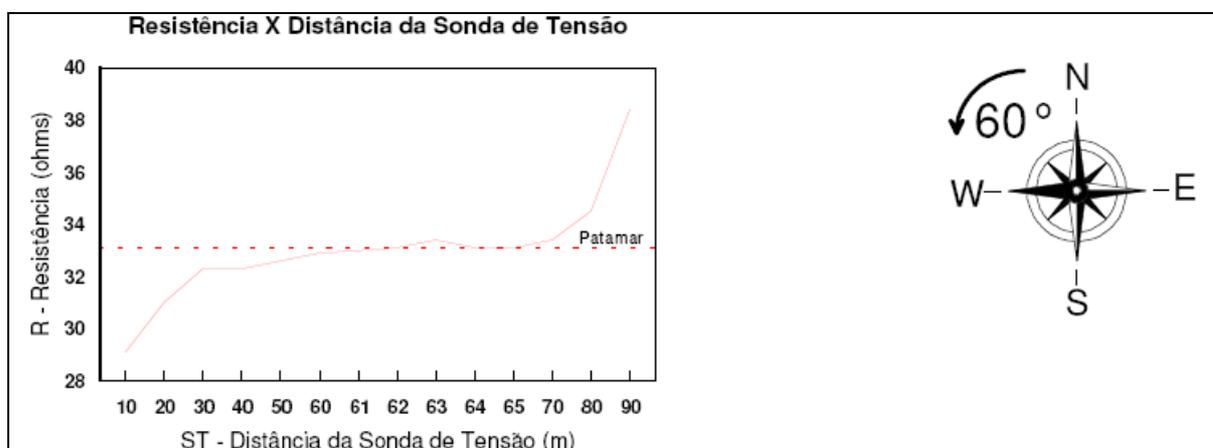


Figura 22 – Resultado da Medição da Impedância de Aterramento

### 3.6 Dados Mecânicos Gerais

A distância mínima de projeto do condutor ao solo, à 50° C, é de 7 metros, o vão médio é de 250 metros e o vão máximo de 735 metros.

Os cabos condutores são do tipo “PENGUIM”, de seguintes características:

- Seção: 107 mm<sup>2</sup>;
- Formação: 6/1 fios;
- Carga de ruptura: 3820 Kgf;
- Peso próprio: 0,4325/m.

O cabo pára-raios é do tipo aço galvanizado, com as seguintes características:

- Seção: 38,30 mm<sup>2</sup>;
- Formação: 7 fios;
- Carga de ruptura: 3630 Kgf;
- Peso próprio: 0,305 Kgf/m

A modelagem no software PSCAD foi realizada a partir do bloco chamado “Line Tower Universal” que permite a entrada manual dos parâmetros da linha.

Dessa forma, a partir das distâncias geométricas da torres, mostradas na Figura 18, das características mecânicas informadas neste item e dos dados dos cabos pára-raios e condutores, foi criado o modelo para a linha de transmissão em estudo.

A Figura 23 mostra a máscara de entrada dos dados da linha de transmissão no software PSCAD.

Tower: S13				Tower Centre 0 [m]			
Conductors: PENGUIM				Ground_Wires: 5/16" Aço Galv. HS 7 fios			
Cond. #	Connection Phasing #	X (from tower centre)	Y (at tower)	GW. #	Connection Phasing #	X (from tower centre)	Y (at tower)
1	2	-2 [m]	18 [m]	1	1	0 [m]	20.3 [m]
2	3	2 [m]	16.5 [m]				
3	4	-2 [m]	15 [m]				

*Figura 23 – Máscara de Entrada de Dados da LT no SW PSCAD*

O modelo utilizado para a linha de transmissão foi “Frequency Dependent (Phase) Model”. Este modelo foi escolhido por prover com boa precisão, simulações com em um extenso range de frequências, atendendo assim as exigências de resultados em simulações que envolvem frequências de descargas atmosféricas.

### 3.7 Circuito de Simulações

A Figura 24 ilustra o circuito utilizado nas simulações no software PSCAD.

Algumas considerações devem ser feitas para melhor entendimento do circuito e dos resultados obtidos nas simulações.

1. Os vãos 1 e 4 foram parametrizados como de comprimento infinito. Dessa forma, as reflexões nas torres posteriores às torres vizinhas ao ponto de descarga não são consideradas nas simulações;
2. As torres localizadas entre os vão 1 e 2 e entre o vão 3 e 4 são representadas por dois segmentos de linha de transmissão. Como os comprimentos dos segmentos de linha de transmissão são dados de entrada manual, este recurso permite a introdução de um segundo cabo pára-raios na posição desejada ao longo do comprimento da torre;
3. A torre entre o vão 2 e 3 é representada por três segmentos de linhas de transmissão. Este é o ponto considerado para injeção da corrente de descarga e medição da sobretensão na cadeia de isoladores. Portanto, nesta torre são necessários três pontos de conexão para os dois cabos pára-raios e o condutor.
4. A resistência encontrada no último segmento de linha de transmissão vertical de cada torre representa a resistência de pé de torre, lembrando que, conforme mencionado no item 3.5 deste capítulo, os dados de resistividade do solo são fornecidos ao software no bloco de entrada de dados da linha de transmissão.
5. A tensão resultante na cadeia de isoladores é medida no circuito, pelo elemento  $V_{iso23}$ .



## Capítulo 4

# Desenvolvimento

## 4.1 Introdução

Este capítulo mostrará cada etapa do desenvolvimento do trabalho e seus respectivos resultados. É importante reforçar neste momento, que este estudo, conforme explicitado em seu objetivo, tem como finalidade, apresentar soluções de engenharia financeiramente viáveis, para melhoria do desempenho de linhas de transmissão.

Portanto, este capítulo se iniciará por uma etapa investigativa, onde foram testados alguns modelos até que fosse encontrada a melhor representação da linha de transmissão em estudo. Uma vez definido o modelo da linha, a segunda etapa se caracteriza pela inserção do segundo cabo pára-raios na linha de transmissão em estudo.

Nesta nova configuração, foram realizados alguns testes objetivando a melhor posição para fixação do segundo cabo pára-raios ou, como será denominado no decorrer do texto, cabo guarda extra.

Na seqüência, foram iniciadas as simulações comparativas das sobretensões resultantes nas cadeias de isoladores das linhas de transmissão, com cabo pára-raios extra e com configuração tradicional, para diferentes valores de três parâmetros de grande relevância em estudos de desempenho de linhas de transmissão: resistência de aterramento, vão entre torres e tempo de frente de onda da corrente de descarga.

A partir de diversas simulações envolvendo a variação destes parâmetros e considerando a natureza probabilística da corrente de descarga, foram calculadas as probabilidades de disrupção do isolamento e comparados seus resultados. A redução conseguida como emprego do cabo guarda extra, foi trabalhada para ser apresentada em função da resistência de aterramento.

A manipulação desta comparação gerou uma expressão analítica que aplicada aos valores reais de resistência de aterramento, resultou na redução real conseguida com a utilização do cabo guarda extra.

Utilizando o software FLASH, foram avaliadas opções de melhoria no desempenho da linha de transmissão em estudo, objetivando o mesmo patamar atingido com o emprego do cabo guarda extra, porém, avaliando intervenções no isolamento e no aterramento da linha de transmissão.

A última etapa materializa as hipóteses tecnicamente viáveis de melhoria de desempenho, numa análise dos investimentos para cada uma destas hipóteses.

Para melhor entendimento e visualização da seqüência de trabalho, a Tabela 4 consolida e titula cada etapa do desenvolvimento.

*Tabela 4*  
*Etapas do Desenvolvimento*

Etapa 1	-	Teste de Modelos
Etapa 2	-	Teste com Cabo Pára-raios Extra
Etapa 3	-	Simulações Comparativas
Etapa 4	-	Probabilidades de Disrupção
Etapa 5	-	Alternativas de Melhoria de Desempenho
Etapa 6	-	Análise Financeira

## **4.2 Etapa 1 – Teste de Modelos**

A partir dos dados reais da linha de transmissão em estudo, foram criados os primeiros modelos para simulação.

A flexibilidade exigida nas simulações devido a alterações nas configurações típicas de linhas de transmissão, uma vez que seria introduzido um cabo guarda extra em posições geométricas diferentes das comumente adotadas, nos condicionou à busca por um software de maior agilidade e flexibilidade de entrada de dados.

Dessa forma, foi adotado o software PSCAD como ferramenta deste trabalho. E assim, com maior liberdade para alteração nos parâmetros de entrada de dados, foram criados os primeiros modelos.

O primeiro circuito de simulação utilizava indutâncias para representação das torres da linha de transmissão em estudo. A Figura 25 ilustra o resultado da aplicação de uma onda representativa de impulso atmosférico de 1kA de amplitude, no topo da torre da linha em estudo.

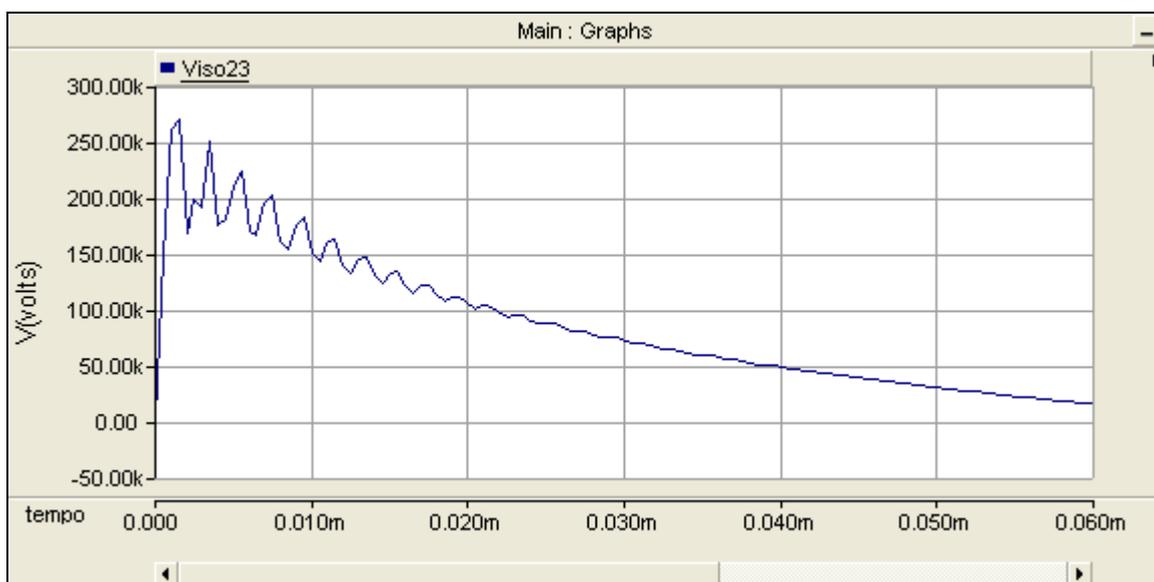


Figura 25 – Sobretensão na Cadeia de Isoladores – Torre Representada por Indutâncias

A maior dificuldade em encontrar resultados satisfatórios quando utilizando a representação das torres da linha de transmissão através de indutâncias, aconteceu ao determinar os valores das indutâncias para cada segmento da torre.

Isso aconteceu, pois houve a necessidade de “seccionar” a torre em três segmentos, da base ao ponto de conexão do cabo guarda extra, deste ponto até a conexão do cabo fase e o terceiro trecho compreendido entre o cabo fase e o cabo pára-raios superior.

A Figura 26 representa melhor esta condição.

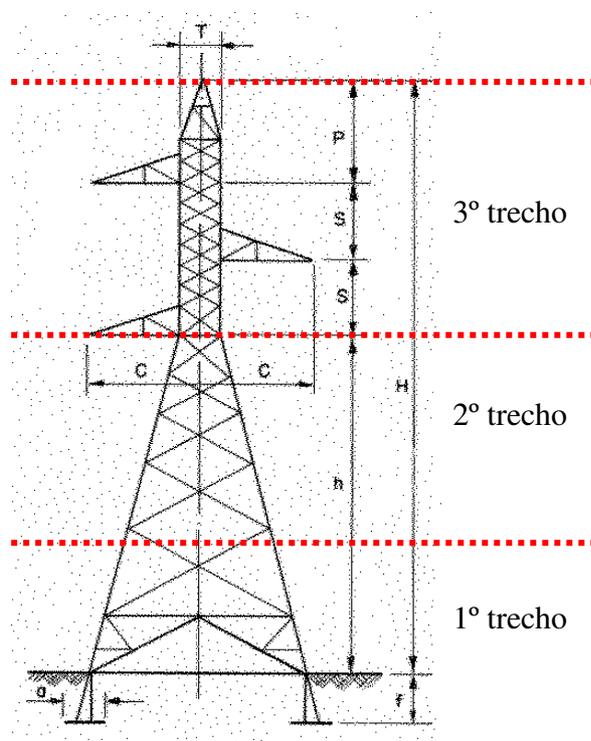


Figura 26 – Representação da Torre por Segmentos

Foram encontrados na literatura [6], alguns valores sugeridos para as indutâncias representativas. São valores encontrados a partir de ensaios em diversos tipos de torres e então agrupados por classes geométricas de torres. No primeiro modelo, foram utilizados os valores de indutância para cada segmento da torre, os quais variam de acordo com o diâmetro do trecho, conforme descrito na Tabela 5.

Tabela 5  
Valores de Indutância por Segmento da Torre

Torre	Valor sugerido
1º Segmento	0,2 $\mu\text{H}/\text{m}$
2º Segmento	0,3 $\mu\text{H}/\text{m}$
3º Segmento	0,6 $\mu\text{H}/\text{m}$

Os resultados encontrados com esta representação não foram totalmente satisfatórios. Conforme visto na Figura 25, o aparecimento de um comportamento oscilatório, mesmo que amortecido, dificulta a representação das reflexões e ainda, pode não ser a melhor representação da torre real conseguida em um modelo.

O segundo modelo testado, substitui a representação por indutâncias pela representação por uma linha de transmissão monofásica. Esta alternativa permite a entrada de dados mais próximos dos valores reais da torre.

A Figura 27 ilustra os resultados encontrados utilizando esta representação.

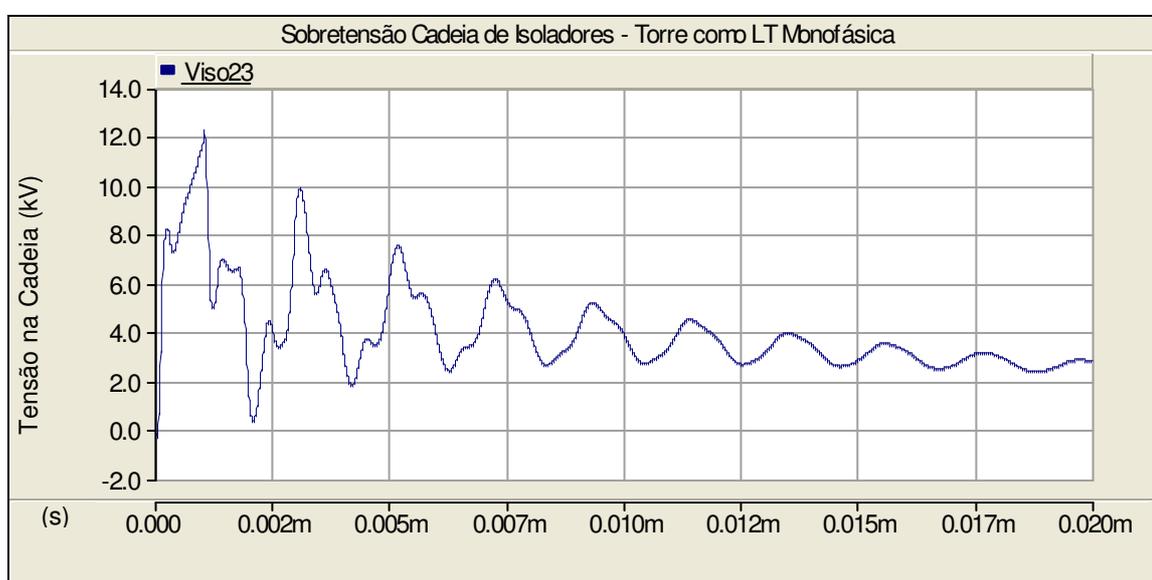


Figura 27 - Sobretensão na Cadeia de Isoladores – Torre Representada por LT monofásica

Foi adotada então, a representação por linhas de transmissão monofásica. Com esta definição, foi possível dar seqüência às simulações e inserir no circuito, o segundo cabo pára-raios.

De forma a simplificar a forma de trabalho com os modelos testados no software PSCAD, com vistas às várias alterações de posicionamento do cabo guarda extra, cabos fases e cabo pára-raios convencional, optou-se por adotar um modelo simplificado para representação da linha de transmissão em estudo, mas que contivesse porém, todos os dados necessários para as análises propostas.

O isolamento da fase situada na posição inferior da torre é, entre as três fases do sistema, o isolamento mais solicitado durante uma sobretensão atmosférica. Dessa forma, entende-se que um modelo onde apenas a fase C da linha de transmissão em estudo fosse considerada seria suficiente para o andamento do trabalho e suas devidas conclusões.

Para assegurar da decisão de adotar a representação por uma única fase, foi criado um modelo trifásico com apenas um cabo pára-raios, onde foi aplicada uma corrente de amplitude igual a 1kA, com tempo de frente de onda de  $5\mu\text{s}$ . Vale informar que a opção por este valor de tempo de frente de onda foi apenas para melhor visualização gráfica, visto que o mesmo comportamento pode ser encontrado com os outros valores de tempo de frente de onda utilizados nas simulações.

As Figura 28 e Figura 29 ilustram o comportamento das sobretensões nas três fases e nos seus isolamentos, respectivamente. Nota-se claramente a fase A como a fase de maior valor de tensão acoplada e a fase C como a de menor tensão acoplada. Conforme detalhado no capítulo 3, este comportamento é inverso quando analisamos a tensão resultante na cadeia de isoladores.

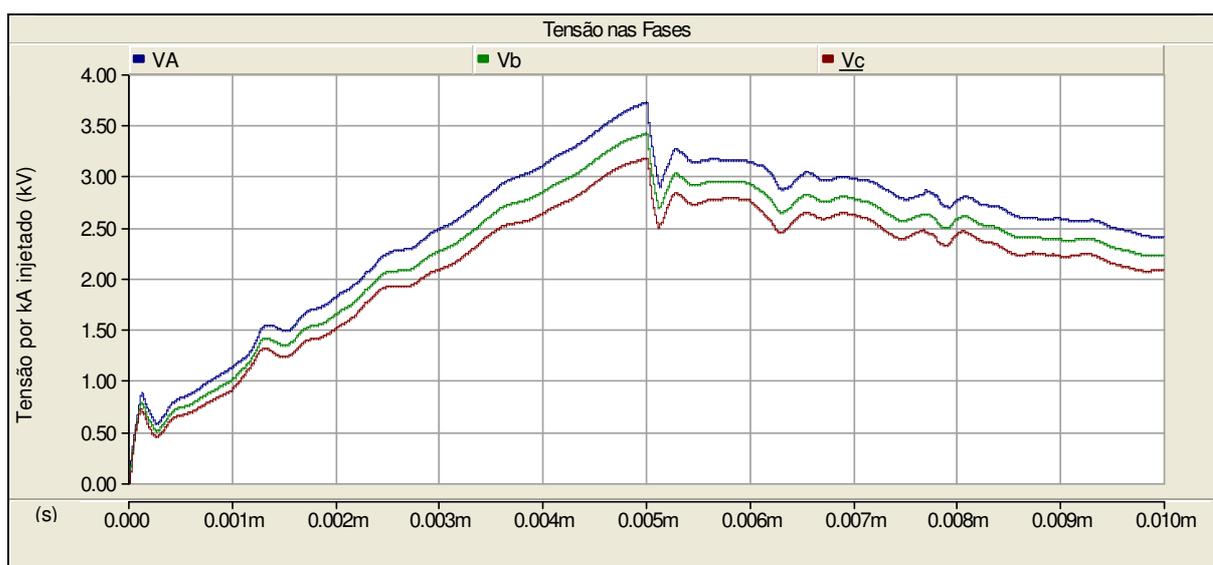


Figura 28 – Sobretensões nas fases para Injeção de 1kA com frente de onda de  $5\mu\text{s}$

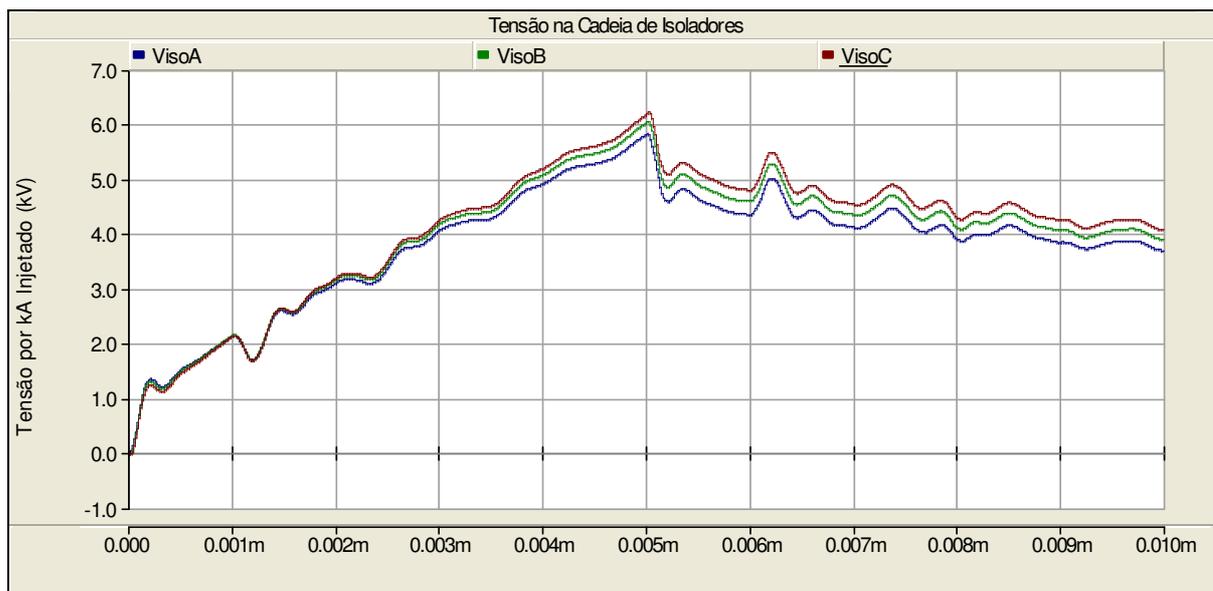


Figura 29 - Sobretensões nos isolamentos para Injeção de 1kA com frente de onda de  $5\mu\text{s}$

Estas curvas confirmam a maior sollicitação no isolamento da fase C e portanto, validam a decisão pelo modelo simplificado.

### 4.3 Etapa 2 – Testes com Cabo Guarda Extra

Como modelo básico definido, foi possível avançar para etapa considerada como crucial no desenvolvimento do trabalho. Os primeiros resultados destas simulações determinaram a continuidade do desenvolvimento do estudo.

Esta etapa insere o cabo guarda extra no circuito de simulação. Vários modelos foram testados, onde basicamente, a diferença esteve no posicionamento do cabo guarda extra.

Para melhor entendimento e visualização dos resultados, serão apresentadas três alternativas de posicionamento do cabo guarda extra, variando no eixo central da torre, conforme descrito a seguir.

- a) Acima da fase C – 15,75 metros do solo;
- b) Alinhado com a fase C – 15,00 metros do solo;
- c) Abaixo da fase C – 12,70 metros do solo.

Este agrupamento das várias alternativas simuladas, em apenas três, é suficientemente representativo, visto que os resultados encontrados dentro de cada um dos três grupos apresentaram pequena variação.

A Figura 30 ilustra as três alternativas apresentadas.

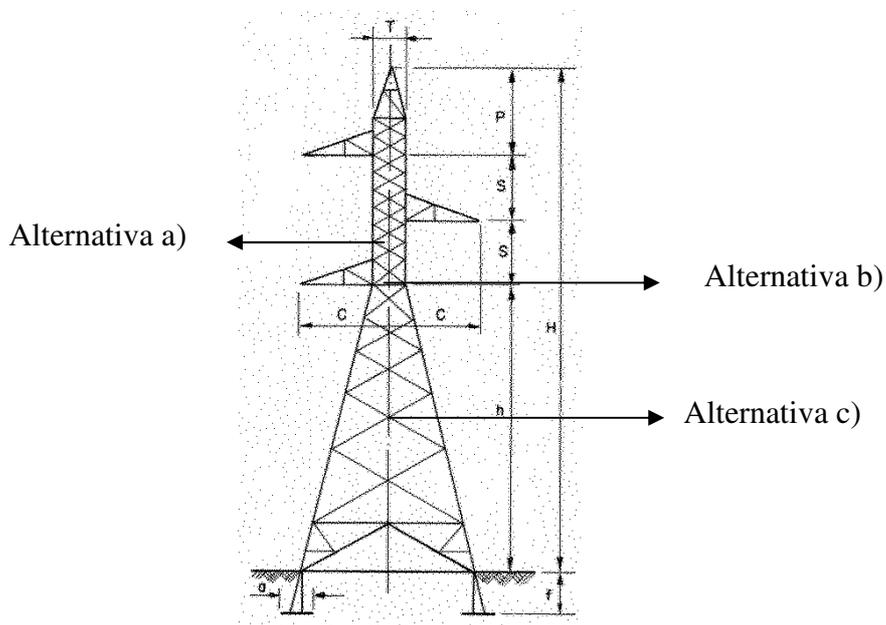


Figura 30 – Alternativas de posicionamento do cabo guarda extra

Para certificar das alterações no efeito do acoplamento nas fases de acordo com o posicionamento do cabo guarda extra, foi utilizado neste momento, o circuito trifásico.

A Figura 31 mostra o resultado para a alternativa com cabo guarda extra posicionado entre as fases C e B, à 15,75 metros do solo, com tempo de frente de onda de 1µs.

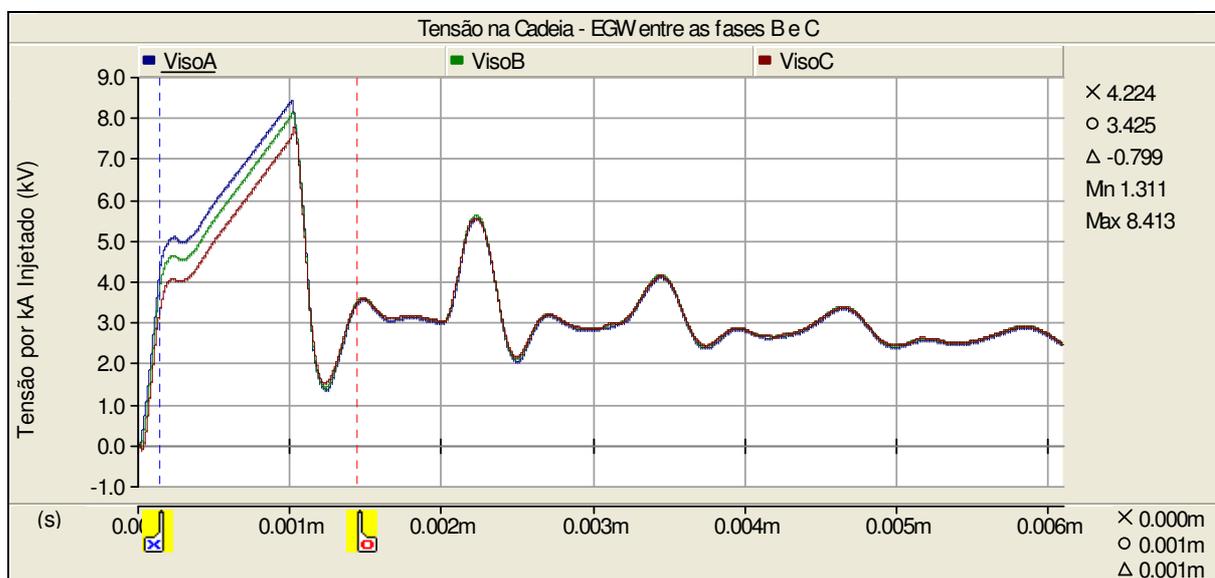


Figura 31 – Circuito trifásico com cabo guarda extra à 15,75 metros do solo

As Figura 32 e Figura 33 mostram os resultados encontrados para posicionamentos do cabo guarda extra conforme alternativas b) e c), respectivamente.

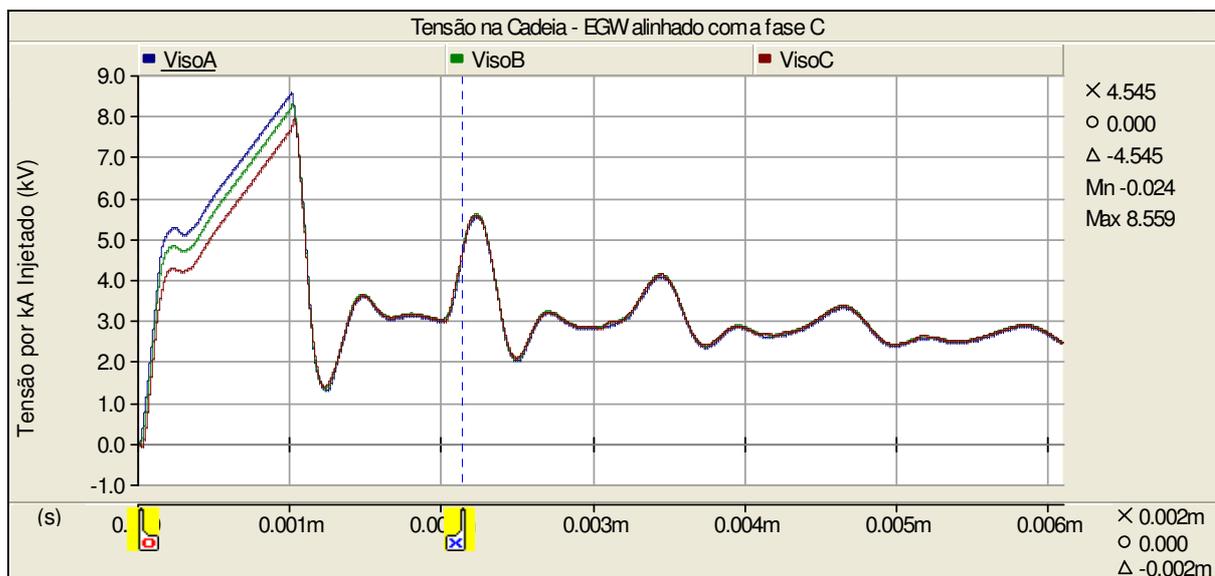


Figura 32 - Circuito trifásico com cabo guarda extra à 15,00 metros do solo

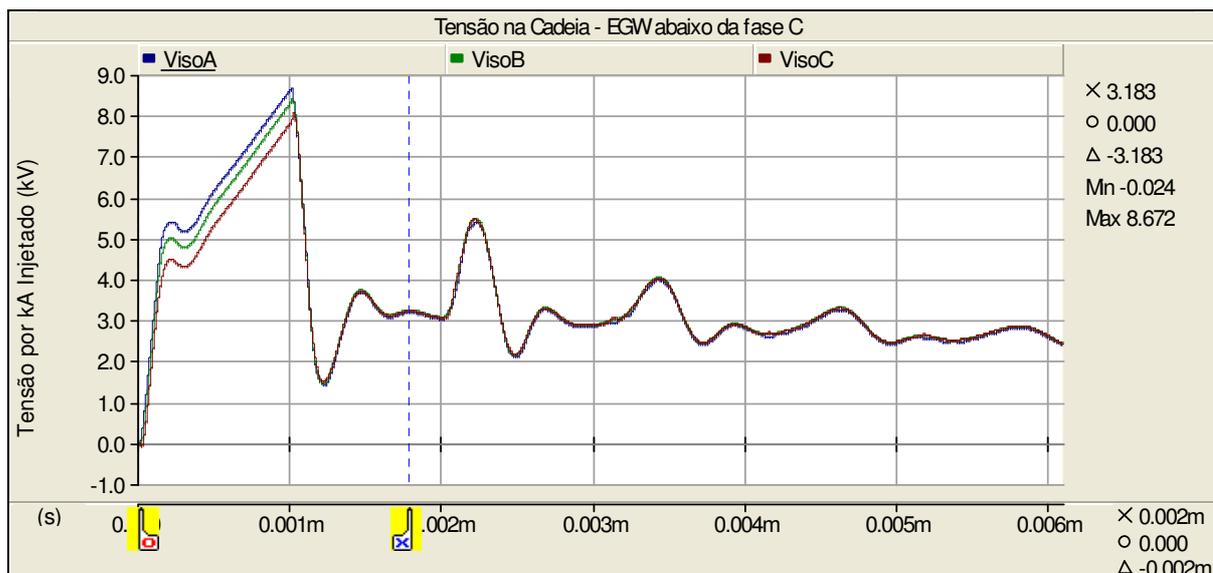


Figura 33 - Circuito trifásico com cabo guarda extra à 12,70 metros do solo

Nota-se através da Figura 31, Figura 32 e da Figura 33, nos valores máximos informados no lado direito de cada gráfico, que o menor valor de sobretensão encontrado, ou seja, o posicionamento do cabo guarda extra onde consegue-se o resultado mais positivo de acoplamento entre cabos fase e cabos pára-raios foi na alternativa a), cabo guarda extra posicionado entre as fases C e B.

Porém, há um impedimento obvio na adoção desta alternativa. Lançar um cabo entre os cabos das fases B e C e garantir as distâncias mínimas de isolamento pode não ser possível.

Em condições de ventos fortes ou de esforços mecânicos devido a curto circuitos, o balanço dos cabos, principalmente em vão mais longos – a linha em estudo possui vão máximo de 735 metros – pode permitir um distanciamento inferior ao mínimo permitido para a classe de tensão desta linha de transmissão e conseqüentemente ultrapassar a suportabilidade dielétrica causando curto circuito entre os cabos das fases B ou C e o cabo guarda extra.

Desta forma, a alternativa adotada para continuidade do estudo foi a alternativa c). É importante ressaltar que a diferença encontrada entre a alternativa adotada e a alternativa de

menor valor de sobretensão é relativamente pequena, 8,413kV na alternativa a) e 8,671kV na alternativa c), o que reforça a decisão pela alternativa c) para continuidade do trabalho.

#### **4.4 Etapa 3 – Simulações Comparativas**

Uma vez definida a configuração a ser adotada no decorrer do estudo, foram iniciadas as simulações que propiciariam a comparação entre resultados obtidos com a utilização do cabo guarda extra e resultados de desempenho da linha de transmissão de configuração tradicional.

Antes, porém, é importante salientar uma consideração sobre o ponto de conexão do cabo guarda extra. O isolamento para tensão de operação em 69 kV da linha em estudo possui cadeias em suspensão compostas por 5 isoladores e cadeias em ancoragem compostas por 6 isoladores. O traçado da linha exigiu uma relação de 3 cadeias em ancoragem para cada 1 cadeia de isoladores em suspensão.

Dessa forma, foram consideradas apenas cadeias em ancoragem para determinação do ponto de conexão do cabo guarda extra. A distância existente entre o cabo pára-raios e a fase A, localizada na parte superior da torre, foi aplicada também, à distância entre a fase C, localizada na parte inferior e o cabo guarda extra.

Nesta etapa, as simulações se desenvolveram com base em dois circuitos no software PSCAD. Para que os resultados comparativos não sofram qualquer interferência, foi certificado que a diferença entre os dois circuitos é a utilização do cabo guarda extra.

Para efeito comparativo entre os perfis das curvas geradas pelos dois circuitos, a Figura 34, exhibe os circuitos de simulação e os respectivos perfis.

Os resultados desta e das outras simulações serão apresentados com detalhes, logo a seguir.

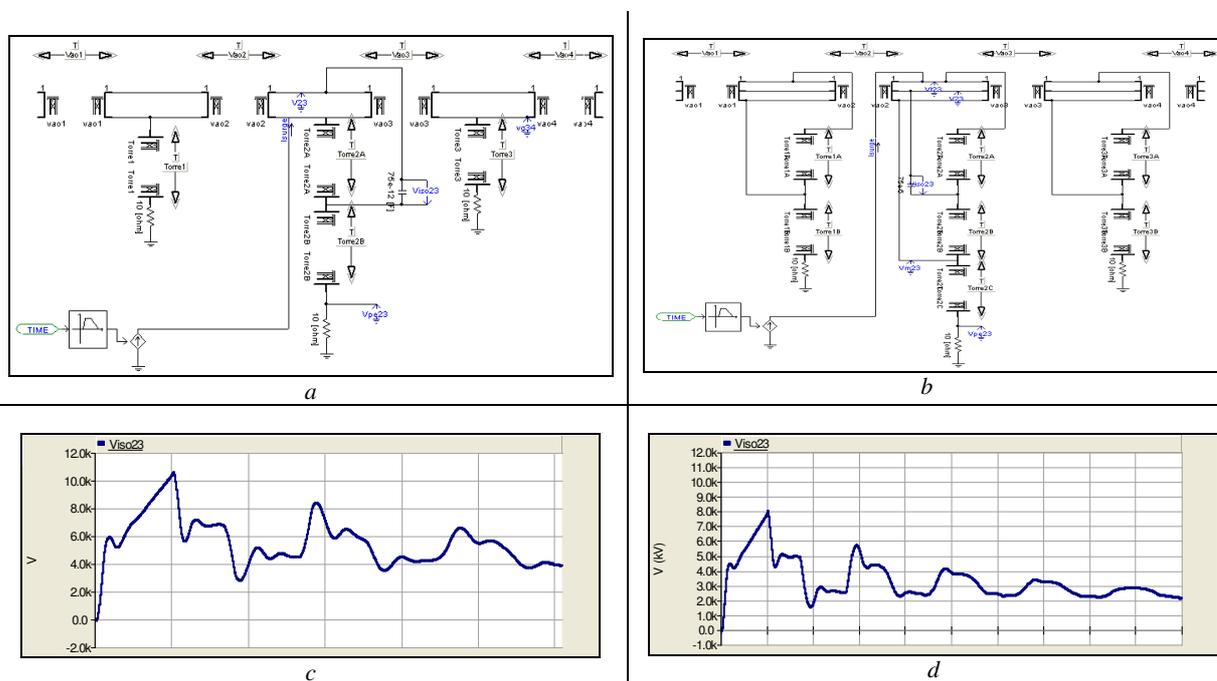


Figura 34 – Circuitos de Simulação e Perfil das Curvas Trabalhadas

Nesta etapa, começam a ser simuladas as variações nos parâmetros das linhas de transmissão. Foram realizadas simulações para três diferentes valores de resistência de pé de torre, três diferentes valores de comprimento de vão e três diferentes valores de tempo de frente de onda. A Tabela 6, resume estas alternativas e suas combinações.

Tabela 6  
Variações nos Parâmetros de Linha para Simulação

$R (\Omega)$	$t_f (\mu s)$	$L (m)$
10	1	150
50	2	250
100	5	350

Todos os resultados encontrados, nas diferentes combinações destes parâmetros estão na Tabela 7. Nesta relação, estão apresentados os parâmetros simulados, os valores da tensão de pico e o instante que ele ocorreu, estão listados ainda a tensão em 2 microssegundos e em 6

microssegundos para o caso com cabo guarda extra e para o caso de configuração típica – um cabo pára-raios.

Tabela 7  
Resultado das Simulações Comparativas com Variação de Parâmetros da Linha

Parâmetros			EGW				GW			
R ( $\Omega$ )	$t_f$ ( $\mu$ s)	L (m)	$V_p$ (kV)	$t_p$ ( $\mu$ s)	$V_{2\mu$ s} (kV)	$V_{6\mu$ s} (kV)	$V_p$ (kV)	$t_p$ ( $\mu$ s)	$V_{2\mu$ s} (kV)	$V_{6\mu$ s} (kV)
10	1	150	7.9	1.03	3.067	2.545	10.48	1.02	5.035	3.809
10	1	250	7.921	1.03	1.766	2.419	10.595	1.024	3.936	3.942
10	1	350	7.921	1.03	4.9	2.352	10.595	1.024	6.75	5.047
10	2	150	5.574	2.021	5.461	2.543	7.862	2.024	7.732	4.105
10	2	250	5.046	2.021	4.845	3.157	7.53	2.032	7.183	4.729
10	2	350	6.474	2.019	6.386	3.027	8.72	2.024	8.59	4.794
10	5	150	3.94	5.021	2.189	2.809	5.942	5.022	3.093	4.552
10	5	250	4.406	5.021	1.938	3.258	6.46	5.024	2.873	5.097
10	5	350	4.677	5.019	2.558	3.534	6.585	4.889	3.436	5.419
50	1	150	23.027	1.027	11.116	7.688	32.885	1.03	19.496	11.686
50	1	250	23.042	1.028	15.857	8.636	33.127	1.038	24.364	13.744
50	1	350	23.042	1.029	20.666	8.52	33.127	1.038	30.142	14.598
50	2	150	17.092	2.026	16.89	7.936	26.303	2.032	25.964	12.257
50	2	250	19.43	2.024	19.26	9.029	28.757	2.033	28.398	14.972
50	2	350	21.953	2.028	21.665	10.413	31.776	2.038	31.287	17.142
50	5	150	12.388	5.023	6.756	9.29	19.508	5.027	10.385	15.552
50	5	250	14.508	5.024	7.704	11.611	22.804	5.029	11.359	18.937
50	5	350	16.277	5.023	8.666	13.379	25.088	5.027	12.515	21.441
100	1	150	35.504	1.034	17.267	13.719	53.714	1.042	30.603	19.722
100	1	250	35.568	1.042	28.305	13.972	54.226	1.065	44.649	21.144
100	1	350	35.568	1.042	34.161	14.164	54.226	1.065	52.547	22.196
100	2	150	26.314	2.028	26.048	13.919	42.12	2.038	41.614	20.179
100	2	250	31.786	2.026	31.567	14.254	49.102	2.037	48.637	22.149
100	2	350	35.013	2.041	34.495	15.55	53.607	2.063	52.586	25.55
100	5	150	19.633	5.025	10.419	15.258	30.754	5.034	16.645	23.946
100	5	250	22.606	5.026	12.626	18.307	36.172	5.034	19.455	29.682
100	5	350	25.374	5.026	13.798	21.14	40.685	5.034	21.034	34.451

A seguir, são apresentados estes resultados, considerando os valores de pico da tensão, de forma gráfica. Fica claro que em todas as combinações de parâmetros há uma redução significativa nos valores de tensão, quando da aplicação do cabo guarda extra.

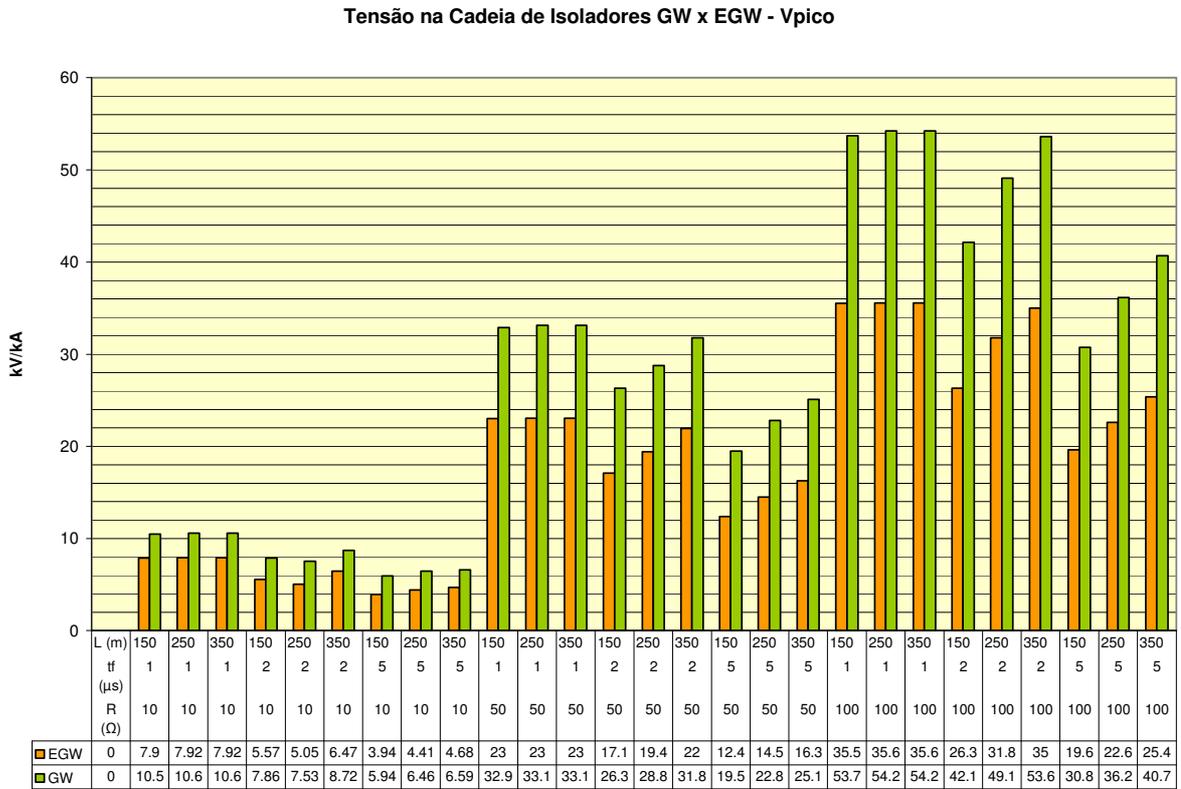


Figura 35 – Valores da Tensão de Pico

Observa-se ainda neste gráfico que não há relação linear entre as reduções nos valores de tensão com a variação de alguns parâmetros. Como era de se esperar, a variação da resistência de pé de torre tem impacto mais relevante nos resultados de sobretensão quando comparados á variação do comprimento do vão ou ao tempo de frente de onda.

A Figura 36 considera fixo o tempo de frente de onda em 5  $\mu$ s e varia os dois outros parâmetros. Nota-se que a influência do comprimento do vão é praticamente a mesma, onde a redução efetiva da tensão se mantém próxima dos 36% para valores de resistência de pé de torre acima de 50  $\Omega$ .

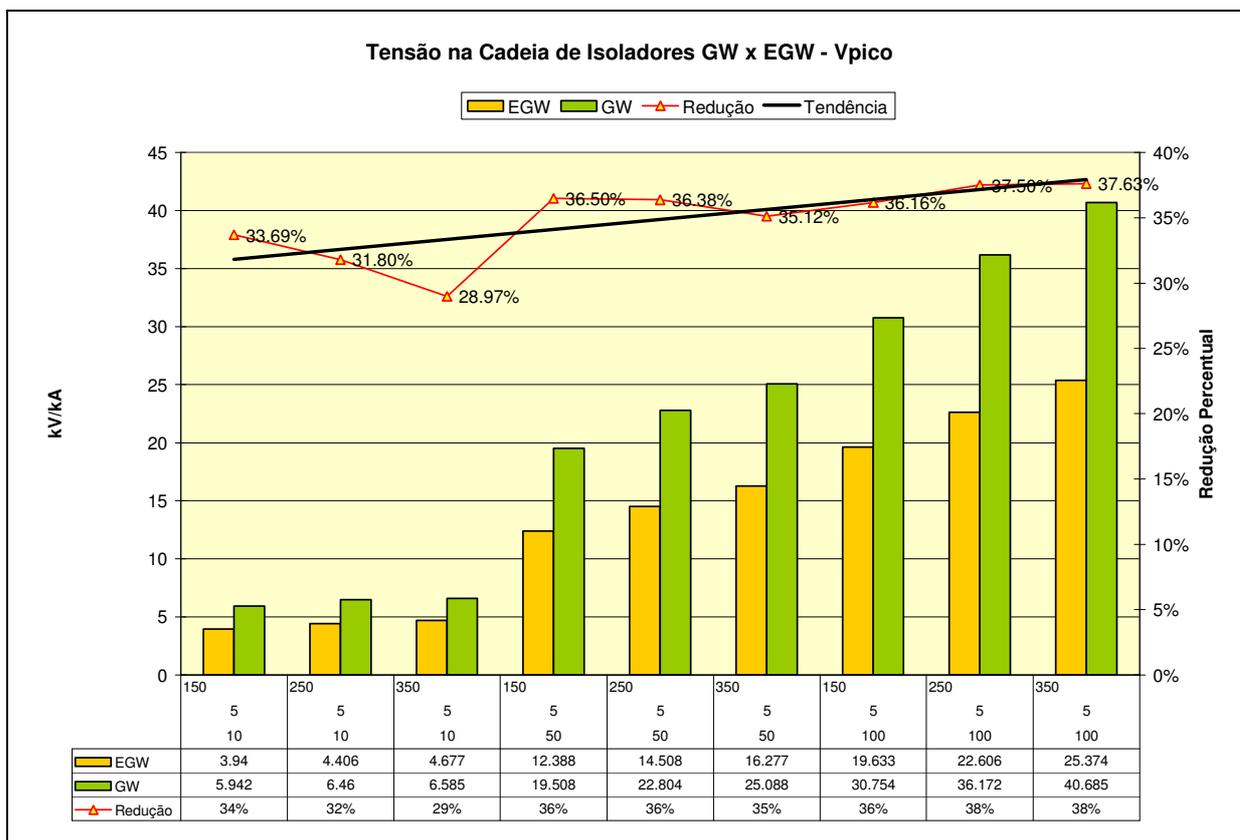


Figura 36 – Resultados Comparativos - Tempo de Frente de Onda Fixo em 5 $\mu$ s

Na Figura 37 é fixado o comprimento do vão em 250 metros. Desta vez nota-se claramente a influência do tempo de frente de onda nos resultados de tensão de pico.

É interessante observar que para todos os parâmetros variados a influência da resistência de pé de torre é predominante. A relação entre os três valores de tensão de pico obtidos para os três tempos de frente de onda quando a resistência de pé de torre é baixa é diferente desta mesma relação quando a resistência de pé de torre é elevada. A média de redução para 10 $\Omega$ , 50 $\Omega$ , 100 $\Omega$  de resistência de pé de torre e variados os outros parâmetros, são 29%, 33% e 36%, respectivamente.

Ou seja, a redução relativa na tensão na cadeia de isoladores é maior para valores mais elevados de resistência de pé de torre.

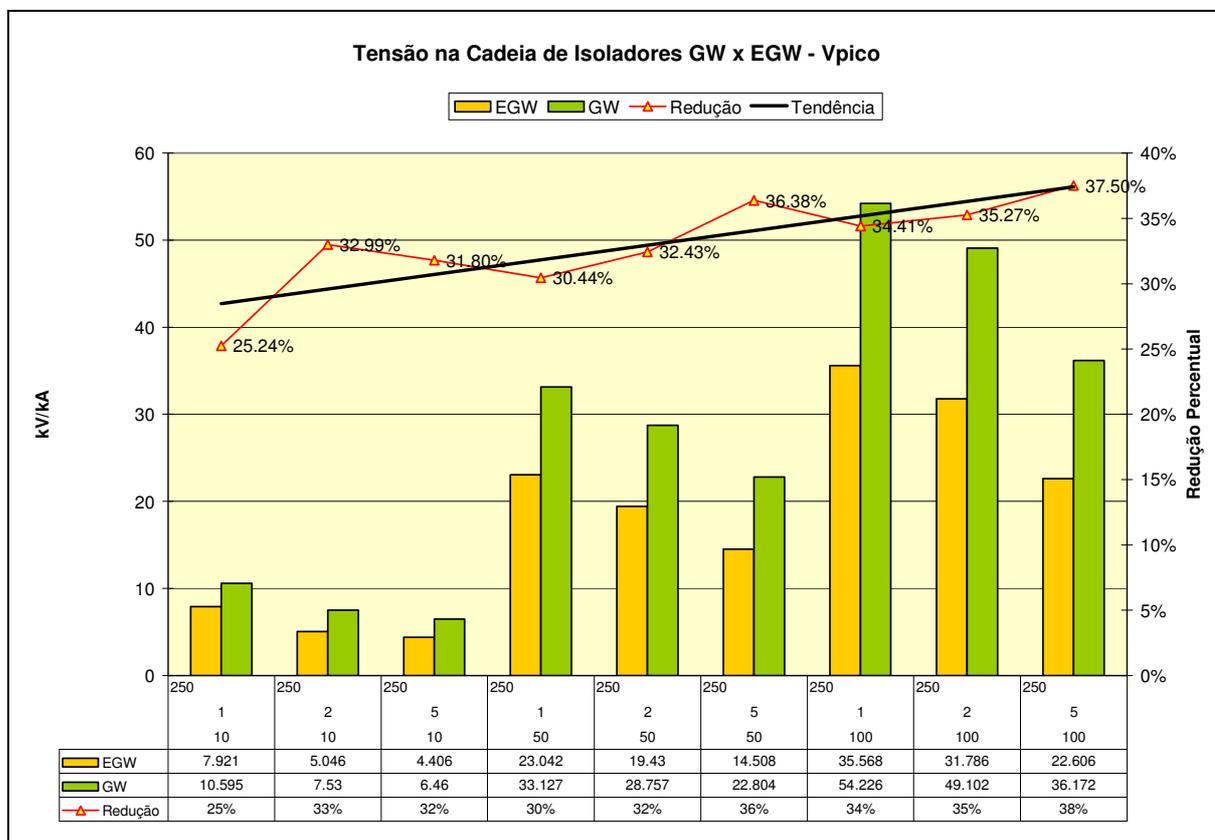


Figura 37 – Resultados Comparativos – Valor de Comprimento de Vão Fixo

Outra figura é apresentada a seguir, para reforçar a influência da resistência de pé de torre nos resultados. Desta vez, este parâmetro é fixado em 100 Ω e variados os outros dois. Nota-se a influência do comprimento do vão para tempos de frente de onda superiores a 2 μs, onde o tempo de trânsito é suficiente pra possibilitar as reflexões.

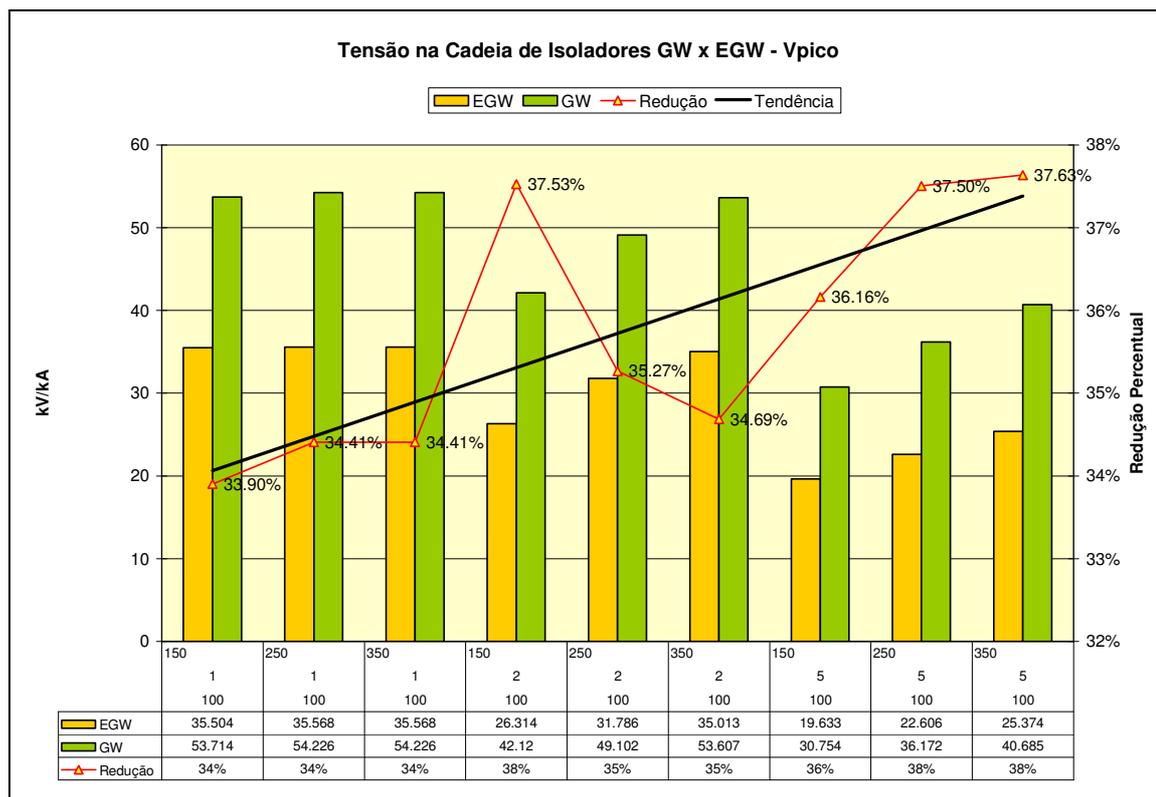


Figura 38 – Simulações Comparativas – Valor de Resistência de pé de Torre Fixo

Algumas observações importantes podem ser sintetizadas após a apresentação destes resultados. Antes, porém, vale lembrar a composição da cadeia de isoladores, formada por seis isoladores de disco, fabricados em vidro temperado com dimensões de 146x254 mm.

Estas informações são importantes neste momento, pois aqui será inserido o conceito da corrente crítica de descarga. Este parâmetro é calculado a partir da divisão da tensão máxima de ruptura da cadeia de isoladores, obtida a partir da curva vxt, pelo maior valor de tensão – entre os *i*) valores de pico, *ii*) tensão em  $2\mu s$  e *iii*) tensão em  $6\mu s$  – resultante na cadeia de isoladores, encontrado nas simulações, dada em kV/kA. O resultado é a corrente mínima necessária para iniciar um processo de *backflashover*, denominada como *corrente crítica de descarga*, dada em kA.

Na Figura 39, as barras representam os valores de corrente crítica de descarga com a utilização do cabo guarda extra e sem sua aplicação. A linha mostra a diferença percentual entre os dois valores em cada parâmetro variado.

Conforme esperado, nota-se uma significativa redução dos valores absolutos de corrente crítica a cada elevação da resistência de pé de torre, porém uma interessante relação aparece quando plota-se a diferença percentual entre a corrente crítica com e sem o cabo guarda extra, para cada parâmetro variado. Nota-se uma faixa de variação entre 32% a 60%, seguindo uma tendência de crescimento com a elevação da resistência de pé de torre. Ou seja, em uma análise comparativa, pode-se dizer que para maiores valores de resistência de pé de torre, maior é o efeito da aplicação do cabo guarda extra.

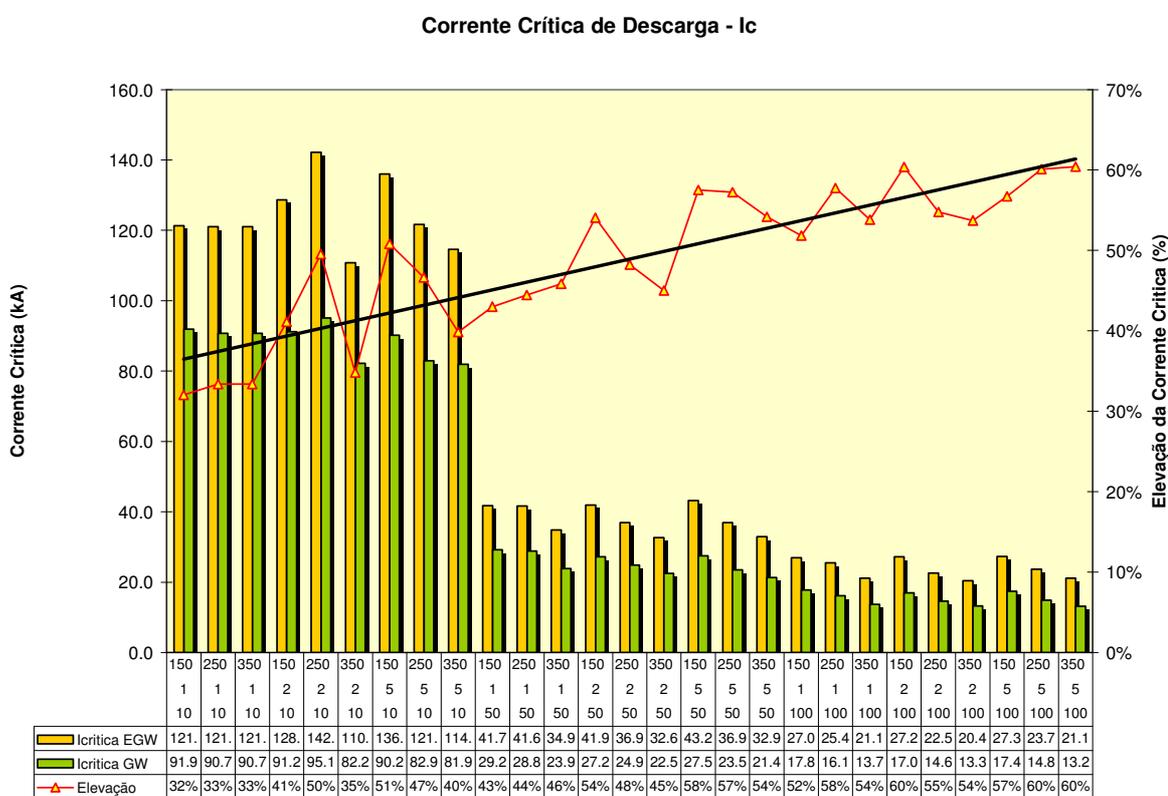


Figura 39 – Corrente Crítica de Descarga

1. A Figura 40 mostra a elevação da corrente crítica de descarga, mantendo-se o valor de resistência de pé de torre constante. Percebe-se que o impacto da variação do comprimento do vão na elevação percentual não tem tendência definida.

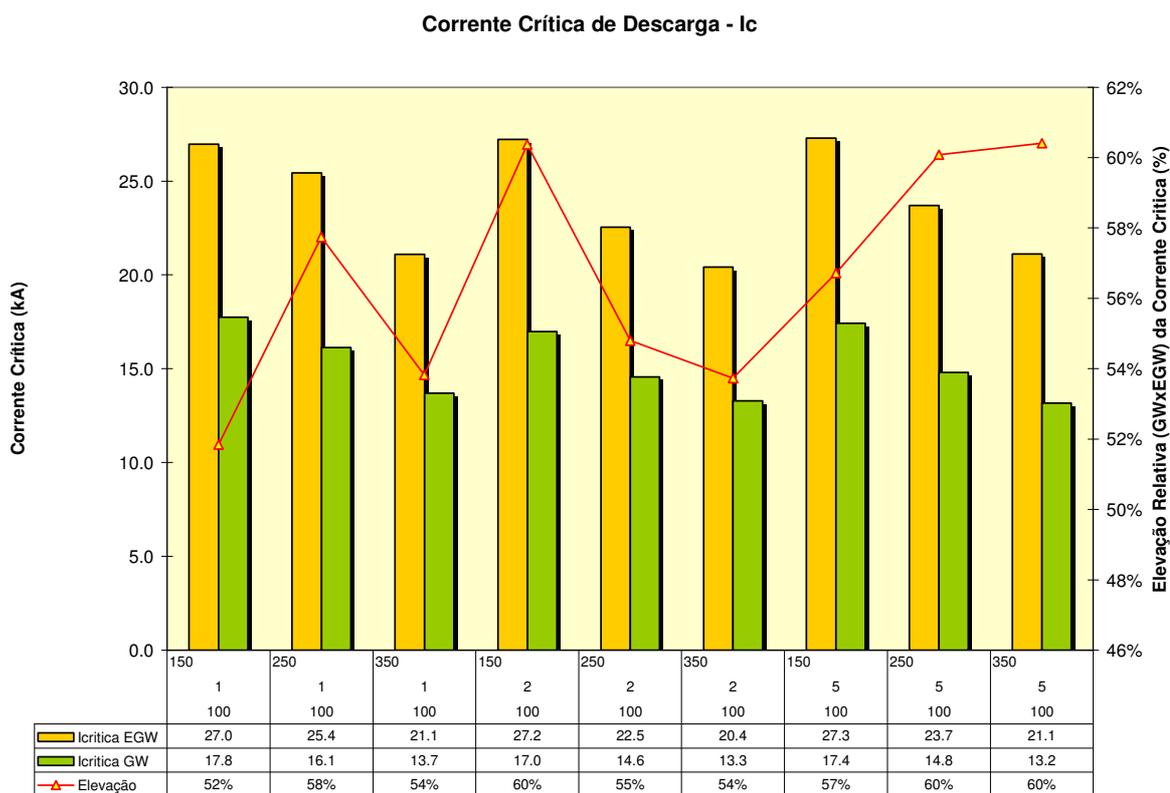


Figura 40 – Elevação da Corrente Crítica de Descarga com a Variação do Comprimento do Vão

2. A elevação da corrente crítica de descarga com a utilização do cabo guarda extra é apontada em todos os parâmetros considerados e variados;
3. A resistência de pé de torre tem impacto relevante nos resultados.

A partir destas considerações, foi definida a estratégia de trabalho para desenvolvimento das etapas seguinte.

## 4.5 Etapa 4 – Probabilidades de Disrupção

Nesta fase do trabalho, optou-se por aplicar um tratamento estatístico aos resultados obtidos anteriormente. Pretende-se com esta alternativa, converter os valores de tensão resultante nas cadeias de isoladores, encontrados nas simulações, em valores relacionados ao desempenho da linha de transmissão frente às correntes de descargas atmosféricas.

Conforme já mencionado no capítulo 2 deste trabalho, as amplitudes das correntes de descargas atmosféricas são descritas em termos probabilísticos. Na medida em que a massa de dados de medições é trabalhada e acrescentada, melhor é a precisão destas probabilidades.

A Figura 41 ilustra a curva encontrada para a distribuição dos valores de pico de corrente de descarga em torres de comprimento inferior a 60 metros, a partir de 338 registros.

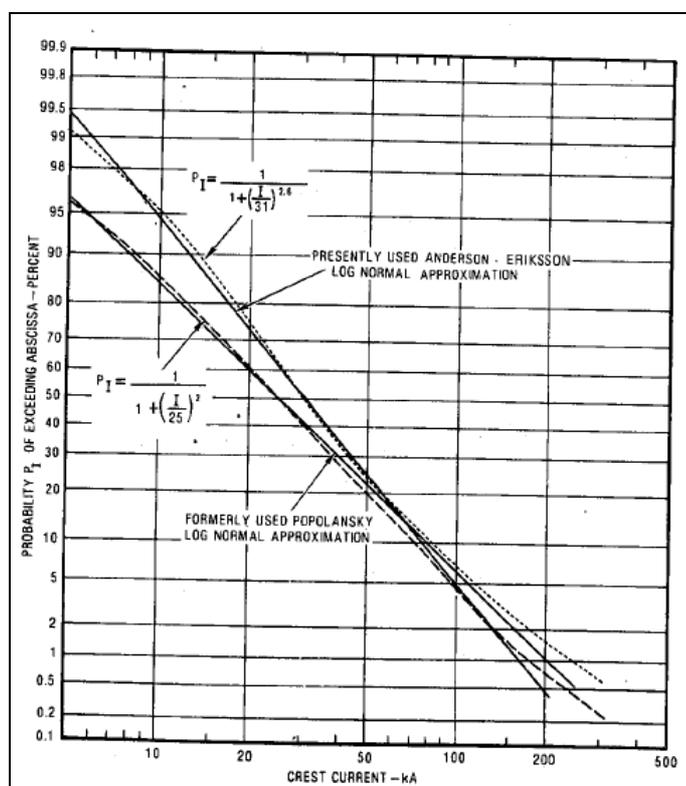


Figura 41 – Frequência de Distribuição da Corrente de Pico para Descargas Negativas [6]

Com base nestas medições, Anderson e Ericksson [23] formularam a Equação 10 para determinação da probabilidade de um pico de corrente em qualquer descarga atmosférica exceder a corrente crítica de descarga. Vale informar que esta equação é uma aproximação, porém tem precisão bastante razoável para correntes de descarga entre 5 e 200kA.

$$P_1 = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{31}\right)^{2,6}} \tag{Equação 10}$$

Desta forma, foram então calculadas as probabilidades para todos os casos simulados, conforme valores de corrente da Figura 39. Os resultados estão apresentados na Figura 42.

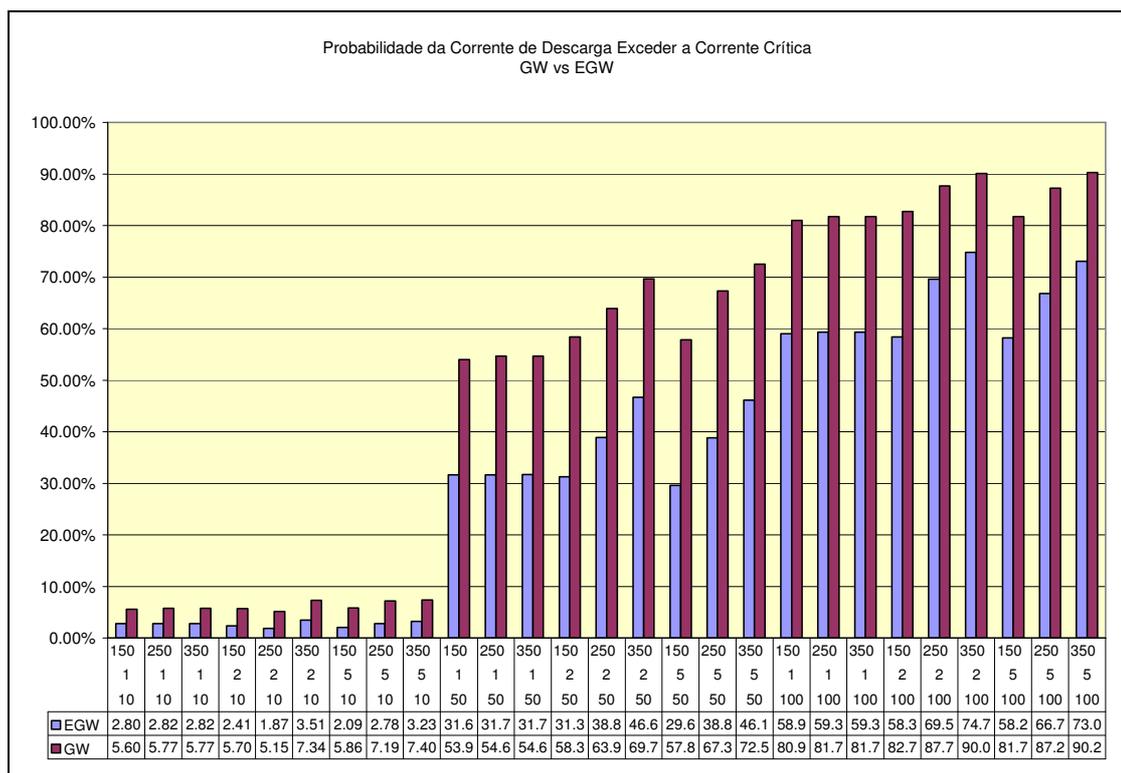


Figura 42 – Probabilidade da Corrente de Descarga Exceder a Corrente Crítica

De maneira a facilitar o entendimento e esclarecer as etapas do desenvolvimento do trabalho, concluídas até este ponto, a Figura 43 apresenta um fluxograma básico com cada passo necessário até a formulação dos resultados apresentados na Figura 44, a seguir.

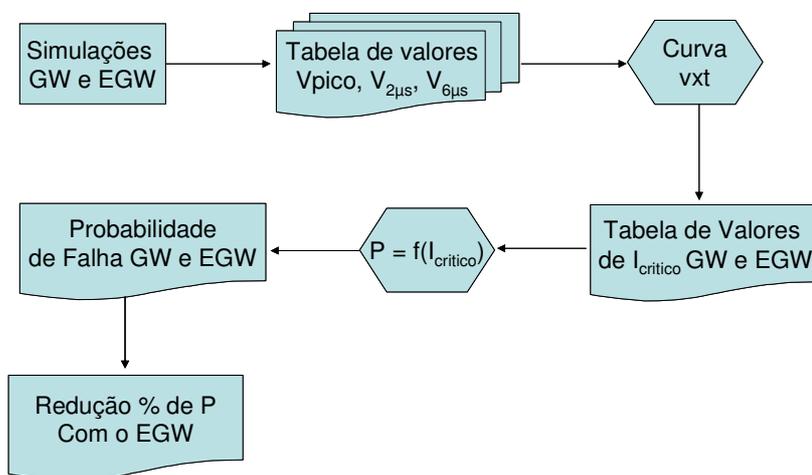


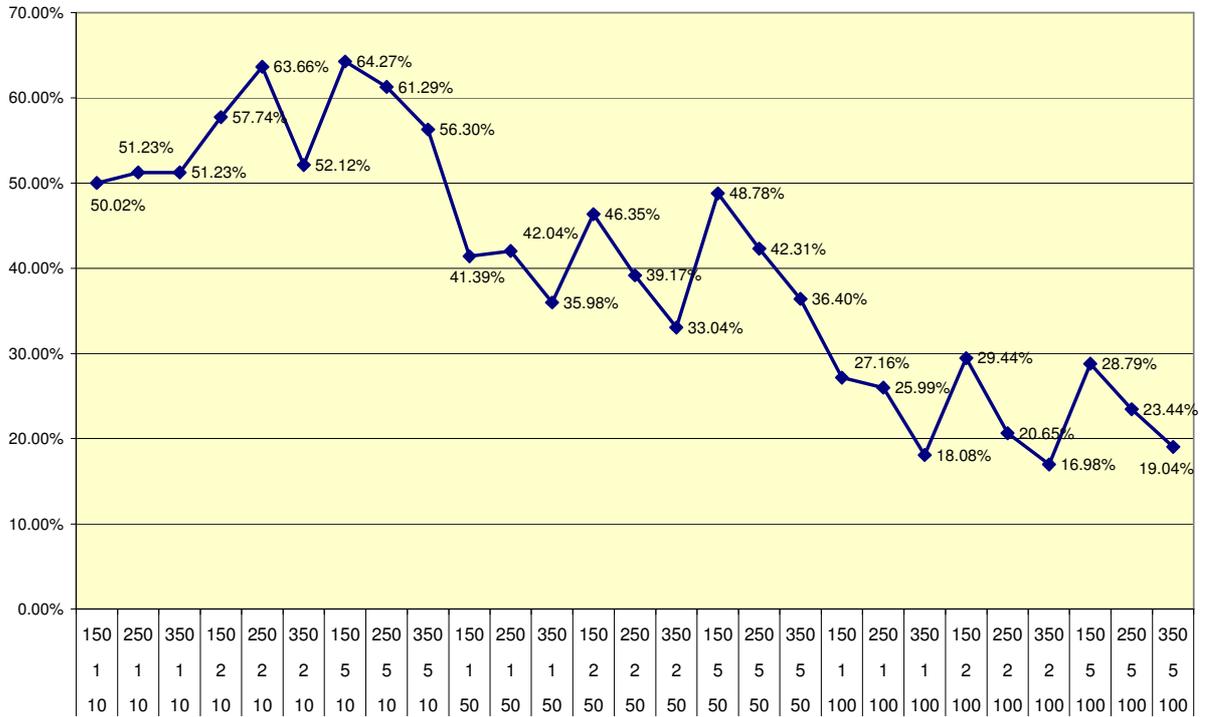
Figura 43 – Fluxograma Básico das Etapas de Desenvolvimento do Trabalho

A partir destes resultados, foi possível enfim, calcular a redução da probabilidade do acontecimento de falha na linha de transmissão em estudo, a partir do emprego do cabo guarda extra. Estes valores nos dão uma visão mais quantitativa do benefício alcançado com a aplicação desta alternativa.

A Figura 44 ilustra a redução da probabilidade de interrupção da cadeia de isoladores durante uma descarga atmosférica, quando inserido o cabo guarda extra. Nota-se que a redução chega a valores próximos a 65%. Variando até reduções de aproximadamente 16%, dependendo dos parâmetros utilizados.

Porém, uma influência clara e de impacto significativo, fica por parte da variação da resistência de pé de torre.

**Redução da Probabilidade de Falha - GWxEGW**



*Figura 44 – Redução da Probabilidade com a Aplicação do EGW*

Percebe-se que em cada mudança nos valores de resistência de pé de torre, há uma mudança de patamar nos valores de redução conseguidos. Este comportamento sugeriu uma relação interessante utilizada então, como base para a sequência de análises seguinte.

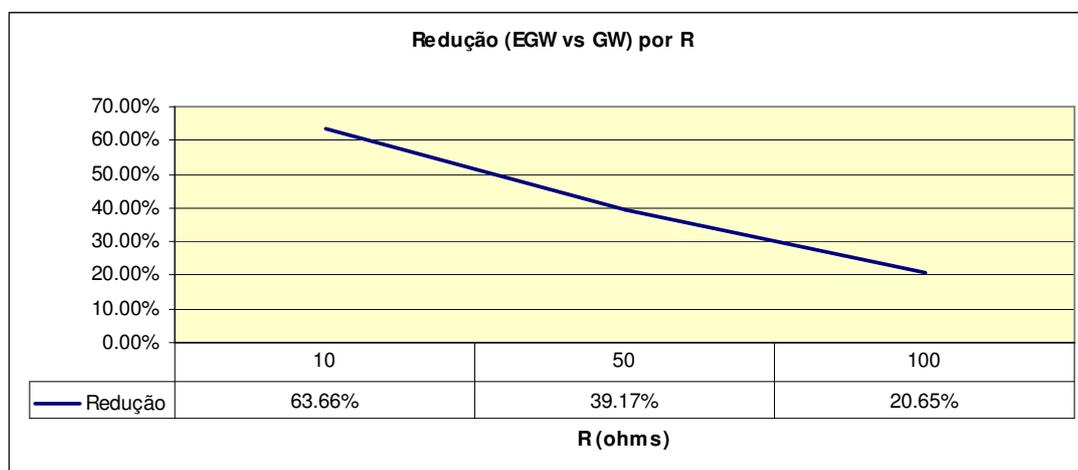


Figura 45 – Redução EGW vs GW em Função da Resistência de Pé de Torre

A relação apresentada na Figura 45 trouxe uma interessante perspectiva ao trabalho. A determinação de uma expressão que relaciona a melhoria do desempenho da linha de transmissão em estudo com a aplicação do cabo guarda extra, em função de valores de resistência de pé de torre, traz uma quantificação mais palpável aos resultados do trabalho.

Esta quantificação se torna possível, uma vez que em posse desta expressão, aplicando-se valores reais da resistência de pé de torre da linha de transmissão em estudo, gera-se um valor que representa a redução da probabilidade de falha por *backflashover* com a inserção do cabo guarda extra, para cada torre da linha de transmissão em estudo.

Dessa forma, foi necessário então, trabalhar a relação apresentada na Figura 45, de forma que a partir desta curva, fosse retirada a expressão comentada acima e apresentada a seguir.

$$f(R) = 0,027 \cdot R^2 - 0,77 \cdot R + 71$$

Com auxílio do MATLAB [24] chegou-se a curva plotada na Figura 46. Neste gráfico, tem-se a curva extrapolada e a curva gerada pela expressão retirada da curva extrapolada. Nota-se que a relação é bem próxima.

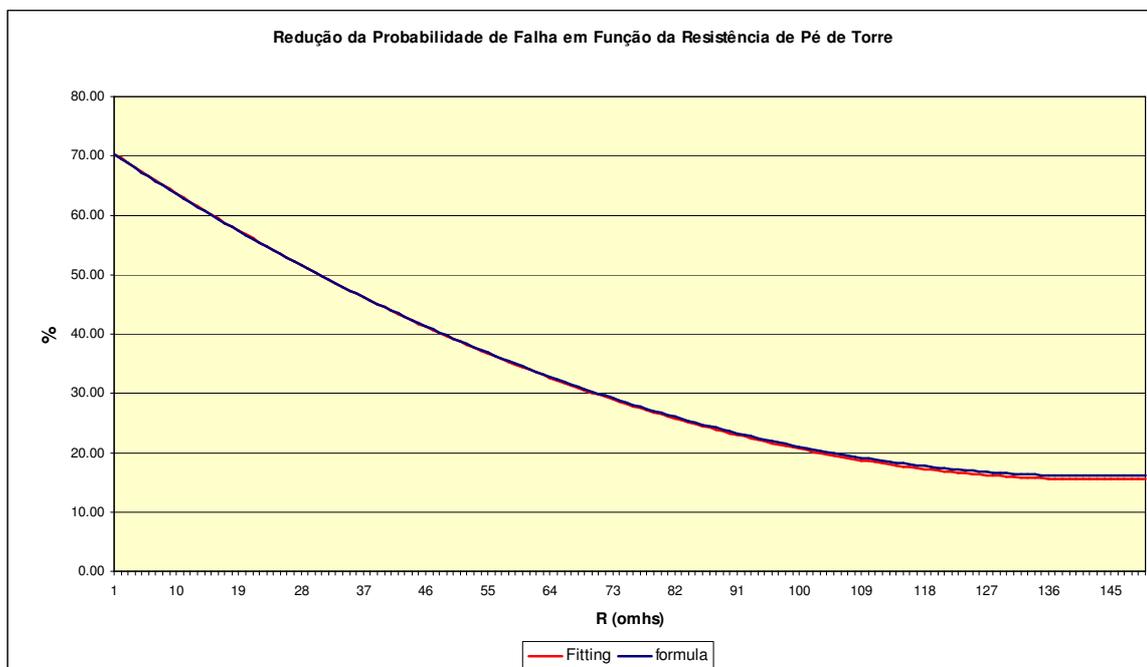


Figura 46 - Redução da Probabilidade de Falha em Função da Resistência de pé de Torre – Curva Fiting

Os dados originais, após trabalhados no MATLAB, geraram a curva apresentada na Figura 46 – curva “Fitting” na legenda - e desta curva, retira-se a Equação 11 que por sua vez gerou a segunda curva apresentada na Figura 46 - curva “Fórmula” na legenda. Esta segunda curva foi plotada como forma de validação da equação gerada.

Para uma validação final destas formulações, foram aplicados à Equação 11, os valores de resistência de pé de torre utilizados nas simulações.

Os resultados estão apresentados na Tabela 8.

*Tabela 8*  
*Redução Comparativa Simulação vs Expressão da Probabilidade de Falha em %*

<i>R(ohms)</i>	<i>Redução Fitting</i>	<i>Redução Fórmula</i>
10	63.66	63.57
50	39.17	39.25
100	20.65	21.00

Percebe-se que a diferença é irrelevante, confirmando que a expressão gerada, representa satisfatoriamente a curva originada das simulações.

Portanto, a alternativa é considerada válida e será utilizada na seqüência do trabalho.

Neste ponto do trabalho, tem-se a expressão que relaciona o desempenho da linha de transmissão com a resistência de pé de torre. De posse da medição de resistência de pé de torre da linha de transmissão em estudo, pode-se achar um perfil de melhoria no desempenho desta linha de transmissão, aplicando a solução defendida neste trabalho.

Conforme informado no Capítulo 3 desta dissertação, a medição da resistência de aterramento de todas as torres da linha de transmissão em estudo já foi realizada e os resultados estão apresentados na Figura 21 daquele mesmo capítulo.

Desta foram, aplicando-se então, estes valores à Equação 11, chega-se aos seguintes valores, apresentados na Figura 47.

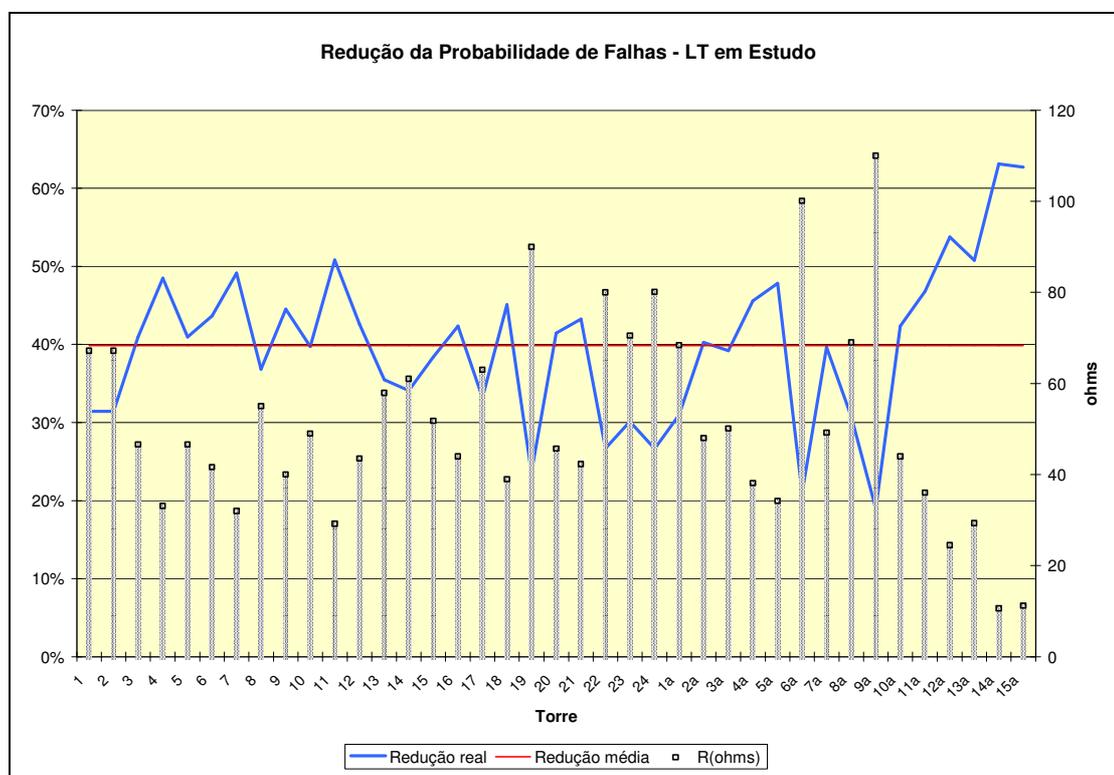


Figura 47 – Redução da Probabilidade de Falhas em Função de R(ohms) – LT em Estudo

Como era esperado, a redução conseguida com o emprego de cabo guarda extra tem relação estreita com a resistência de pé de torre. Nota-se que para valores baixos de resistência de pé de torre, como nas torres 14a e 15a, a redução chega a valores de 63%, enquanto que para valores elevados de resistência de pé de torre, conseguimos reduções de aproximadamente 20%, como mostra o caso da torre 10a.

Mesmo neste segundo caso, da torre 10a, apontada com a maior resistência medida de pé de torre e conseqüentemente o menor valor conseguido de redução da probabilidade de falha, pode-se considerar que a solução ainda é bastante satisfatória, visto que 19% de redução é um patamar alto quando comparado a outras técnicas de melhoria de desempenho.

Neste ponto do trabalho, tem-se em mãos os ganhos obtidos com o emprego da alternativa de melhoria no desempenho da linha de transmissão em estudo. Estes dados estão formatados de forma a possibilitar a comparação com alternativas tradicionais de melhoria no desempenho de linhas de transmissão, o que será abordado no item seguinte.

## **4.6 Etapa 5 – Alternativas de Melhoria de Desempenho**

Esta etapa do trabalho objetiva apresentar uma comparação entre resultados de melhoria de desempenho obtidos com o emprego da alternativa proposta neste trabalho e os esforços necessários para consegui-los a partir de outras técnicas de melhoria de desempenho em linhas de transmissão.

As possibilidades de melhoria no desempenho de linhas de transmissão podem ser divididas em duas classes, melhorias em fase de projeto e melhorias em fase de operação.

No primeiro caso, várias são as características que devem ser avaliadas no intuito de se atingir o desempenho desejado.

- Comprimento do vão;
- Geometria das torres;
- Traçado;
- Classe de isolamento;
- Aterramento e outras.

Nota-se, porém, que para melhorias em fase de operação, várias destas alternativas e ainda outras não citadas, não têm aplicação viável.

Desta forma, as alternativas comumente adotadas para melhoria no desempenho de linhas de transmissão em fase de operação são a melhoria da resistência de aterramento e a elevação do nível de isolamento.

- Melhoria na Resistência de Aterramento

As formas de se melhorar o aterramento de uma linha de transmissão em fase de operação podem ser resumidas em dois grupos, conforme já mencionado no item 2.3 do Capítulo 2.

- Configuração dos eletrodos de aterramento
- Resistividade do solo

Produtos para tratamento químico ou físico do solo e alterações nas configurações dos eletrodos, como utilização de anéis de equalização de potencial, alteração na profundidade de hastes, cabos contra peso de comprimentos adequados e grelhas, são alternativas de aplicação viável para a melhoria na resistência de aterramento de torres de linhas de transmissão e conseqüentemente para a melhoria do desempenho destes equipamentos.

- Elevação do Nível de Isolamento

A maneira de se elevar o nível de isolamento de uma linha de transmissão é alterando o número de isoladores nas cadeias de isoladores de cada torre. Naturalmente, há um limite para esta alternativa, definido pelas características geométricas das torres, comprimento de vão e flecha dos cabos. Porém, sem uma análise mais profunda, pode-se dizer que é possível inserir um ou dois isoladores na cadeia, sem que algum limite citado acima, seja atingido.

Desta forma, nesta etapa serão consideradas estas duas alternativas, a melhoria na resistência de aterramento e o aumento no nível de isolamento, como alternativas de melhoria no desempenho da linha de transmissão em estudo, para fins comparativos à proposta deste estudo.

Para tal, será utilizado o software Flash [25].

Antes de apresentar os resultados das simulações no software Flash, algumas considerações precisam ser feitas.

O software Flash tem como entrada os dados geométricos da linha de transmissão, dados dos cabos condutores e cabos guarda e dados de impedância de pé de torre. A partir de um valor definido da densidade de descargas atmosféricas da região em estudo, o software informa o desempenho da linha de transmissão frente a falhas de blindagem e falhas por *backflashover*.

Conforme apresentado no Capítulo 3, Figura 21, a medição de resistência de pé de torre foi realizada em todas as torres da linha de transmissão em estudo. O software Flash não permite a entrada destes dados individualmente para cada torre. Portanto, para representação da impedância de pé de torre, foi montado um histograma, conforme a Figura 48.

Desta forma, a entrada de dados de impedância de pé de torre respeitou a distribuição dos valores e respectivas frequências de ocorrência, informadas no histograma.

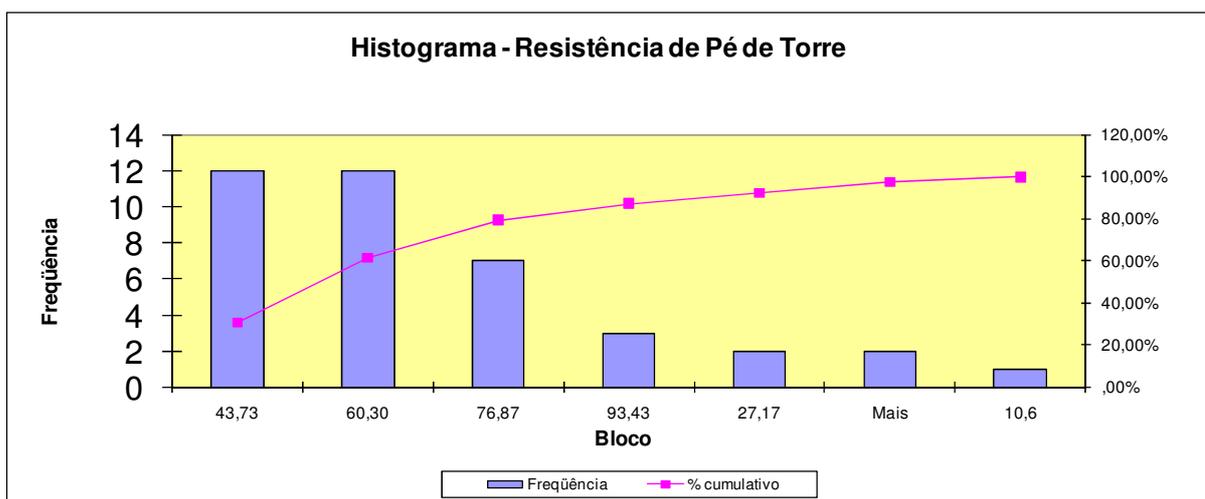


Figura 48 – Histograma das Resistências de Pé de Torre Medidas

É importante também, ressaltar o valor escolhido para entrada do índice cerâmico utilizado no software. Para tal, é preciso esclarecer que esta simulação tem caráter comparativo. Serão simuladas melhorias no desempenho através de alterações na resistência

de aterramento e no nível de isolamento, até que sejam atingidos valores relativos de melhoria de desempenho conseguidos com a utilização do cabo guarda extra.

Portanto, o valor de interesse nesta etapa do trabalho é o percentual de melhoria de desempenho obtido, não importando os valores absolutos. Desta forma, pôde ser escolhido qualquer valor de representação do índice ceráunico. Foi então definido o número de 10 descargas por quilometro quadrado por ano.

Os outros dados de entrada do software Flash são valores definidos pelas características próprias da linha.

- Resultados

Desta forma, a simulação da linha de transmissão em estudo no software Flash, com as impedâncias de pé de torre definidas no histograma da Figura 48 e densidade de descargas de 10 descargas/km<sup>2</sup>/ano, resultou em um desempenho frente a falhas por BFO de **76,60 falhas/100km/ano**.

Conforme já mencionado, devido ao valor de densidade de descargas adotado, este valor não representa a realidade da linha em estudo. Sua função é servir como valor base para as melhorias de desempenho que serão simuladas a partir deste ponto.

Neste ponto, recorre-se à Figura 47, para ressaltar a redução média na probabilidade de falhas, conseguida com o emprego do cabo guarda extra, apontada como sendo de **39,86%**.

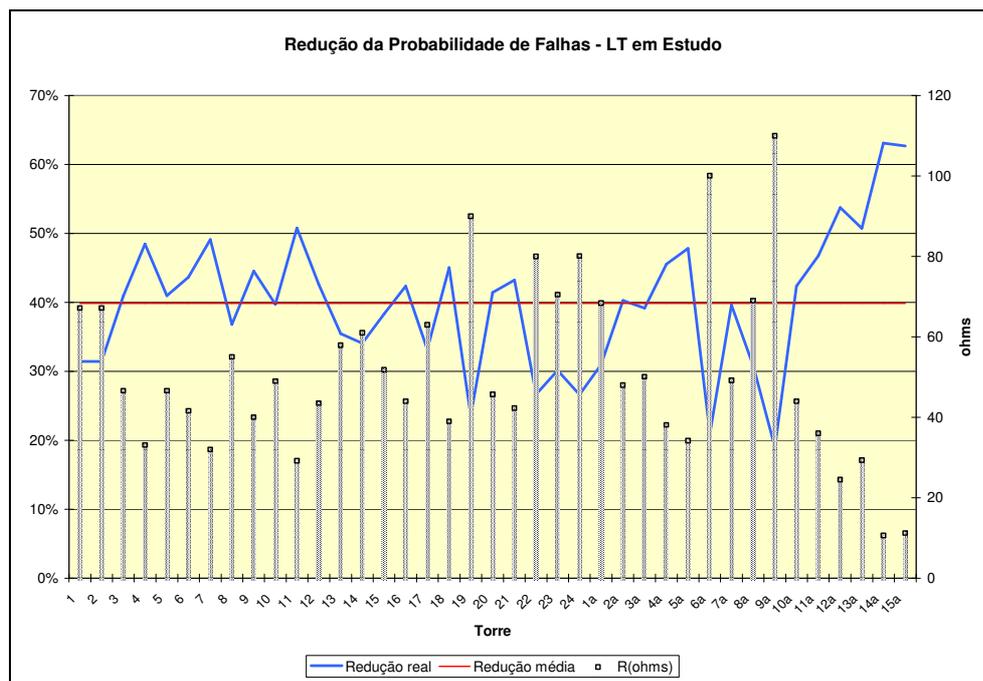


Figura 47– Redução da Probabilidade de Falhas em Função de R(ohms) – LT em Estudo

Para uma comparação concreta entre as alternativas, este valor de redução será aplicado ao valor de desempenho frente à falhas por BFO (*Backflashover*) encontrado nas simulações no software Flash, a partir de alterações no histograma da resistência de pé de torre e alterações no nível de isolamento.

Dessa forma, aplicando-se a redução de 39,86% à taxa de falhas obtida das simulações no Flash, de 76,60 falhas/100km/ano, chega-se a um desempenho de 46,06 falhas/100km/ano.

Para que seja atingido o valor de desempenho desejado a partir de alterações nos valores de resistência de pé de torre ou no nível de isolamento da linha, foram simulados vários casos, respeitando-se uma variação crescente de melhoria nestes dois parâmetros.

- Elevação do Nível de Isolamento da Linha

Conforme já mencionado, a cadeia de isoladores da linha de transmissão em estudo é formada por 6 isoladores de vidro temperado, de dimensões 146 x 245 mm.

Desta forma, a alternativa empregada para elevação do nível de isolamento, consiste na inserção de mais isoladores na cadeia, aumentando assim, o comprimento total da cadeia de isoladores em 146 mm para cada isolador adicionado.

A entrada deste parâmetro no software Flash é definida pelo comprimento total da cadeia de isoladores, desta forma, foram simulados os casos representados na Tabela 9, onde também são apresentados seus respectivos resultados.

*Tabela 9  
Elevação do Nível de Isolamento – Resultado das Simulações*

<i>Cadeia de Isoladores (6 disco) +</i>	<i>Comprimento Total (876 mm)</i>	<i>Desempenho falhas/100km/ano</i>
1	1022	67.65
2	1168	58.97
3	1314	50.99
4	1460	43.85

Nota-se que para se conseguir o mesmo patamar de desempenho atingido pela utilização do cabo guarda extra, a alternativa de elevação do nível de isolamento da linha de transmissão em estudo, sugere a inserção de 4 isoladores na cadeia, somando-se 10 isoladores.

Esta alternativa mostra-se inviável, uma vez que dez isoladores na cadeia de isoladores desta linha de transmissão, projetada para operação em 69kV, totalizam uma distância de 1460 mm, distância suficiente para comprometer as características físicas da linha. Ângulos da blindagem, cálculos de tração e peso, flecha máxima, distanciamentos mínimos entre cabos e solo, cabos e estrutura, assim como os balanços durante intempéries climáticas, são alguns parâmetros que certamente restringem a viabilidade desta alternativa.

- Melhoria no Aterramento – Valores de Resistência de Pé de Torre

Conforme mencionado no Capítulo 2, melhorias nos valores de resistência de pé de torre podem ser conseguidas por métodos conhecidos e comumente utilizados, como o tratamento químico do solo, disposição das hastes, cabos, anéis de equalização entre outros.

Para representar esta alternativa no software Flash, aplicou-se reduções percentuais nos valores de resistência de pé de torre apresentados no histograma da Figura 48.

A Tabela 10 resume os percentuais de melhoria aplicados e os respectivos resultados obtidos.

*Tabela 10*  
*Melhoria no Aterramento – Resultado das Simulações*

<i>Melhoria Percentual Aplicada ao Aterramento</i>	<i>Desempenho falhas/100km/ano</i>
10%	73.25
20%	69.38
30%	64.40
40%	58.30
50%	50.62
55%	46.01

Percebe-se que para um desempenho comparado ao atingido com a utilização da proposta deste estudo, foi necessária uma melhoria média de 55% no sistema de aterramento da linha de transmissão.

Observando-se os valores mostrados na Figura 21, percebe-se que certamente pode-se atingir reduções significativas nos valores de resistência de pé de torre de algumas torres, como as torres de números 19, 6a e 9a, as quais os valores medidos aproximam-se de  $100\Omega$  e certamente caracterizam problemas de má conexão ou interrupções nos cabos e hastes do aterramento. Porém, uma redução média nos patamares exigidos pela comparação apresentada no presente item deste trabalho, se mostra inviável, quando se considera as características do

solo da região de instalação da linha de transmissão em estudo, apresentadas no item1 deste trabalho.

## Capítulo 5

# Conclusões e Propostas de Continuidade

## 5.1 Conclusões

De uma maneira geral, o setor industrial brasileiro, impulsionado pelo atual crescimento de sua economia, vem experimentando uma necessidade de maior exigência de suas instalações. Trabalhar com melhores índices de rendimento e utilização dos equipamentos e processos produtivos é objetivo de empresas que buscam ser competitivas no mercado.

Com este objetivo, vários são os estudos de melhorias em equipamentos ou processos industriais que em sua maioria, trazem à tona questões que contrapesam as técnicas empregadas com suas viabilidades de investimento. Retorno do capital investido, eficácia e eficiência da solução são algumas das variáveis embutidas na decisão de aplicação dos recursos.

Em um caso ou outro, atingir melhor desempenho dos equipamentos é uma busca contínua da engenharia e está sempre presente nas mesas de estudo, naturalmente com mais ou menos intensidade, variando com a demanda exigida pelo mercado.

Este estudo propôs uma alternativa de melhoria de desempenho em linhas de transmissão, frente à descargas atmosféricas, obtendo resultados bastante satisfatórios, tanto no que diz respeito à eficácia da técnica proposta, quanto à sua viabilidade frente às outras técnicas de mesmo propósito.

A utilização de um cabo guarda extra sob os cabos fases de uma linha de transmissão se mostrou altamente eficaz na redução dos valores de sobretensão na cadeia de isoladores, causada por *backflashover* (BFO). Foram alcançados valores de redução de até 63% no melhor caso, o que pode ser considerado também, um resultado excelente no ponto de vista do retorno do investimento, uma vez que a execução desta solução é relativamente simples, não exige grandes investimentos e pode ser realizada sem grandes interrupções no fornecimento de energia.

Outro ponto importante do trabalho é a apresentação da relação entre a redução da probabilidade de falha por BFO em função da resistência de pé de torre. Foram encontrados valores de redução da probabilidade de falhas variando de 20% a 63%, indicando que dependendo do valor da resistência de pé de torre encontrado, a eficácia da solução pode passar por uma combinação de técnicas. Tratamento do solo, melhoria na conexão do aterramento, utilização de anéis de equalização, são algumas delas que associadas ao cabo guarda extra, poderiam atingir resultados ainda melhores.

Além destas informações, o trabalho apresenta interessantes relações de redução da probabilidade de falha por BFO em função de outros parâmetros, a saber, o comprimento do vão e o tempo de frente de onda. Em ambos os casos, há redução da probabilidade de falhas.

## 5.2 Propostas de Continuidade

O trabalho teve o intuito de apresentar a melhoria de desempenho frente a descargas atmosféricas conseguida em uma linha de transmissão, aplicando a técnica de utilização de cabo guarda extra sob os cabos fase, comparando-a com as técnicas convencionais de mesmo objetivo.

Como objeto do estudo, foi utilizada uma linha de transmissão de 69 kV de circuito simples e outras características já mencionadas nos capítulos 2 e 3. Várias foram as simulações realizadas e várias relações importantes foram retiradas deste desenvolvimento.

Entretanto, algumas questões ainda devem ser objeto de estudo e pesquisas futuras.

Alguns destes tópicos são:

- Estudar a eficácia da técnica em linhas de circuito duplo;
- Estudar novas configurações, considerando mais de um cabo guarda extra em diferentes posicionamentos;
- Quantificar o investimento necessário para a aplicação em campo e compará-lo com o investimento em outras técnicas de mesmo fim;
- Propor revisões na rotina Flash, permitindo simulações com o cabo guarda extra;

## Referências Bibliográficas

- [1] A. D. Andrade (CEMIG), G. M. Fonseca (CEMIG) e R. L. Markiewiez (CEMIG), “*Experiência da CEMIG na Instalação de Pára Raios de ZnO em Linhas de Transmissão – Aspecto Manutenção*”, XVI SNPTEE, São Paulo, 2001.
- [2] Visacro, S., “*Aterramentos Elétricos*”, São Paulo: Ed. ArtLiber, 2002.
- [3] IEEE Modeling And Analysis Of System Transient Work Group, “*Modeling Guidelines For Fast Front Transients*”, IEEE Trans. on Power Delivery; Vol. 11, No. 1, 1996.
- [4] A. B. Feres, “*Análise Técnico Econômica para Melhoria de Desempenho de Linha de Transmissão de 138kV Taquaril-Mariana sob ótica de Análise de investimento e de Geração de Capital ao Acionista*”, UFMG, Belo Horizonte, 2004.
- [5] Visacro, S., “*Descargas Atmosféricas: Uma Abordagem de Engenharia*”, Belo Horizonte: Ed. ArtLiber, 2000.
- [6] Transmission Line Reference Book, 345kV and Above, Second Edition, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, 1982.
- [7] Berger, K., Anderson, R.B., Kroninger, H., *Parameters of Lightning Flashes*, Electra, N° 41, p23-37, Jul-1975.
- [8] Visacro, S., Saraiva, A. C., Soares, A., “*Avaliação da Eficiência de Configurações Típicas de Aterramentos de Sistemas de proteção Contra Descargas Atmosféricas, nos Aspectos de sua Impedância e Distribuição de Potencial no Solo*”, Seminário Internacional de proteção Contra Descargas Atmosféricas, São Paulo, 1997.
- [9] Visacro, S., “*A Comprehensive Approach to the Grounding Response to Lightning Currents*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, No 1, Janeiro 2007.

- [10] Visacro, S., Soares, A., “*Análise do Efeito da Intensidade de Corrente de Descarga no Comportamento Transitório de Aterramentos Elétricos*”, Seminário Nacional de Produção de Transmissão de Energia Elétrica, 1995.
- [11] Bollen, Math H. J., “*Understanding Power Problems: Voltage Sags and Interruptions*”, IEEE Press series on Power Engineering, 1960.
- [12] Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, Surya Santoso e H. Wayne Beaty, “*Electrical Power Systems Quality*”, Second Edition, McGrawHill.
- [13] “*Electrical Transmission and Distribution Reference book*”, Central Station of Engineers of the Westinghouse Electric Corporation, East Pitsbug, Pensilvania, 4<sup>th</sup> Edition, 1964
- [14] W. D. Stevenson, “*Elementos de análise de sistemas de potência*”, 2. ed. São Paulo, 1986.
- [15] “*Transitórios Elétricos e Coordenação do Isolamento – Aplicação em Sistemas Elétricos de Alta Tensão*” – FURNAS/UFF, 1987.
- [16] J. H. Gridley, “*Principles of Electrical Transmission Lines in Power and Communication*”, Pergamon Press, 1967.
- [17] CIGRE TF 33.01.02, “*Characterization of Lightning for Application in Electrical Power Systems*”, CIGRE Brochure 172, December 2000.
- [18] C. J. Coelho Teixeira e A. Machado e Moura, “*Study of Backflashover Phenomena in Overhead Transmission Lines Using the EMTP*” – IEEE Xplore.
- [19] MACANN, G.D., “*The Effect of Corona on Coupling Factors, Between Ground Wires and Phase Conductors*” – AIEE Vol. 62, 1947.
- [20] RIZK, F. A. M., “*Modeling of Transmission Line Exposure to Direct Lightning Strokes*”,
- [21] IEEE Trans Power Delivery, vol. 5, pp. 1983-1997, Nov. 1990.

- 
- [22] HEIDLER, F. CVETIC, J. M. STANIC, B. V. “*Calculation of Lightning Current Parameters*”, IEEE Transactions on Power Delivery, v.14, n.2, p399-404, Apr 1999.
- [23] R. B. Anderson, A. J. Eriksson. “*Lightning Parameters for Engineering Applications.*” Pretoria, South Africa: CSIR, June, 1979, Report ELEK 170.
- [24] MatLab (2005). MatLab – The Language of Technical Computing, [www.mathworks.com/products/matlab](http://www.mathworks.com/products/matlab)
- [25] Flash (2001). Flash – Version 1.81