
**ESTUDO DO DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO SOB AÇÃO
DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

JORGE CARLOS FERNANDES BUENO

Monografia submetida à Comissão Coordenadora do Curso de Especialização em Engenharia de Sistemas Elétricos de Potência – CESEP, Ênfase: Proteção Elétrica, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do certificado da Especialização.

Aprovada em 24 de Junho de 2010.

Dr. Silvério Visacro Filho
Supervisor

Dr. Silvério Visacro Filho
Coordenador do CESEP

RESUMO

Este trabalho foi fundamentalmente dedicado à avaliação do desempenho das linhas de transmissão quando submetidas à ação de descargas atmosféricas. Este fenômeno é muito aleatório e, principalmente, quando a incidência ocorre diretamente na linha de transmissão, constitui-se na principal fonte de desligamentos. Desta forma, faz-se necessário a compreensão completa dos mecanismos que determinam estes desligamentos. Foi dada ênfase ao desempenho de LT's com níveis de tensão nominal a partir de 138kV.

Diante disso, foi apresentada uma análise específica dos principais mecanismos associados aos desligamentos devido à incidência da descarga, em três situações: diretamente no condutor fase, próxima ao condutor fase e diretamente no cabo de blindagem ou na estrutura metálica. Todos estes mecanismos podem influenciar significativamente no índice de desligamento em linhas de transmissão com níveis de tensão a partir de 138kV.

Com base nestes mecanismos foi realizada uma avaliação da eficiência das práticas tradicionais e não-convencionais, a partir de estudos já realizados visando a melhoria do desempenho das linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas.

Finalmente foram apresentados os resultados obtidos através de simulações realizadas através da plataforma computacional "Alternative Transients Program – ATP". Foi considerada uma configuração típica de uma linha de transmissão de 138kV e duas formas de onda de corrente: primeira descarga e descarga subsequente, para avaliação da sobretensões causadas na linha. Em seguida, foi feita uma avaliação das práticas para redução do número de desligamentos.

ABSTRACT

This work was essentially dedicated to the evaluation the performance of transmission lines when submitted to the action of lightning. This phenomenon is very random and, especially, when the impact occurs directly on the transmission line, constitutes the main source of outages. Thus, it is necessary to complete understanding of the mechanisms that determine these outages. Emphasis was given to the performance of LT's with nominal voltage levels from 138kV.

Thus, was presented a specific analysis of the main mechanisms associated with outages because the incidence of lightning, in three situations: directly in the phase conductor, next to the phase conductor and directly into the cable shield or metallic structure. All these mechanisms can significantly influence the outages rates in transmission lines with voltage levels from 138kV.

Based on these mechanisms was performed an evaluation of the efficiency of traditional and unconventional practices, from previous studies to improve the performance of transmission lines in the face of lightning, to reduce the outages rates.

Finally, were presented the results obtained through simulations using the computation plattaform "Alternative Transients Program – ATP". Was considered a typical configuration of transmission lines and two forms of wave current: first discharge and subsequent discharge, to evaluate the overvoltage caused the lines. Then, an evaluation of practices for reducing the number of outages was done.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1 RELEVÂNCIA DA INVESTIGAÇÃO.....	11
1.2 OBJETIVO	12
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	12
2. CARACTERIZAÇÃO DO FENÔMENO DESCARGA ATMOSFÉRICA.....	14
2.1 INTRODUÇÃO	14
2.2 A DESCARGA ATMOSFÉRICA	14
2.3 TIPIFICAÇÃO DA DESCARGA ATMOSFÉRICA	15
2.3.1 <i>Processo de Formação da Descarga Única (ou primeira)</i>	16
2.3.2 <i>Processo de Formação da Descarga Subseqüente</i>	18
2.3.3 <i>Processo de Formação da Descarga Positiva</i>	18
2.4 PRINCIPAIS PARÂMETROS DA CORRENTE DE DESCARGA	19
2.4.1 <i>Forma de Onda da Corrente</i>	20
2.4.2 <i>Amplitude da Onda da Corrente</i>	21
2.4.3 <i>Tempo de Frente da Onda da Corrente</i>	22
2.4.4 <i>Tempo de Meia Onda</i>	24
3. MECANISMOS DE DESLIGAMENTOS DEVIDO À DESCARGA ATMOSFÉRICA.....	26
3.1 INTRODUÇÃO	26
3.2 FLASHOVER	29
3.3 BACKFLASHOVER	30
3.4 RUPTURA DE MEIO DE VÃO.....	32
3.5 INFLUÊNCIA DAS TORRES ADJACENTES NA MINIMIZAÇÃO DO BACKFLASHOVER.....	34
4. PRINCIPAIS TÉCNICAS UTILIZADAS PARA MELHORAR O DESEMPENHO DAS LT'S.....	35
4.1 INTRODUÇÃO	35

4.2	TÉCNICAS CONVENCIONAIS	36
4.2.1	<i>Redução da Impedância de Aterramento</i>	36
4.2.1.1	Valores recomendados da impedância de aterramento	39
4.2.2	<i>Utilização de Pára-raios na Linha de Transmissão</i>	39
4.2.2.1	Funcionamento do pára-raios de ZnO.....	40
4.2.2.2	Resultados obtidos a partir da utilização de pára-raios de ZnO ...	41
4.2.3	<i>Acréscimo de Isoladores na Cadeia</i>	44
4.3	TÉCNICAS NÃO-CONVENCIONAIS.....	44
4.3.1	<i>Resultados Obtidos com Técnicas Não-Convencionais</i>	45
5	MODELAGEM DE LINHAS DE TRANSMISSÃO E ESTUDO DE CASO.....	49
5.1	INTRODUÇÃO	49
5.2	MODELAGEM DA LINHA DE TRANSMISSÃO	50
5.3	MODELAGEM DAS ONDAS DE CORRENTE	53
5.4	ESTUDO DE CASO	57
5.4.1	<i>Introdução</i>	57
5.4.2	<i>Cálculo da Corrente de Retorno Crítica</i>	60
5.5	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES	61
5.5.1	<i>Introdução</i>	61
5.5.2	<i>Forma de Onda das Sobretensões Resultantes</i>	61
5.5.3	<i>Cálculo da Corrente Crítica</i>	67
5.5.4	<i>Análise Geral dos Resultados</i>	69
5.5.5	<i>Sugestões para Garantir o bom Desempenho da Linha</i>	71
6	CONCLUSÃO	73
6.1	INTRODUÇÃO	73
6.2	CONCLUSÕES GERAIS	73
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76

LISTA DE FIGURAS

Nesta seção foram listadas todas as figuras que foram apresentadas no decorrer do texto, para melhor ilustrar o trabalho.

. Figura 2.1 – Distribuição típica de cargas elétricas na nuvem de tempestade.

. Figura 2.2 – Evolução do canal descendente da descarga atmosférica.

. Figura 2.3 – Representação das descargas negativas e positivas, enfatizando os centros de carga na nuvem, relacionados a cada um dos fenômenos.

. Figura 2.4 – Formas Medianas de onda de corrente de descargas negativas descendentes: primeira descarga (a) e descarga subsequente (b)

Figura 2.5 – Forma de onda e valores medianos de corrente.

Figura 2.6 – Parâmetros de tempo de onda de descarga.

Figura 3.1 – Curvas de isodensidade de descargas atmosféricas em Minas Gerais de 1985 a 1996.

Figura 3.2 – Linha de transmissão sendo iluminada pelo campo eletromagnético gerado por uma descarga atmosférica próxima à linha.

Figura 3.3 – Representação de uma descarga direta numa linha de transmissão trifásica sem cabos de blindagem.

Figura 3.4 – Representação da incidência da descarga no cabo de blindagem.

Figura 3.5 – Representação da incidência de uma descarga no cabo de blindagem no meio do vão de uma LT.

Figura 4.1 – Z_p x resistividade do solo para diversos comprimentos de cabos contrapesos.

Figura 4.2 – Z_p x comprimento do cabo contrapeso para diversos valores de resistividade.

Figura 4.3 – Curvas de sobretensão com e sem a utilização do pára-raios.

Figura 4.4 – Índice de desligamentos por ano na referida LT.

Figura 4.5 – Sobretensão desenvolvida nas cadeias de isoladores.

Figura 5.1 – Ilustração dos componentes da linha envolvidos no percurso da corrente de descarga.

Figura 5.2 – Estrutura típica da linha de transmissão estudada.

Figura 5.3 – Forma de onda da primeira descarga com pico duplo, obtida na simulação com ATP.

Figura 5.4 – Forma de onda da descarga subsequente na simulação com o ATP.

Figura 5.5 – Configuração do aterramento no pé da estrutura metálica.

Figura 5.6 – Representação da incidência de uma primeira descarga na LT.

Figura 5.7 – Representação da incidência de uma descarga subsequente na LT.

Figura 5.8 – Sobretensões resultantes com a injeção de corrente no topo da estrutura 5 – Primeira Descarga.

Figura 5.9 – Sobretensões resultantes com a injeção de corrente no topo da estrutura 5 – Descarga Subseqüente

Figura 5.10 – Sobretensões resultantes com a injeção de corrente no topo da estrutura 6 – Primeira Descarga

Figura 5.11 – Sobretensões resultantes com a injeção de corrente no topo da estrutura 6 – Descarga Subseqüente.

Figura 5.12 – Sobretensões resultantes com a injeção de corrente no topo da estrutura 16 – Primeira Descarga.

Figura 5.13 – Sobretensões resultantes com a injeção de corrente no topo da estrutura 16 – Descarga Subseqüente.

Figura 5.14 – Sobretensão resultante com a injeção de corrente no meio do vão 5 – Primeira Descarga.

Figura 5.15 – Sobretensão resultante com a injeção de corrente no meio do vão 5 – Descarga Subseqüente.

Figura 5.16 – Sobretensão resultante com a injeção de corrente no meio do vão 6 – Primeira Descarga.

Figura 5.17 – Sobretensão resultante com a injeção de corrente no meio do vão 6 – Descarga Subseqüente.

Figura 5.18 – Sobretensão resultante com a injeção de corrente no meio do vão 14 – Primeira Descarga.

Figura 5.19 – Sobretensão resultante com a injeção de corrente no meio do vão 14 – Descarga Subseqüente.

Figura 5.20 – Corrente crítica para injeção de corrente no topo da estrutura.

Figura 5.21 – Corrente crítica para injeção de corrente em três pontos ao longo dos três vãos mais extensos da linha.

Figura 5.22 – Configuração aprimorada para o aterramento das estruturas metálicas autoportantes.

LISTA DE TABELAS

Nesta seção foram listadas todas as tabelas que foram apresentadas no decorrer do texto, para melhor compreensão do trabalho.

Tabela 2.1 – Valores medianos para os parâmetros de correntes de descargas atmosféricas.

Tabela 3.1 – Níveis de isolamento por classe de tensão e valores máximos de sobretensão e desligamentos.

Tabela 4.1 – Valores recomendados de impedância para pé de torre.

Tabela 4.2 – Simulação do impacto de uma descarga diretamente na estrutura.

Tabela 4.3 – Aplicação de Pára-raios de ZnO.

Tabela 4.4 – Resultados da Aplicação de Pára-raios de ZnO em LT's 138 kV.

Tabela 5.1 – Dados elétricos e mecânicos dos cabos aéreos utilizados na linha de transmissão. (a) condutores fase e (b) cabo de blindagem.

Tabela 5.2 – Parâmetros considerados para obtenção da curva de corrente da primeira descarga com pico duplo.

Tabela 5.3 – Parâmetros considerados para obtenção da curva de corrente da descarga subsequente.

Tabela 5.4 – Parâmetros elétricos e físicos das torres para montagem equivalente da LT estudada.

Tabela 5.5 – Sobretensões resultantes devido à incidência direta de uma descarga atmosférica no topo das estruturas da LT.

Tabela 5.6 – Sobretensões resultantes nos possíveis pontos de incidência da descarga atmosférica no meio de vão da linha.

Tabela 5.7 – Sobretensões resultantes devido à incidência direta de uma descarga atmosférica real no topo das estruturas da LT.

Tabela 5.8 – Sobretensões resultantes nos possíveis pontos de incidência de uma descarga atmosférica real no meio de vão da linha.

Tabela 5.9 – Sobretensões resultantes no topo das estruturas com a nova configuração no aterramento de pé-de-torre.

GLOSSÁRIO

Nesta seção foram apresentadas algumas terminologias e simbologias, utilizadas no corpo do texto.

- . **Alternative Transients Program (ATP):** programa destinado ao cálculo de tensões resultantes em cabos ou estruturas devido à descarga atmosférica
 - . **Backflashover:** processo de rompimento da suportabilidade elétrica de uma cadeia de isoladores a partir da incidência direta da descarga atmosférica no condutor de blindagem ou na estrutura metálica.
 - . **Canal Ascendente:** canal ionizado, configurado a partir da disrupção do ar, que se propaga ascendentemente a partir do solo.
 - . **Canal de Descarga:** canal ionizado correspondente ao percurso integral que conecta os pontos entre os quais ocorre a descarga.
 - . **Canal Descendente:** canal ionizado, configurado a partir da disrupção do ar, que se propaga descendentemente a partir da nuvem de tempestade.
 - . **Canal Precursor de Descarga:** canal ionizado que evolui por passos, da ordem de 50m, correspondentes a descargas atmosféricas sucessivas no ar, que ocorrem a cada intervalo de 50 μ s.
 - . **CEMIG:** Companhia Energética de Minas Gerais.
 - . **Corrente de Retorno:** corrente que flui pelo percurso ionizado correspondente ao canal de descarga após o seu fechamento e que corresponde o descarregamento deste.
 - . **Descarga Atmosférica:** corresponde ao fenômeno integral envolvido na evolução e fechamento do canal de descarga, incluindo o fluxo da corrente de retorno e as demais manifestações elétricas, visuais e sonoras.
 - . **Descarga de Retorno:** evento associado ao fluxo de corrente de retorno correspondente a uma descarga elétrica pelo canal de descarga.
 - . **Descarga Direta:** evento associado à incidência de uma descarga diretamente sobre uma vítima.
 - . **Descarga Indireta:** evento associado a uma descarga que incide próxima à vítima, que pode é capaz de gerar efeitos na mesma, em decorrência dos campos eletromagnéticos gerados.
 - . **Flashover:** mecanismo de ruptura do isolamento associado à incidência direta de descarga no condutor fase.
 - . **LT:** linha de transmissão aérea de energia elétrica.
 - . **Nível Cerâmico:** número de dias com trovoadas ouvidas no período de um ano.
-

. **Nível Básico de Isolamento (NBI):** valor de sobretensão pela qual uma linha de transmissão ou equipamento pode ser submetida sem alterações de suas características.

. **Pará-raios de ZnO:** equipamentos instalados em torres de linhas de transmissão para evitar o seu desligamento. É composto de Óxido de Zinco.

. **Resistência de Aterramento de Impulso:** impedância de impulso do sistema de aterramento de linha de transmissão quando submetido a uma descarga atmosférica de alta frequência.

. **Resistência de Pé de Torre (R_t):** valor da resistência de aterramento medido em baixa frequência, do conjunto de ferragens e eletrodos que constituem o sistema de aterramento de uma torre de uma linha de transmissão. Seu valor é dado em ohms.

. **Resistividade do solo (ρ):** é um parâmetro que pode ser obtido indiretamente através da resistência elétrica (R) medida entre as fases opostas de um cubo de dimensões unitárias ($L \times L \times L$) preenchido com uma porção homogênea de solo que se deseja investigar.

. **Tempo de Frente da Onda (T_f):** é o tempo em μs que a frente de onda leva para atingir seu valor máximo.

. **Tempo de Cauda (T_c):** é o tempo em μs que a frente de onda leva para atingir a metade de seu valor máximo.

. **I:** intensidade de corrente elétrica

. **R:** resistência em ohms

. **Zat:** impedância de aterramento

. **Zp:** impedância impulsiva de aterramento

. **Zs:** impedância de surto

1. INTRODUÇÃO

1.1 Relevância da Investigação

As descargas atmosféricas constituem a principal fonte de desligamentos não programados em linhas de transmissão. Isso ocorre porque, em geral, estas linhas percorrem grandes extensões em campo aberto, o que aumenta consideravelmente a possibilidade da incidência da descarga sobre as mesmas.

Geralmente, o desligamento em linhas de transmissão com tensão de operação a partir de 138 kV, ocorre a partir de duas situações: a incidência da descarga atmosférica diretamente nos condutores fase e a incidência diretamente nos cabos de blindagem ou na estrutura metálica da linha. Apesar de ser um evento de curta duração (até centenas de milissegundos), em ambos os casos o campo eletromagnético gerado a partir da corrente de retorno pode causar sobretensões de grande magnitude na linha que, em muitos casos, excedem o nível de isolamento da mesma. Alguns fatores como resistividade do solo e nível cerâmico da região contribuem diretamente para tornar mais críticas às sobretensões submetidas às linhas. As interrupções correspondem a um importante fator de comprometimento no fornecimento de energia e de sua qualidade. Para que haja o decréscimo destes desligamentos é necessário que as concessionárias de energia arquem com altos investimentos para manter e aumentar a confiabilidade do sistema, a fim de se precaver contra a ação das descargas atmosféricas.

Existem também as descargas que incidem em regiões próximas à linha e são denominadas “descargas indiretas”. Nesse caso, ondas de tensão e corrente impulsivas são induzidas nos condutores fase e cabos de blindagem do sistema. Entretanto, em geral, a magnitude destas grandezas não são significativas comparadas ao NBI das linhas de transmissão de alta tensão.

Diante do exposto, é importante que se tenha um pleno conhecimento dos mecanismos determinantes dos desligamentos devido à descarga, para fins da definição das práticas de proteção adequadas para assegurar melhor

desempenho das linhas de transmissão. Em LT's com tensão nominal até 230 kV o mecanismo que prevalece é o "*Backflashover*". Mesmo acima deste nível de tensão, as sobretensões geradas nas LT's devido às descargas atmosféricas podem ultrapassar o NBI das mesmas e causar danos ao sistema.

1.2 Objetivo

O objetivo fundamental desta monografia consiste na apresentação de uma revisão da literatura sobre o tema: desempenho de linhas de transmissão de alta tensão frente a descargas atmosféricas, considerando a formação do fenômeno "descargas atmosféricas" e os danos causados quando da sua incidência, assim como a avaliação das práticas de proteção adequadas (tradicionais ou não convencionais), utilizadas com a finalidade de minimizar os desligamentos causados pelas sobretensões de origem atmosféricas.

Para consolidar tal objetivo, no que diz respeito à avaliação das práticas de proteção utilizadas, foi adotado como metodologia a simulação de uma configuração típica de linha de transmissão, utilizando-se a ferramenta computacional ATP. Da análise dos resultados decorreram conclusões e propostas de aplicação de metodologias e estratégias para proteção do sistema.

1.3 Organização do texto

Este texto foi elaborado e organizado em sete capítulos, incluindo a presente **Introdução** que expressa a relevância, a motivação e um resumo do assunto.

O **Capítulo 2** considerou os aspectos relativos à formação da descarga atmosférica, ressaltando os aspectos físicos desse fenômeno, e os principais parâmetros da onda de corrente associada.

O **Capítulo 3** apresenta uma descrição sucinta dos principais mecanismos associados à descarga atmosférica, detalhando todos os aspectos teóricos necessários para o melhor entendimento dos mecanismos que ocorrem quando a descarga atinge diretamente os condutores fase ou os cabos de blindagem,

provocando o estabelecimento de uma sobretensão que pode ser superior ao nível básico de isolamento da linha.

O **Capítulo 4** deste trabalho apresenta as principais técnicas, tradicionais e não-convencionais utilizadas para melhoria do desempenho das linhas de transmissão de alta tensão sob ação de descargas atmosféricas. Além disso, foi feito uma avaliação preliminar das metodologias aplicadas.

No **Capítulo 5** foi apresentada a modelagem da linha que será utilizada nas simulações computacionais para representar a incidência direta da descarga atmosférica, utilizando o programa computacional ATP. Posteriormente foi feito um estudo de caso prático para uma linha de transmissão de 138kV. Tal estudo avalia e discute os resultados obtidos na simulação computacional assim como sugere técnicas para melhoria do desempenho da linha em questão.

Já no **Capítulo 6** são apresentadas às conclusões finais deste trabalho.

No último Capítulo são apresentadas todas as **Referências Bibliográficas** utilizadas durante a elaboração do presente texto.

2. CARACTERIZAÇÃO DO FENÔMENO DESCARGA ATMOSFÉRICA

2.1 Introdução

As descargas atmosféricas consistem-se na principal fonte de desligamentos não programados em linhas de transmissão. Isso ocorre porque, em geral, estas linhas percorrem grandes extensões em campo aberto, o que aumenta consideravelmente a possibilidade da incidência da descarga sobre as mesmas.

A grande importância que se caracteriza este fenômeno é que sua frequência de incidência e seus parâmetros físicos podem influenciar diretamente o desempenho de uma linha de transmissão, o que pode ser expresso, por meio da quantificação do número de interrupções em seu funcionamento devido às descargas atmosféricas [12]. Este desempenho é usualmente dado por número de desligamentos por unidade de comprimento e por unidade de tempo (desligamentos/km/ano).

Para caracterizar de forma objetiva o fenômeno descarga atmosférica toda a abordagem foi desenvolvida fundamentalmente com base na referência [21].

2.2 A Descarga Atmosférica

A descarga atmosférica pode ser definida como uma descarga elétrica de curta duração, com uma alta corrente associada, que usualmente atinge quilômetros de extensão a partir da nuvem e, em alguns casos, atinge a superfície da terra. Tal descarga ocorre quando o centro de cargas de nuvens de tempestade, em uma determinada região da atmosfera, atinge uma quantidade de cargas elétricas de forma a gerar campos elétricos tão intensos que superam a rigidez dielétrica do ar, causando assim, sua ruptura. Esta suportabilidade vale aproximadamente 3MV/m para o caso do ar seco em condições atmosféricas padronizadas, mas pode ser menor, em pressões reduzidas.

Para que o processo aconteça, é necessário que as condições ambientais estejam bem favoráveis como encontrado, por exemplo, nas nuvens sobre vulcões em erupção e no interior de grandes tempestades de neve e de areia. Porém, a grande maioria das descargas tem sua origem nas chamadas nuvens de tempestades (*Cumulus Nimbus*) que possuem regiões de concentração de cargas positivas e de cargas negativas. Pouco acima da base da nuvem de tempestade há uma forte concentração de cargas negativas. Já as partes medianas e superiores da nuvem possuem concentração de cargas positivas relativamente espalhadas, ocupando um grande volume, como apresentada na Figura 2.1. Na parte inferior da nuvem, abaixo da camada negativa, podem ser encontradas algumas pequenas concentrações de cargas positivas. Entretanto, o somatório das cargas tende a ser neutro.

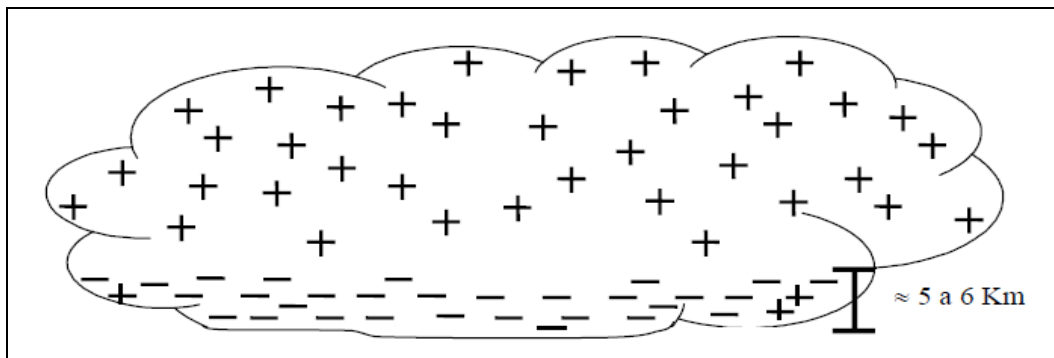


Figura 2.1 – Distribuição típica de cargas elétricas na nuvem de tempestade (Adaptado de [21])

O percurso das descargas nas nuvens de tempestade pode ser estabelecido de quatro maneiras diferentes: descargas internamente à nuvem, entre nuvens, entre a nuvem e a estratosfera e entre a nuvem e o solo [12].

As descargas entre nuvem e o solo são aquelas que despertam maior interesse, pois o fluxo da corrente de retorno pelo canal de descarga estabelecido entre a nuvem e o solo é capaz de determinar condições severas de risco para a vida e para a sociedade na superfície da terra [21]. Estima-se que cerca de 25% do total das descargas atmosféricas sejam desta natureza.

2.3 Tipificação da Descarga Atmosférica

As descargas de nuvem para o solo podem ser classificadas em descargas ascendentes e descendentes segundo a direção da evolução do canal de descarga

que faz o fechamento do percurso ionizado. Elas também podem ser classificadas segundo a polaridade da carga na região da nuvem conectada ao solo por esse percurso como: negativas ou positivas. Deste modo, podemos ter descargas atmosféricas descendentes positivas e negativas e descargas ascendentes positivas e negativas [12].

Aproximadamente 90% das descargas que atingem a linha de transmissão é de polaridade negativa, o que é de grande importância para o desempenho das linhas e dos equipamentos em virtude da diferente resposta de suas isolações de acordo com a polaridade. De forma geral, o valor médio da crista da corrente de descarga varia entre 30kA e 50kA, dependendo do local da ocorrência. O tempo médio de duração de uma corrente de descarga aproxima-se de 300ms. Para descargas entre nuvem e solo, seu percurso pode estender entre 1 e 3km abaixo da nuvem, embora seu percurso total possa superar 10km [21].

Considerando a descarga negativa descendente, e tendo em vista o seu processo de formação, podemos separá-la em dois tipos: a descarga única (ou primeira) e a(s) descarga(s) subsequente(s).

2.3.1 Processo de Formação da Descarga Única (ou primeira)

Devido às cargas elétricas negativas concentradas na base da nuvem, cargas de sinal contrário são induzidas na superfície da terra. Em função disso é estabelecido um intenso campo elétrico que por sua vez, gera uma diferença de potencial entre a nuvem e o solo. O valor desta diferença pode ser bastante elevado (da ordem de centenas de megavolts), embora, em alguns casos, este valor ainda não seja superior à rigidez dielétrica do ar (aproximadamente 3MV/m).

Geralmente o processo se inicia na região interna da nuvem onde o campo elétrico se apresenta mais intenso e atinge valores superiores à rigidez dielétrica do ar, determinando a ocorrência da descarga atmosférica, através de um canal ionizado de plasma com alta condutividade, cujo percurso possui um comprimento de várias dezenas de metros. Em consequência desta descarga inicial, há um grande acúmulo de cargas negativas nas extremidades deste canal que contribui para o aumento do campo elétrico nestas extremidades. Desta

forma, vão ocorrendo outras rupturas (num intervalo de tempo de aproximadamente $50 \mu\text{s}$) que resultarão em descargas consecutivas, similares à inicial. Surge então o que denominamos de canal precursor de descarga [21].

Vale lembrar que para que o canal continue evoluindo é necessário que o campo elétrico médio ao longo do percurso no qual o eventual passo de descarga pode se estender, tenha um valor suficiente (cerca de $0,6\text{MV/m}$) para sustentar a evolução do fenômeno. Caso isso não aconteça o processo é interrompido e a energia do canal é dissipada.

Com a evolução deste canal descendente, o campo elétrico próximo a superfície da terra torna-se muito elevado. Desta forma, pode ocorrer o surgimento de canais ascendentes que evoluem num processo semelhante ao descrito para a descarga descendente. A figura 2.2 mostra a evolução do canal descendente de uma descarga negativa nuvem-solo. A partir da evolução dos canais descendente e ascendente ocorre uma descarga que promove o fechamento do canal entre a nuvem e o solo. Este fenômeno ocorre em algumas centenas de metros acima da superfície. A partir deste fechamento é estabelecida uma onda de corrente de alta intensidade chamada corrente de retorno [21]. A carga que se desloca no canal é sempre negativa, ou seja, na formação do canal descendente os elétrons se deslocam para baixo ao longo do canal. Já nos canais ascendentes há o deslocamento dos elétrons para baixo dando a impressão que os prótons estão deslocando para cima.

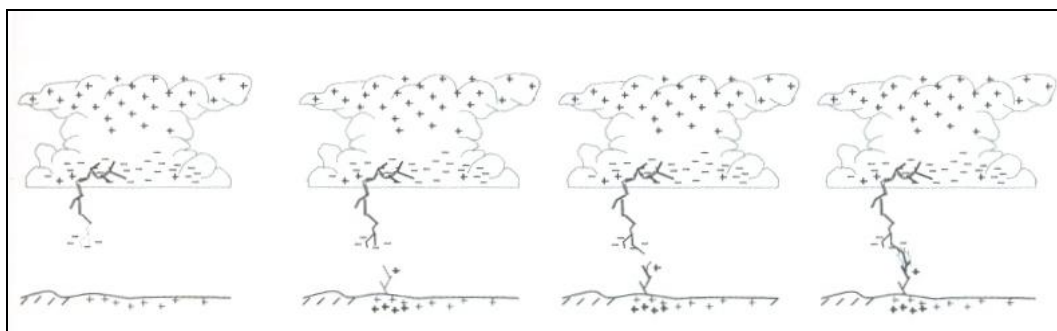


Figura 2.2 – Evolução do canal descendente da descarga atmosférica (adaptado de [21]).

A descarga é denominada “única” quando ocorre um único fluxo de corrente de retorno percorrendo o canal ionizado formado entre a nuvem e o solo denominada “primeira” quando ocorrem as descargas subsequentes. O processo de formação destas descargas é similar.

2.3.2 *Processo de Formação da Descarga Subseqüente*

As descargas atmosféricas subseqüentes são aquelas que ocorrem logo após a extinção da corrente de retorno da primeira descarga, através do mesmo canal ionizado. Quando o canal é integralmente utilizado, a incidência se verifica para o mesmo local e nos casos em que o canal é usado apenas parcialmente, ocorre o processo passo a passo a partir da extremidade “acesa” do canal. A incidência se dá, nesses casos, em pontos no solo diferentes daquele da descarga anterior (distância da ordem de 2km, com limite de 10km).

Estima-se que em 80% dos casos possa ocorrer a descarga subseqüente. Esse processo pode se repetir sucessivamente e, em média, tem três ocorrências consecutivas.

Em geral, a intensidade da corrente de retorno das descargas subseqüentes é menor se comparada com as primeiras descargas. Isso acontece porque quanto ocorre o fechamento do canal, a corrente de retorno subseqüente encontra o canal pre-ionizado. Além disso, o tempo de frente de onda também é menor em relação a primeira descarga, provavelmente, devido à redução da impedância do canal para a onda de corrente que se propaga. Os principais parâmetros de corrente relativos às descargas únicas e subseqüentes serão abordados com maior ênfase, no item 2.4.

2.3.3 *Processo de Formação da Descarga Positiva*

Apesar da maior manifestação das descargas negativas descendentes na superfície da terra, em função da própria configuração elétrica da nuvem de tempestade, alguns fatores climáticos e geográficos podem favorecer a formação da descarga positiva. Isso ocorre quando ventos fortes deslocam a parte superior da nuvem, carregadas positivamente, que induzem cargas negativas na superfície da terra, sobretudo em regiões mais altas (serras, montanhas, etc.), conforme apresentado na Figura 2.3. Diante disso ocorre um processo de formação da descarga, similar ao das descargas negativas, porém com o canal ascendente. Da mesma forma surge um canal descendente positivo a partir da parte da nuvem que foi deslocada.

Com a evolução destes canais, é possível que ocorra o fechamento entre eles e ocorra a descarga positiva para o solo. Vale lembrar que não são os prótons que vai para o solo e sim os elétrons que sobem para a nuvem, já que somente as cargas negativas se movimentam. Como mostrado na figura 2.2, no caso da descarga negativa os elétrons que estão na base da nuvem irão fluir para o solo. Já no caso da descarga positiva os elétrons presentes no topo da montanha deverão fluir para a nuvem, caso ocorra o fechamento do canal em ambos os casos.

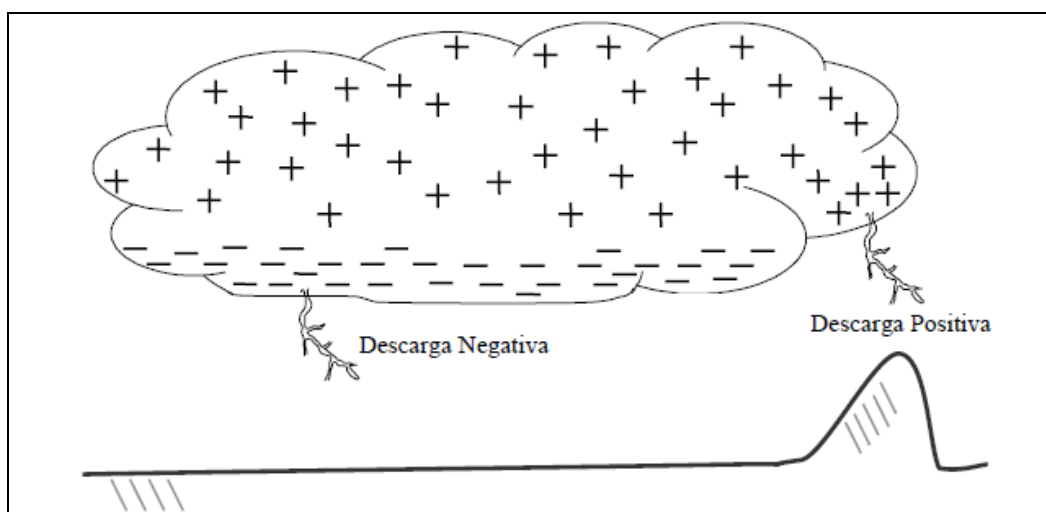


Figura 2.3 – Representação das descargas negativas e positivas, enfatizando os centros de carga na nuvem, relacionados a cada um dos fenômenos (adaptado de [21]).

2.4 Principais Parâmetros da Corrente de Descarga

Este item abordou os parâmetros relativos às descargas entre nuvem e solo que são aquelas que causam maiores problemas e, portanto apresentam maior interesse no que diz respeito ao estudo de proteção dos sistemas elétricos. Estes parâmetros podem ser divididos em duas categorias: parâmetros de frequência de incidência e parâmetros físicos.

O primeiro parâmetro quantifica a frequência da ocorrência da descarga em uma determinada região, representada pela densidade de carga local (N_g), e dada em “descargas/km²/ano”. O valor deste parâmetro está diretamente relacionado com o tipo de relevo, a latitude e a distribuição de chuvas de uma determinada região. As regiões com alto índice de precipitação apresentam índices mais elevados de densidade, assim como as regiões altas e

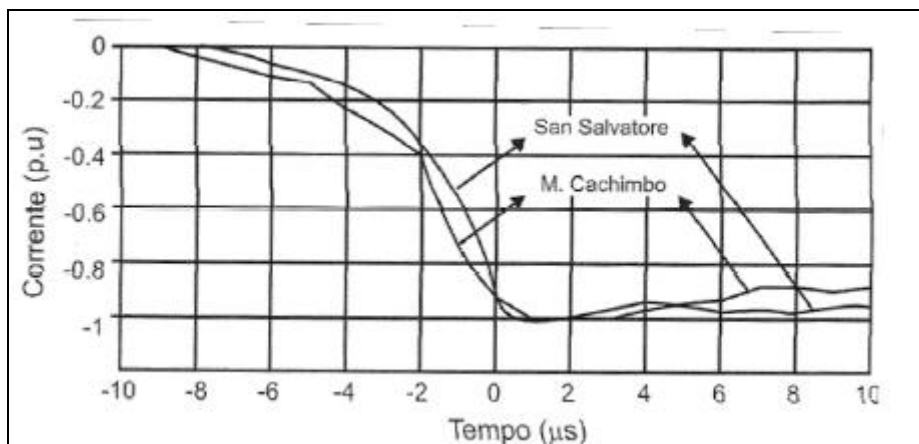
montanhosas. Na referência [21] são apresentados mapas de densidade de descargas no Brasil, Minas Gerais e numa região de Belo Horizonte, além de uma tabela com valores típicos de densidade de descargas em algumas regiões do mundo. Estes índices são obtidos a partir da rede de detecção e localização de descargas, por rede de contadores de descargas e por derivação indireta de informação de nível cerâmico local.

Há também os parâmetros da corrente de descarga. Estes parâmetros estão relacionados com a onda de corrente da descarga entre nuvem e solo, e correspondem a amplitude (corrente de pico), tempo de frente e tempo de meia onda. Os valores médios destas grandezas, apresentados a seguir, foram obtidos a partir de medições realizadas em duas torres instrumentadas, sendo uma instalada na estação do Morro do Cachimbo (Minas Gerais – Brasil) e a outra na estação de Monte San Salvatore (Suíça) [21]. Estas estações obtêm os parâmetros através de medição direta da corrente de descarga, utilizando-se o emprego de alguns tipos de transdutores especiais, os chamados “Shunts” e as bobinas de “Rogowski” e de “Pearson”. Geralmente estes transdutores são instalados na base ou no topo da torre e alimentam os sistemas de medição e registro da onda de corrente. Tais sistemas, normalmente, estão colocados em uma sala blindada, construída próxima à base da torre.

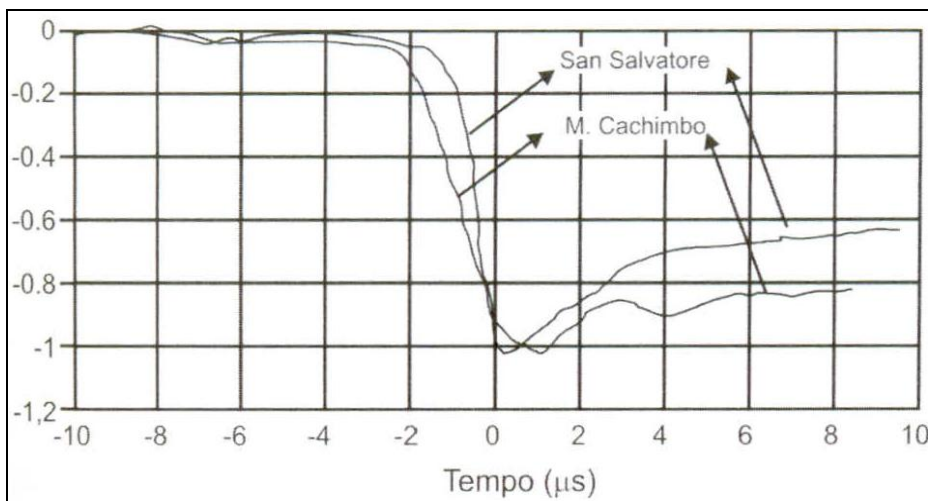
2.4.1 Forma de Onda da Corrente

Em função de sua natureza aleatória a forma de onda da corrente de descarga pode apresentar variações significativas, mesmo para um mesmo tipo de descarga. As formas “medianas” para as ondas de corrente da primeira descarga e descarga subsequente foram obtidas a partir de medições realizadas nas estações do Morro do Cachimbo e San Salvatore e são mostradas da figura 2.4 (a) e (b).

Os resultados são bastante similares para os dois tipos de descarga. Todas as curvas foram obtidas a partir do alinhamento individual das curvas e assumindo como referência o tempo de 90% da amplitude do primeiro pico de corrente.



(a)



(b)

Figura 2.4 – Formas Medianas de onda de corrente de descargas negativas descendentes: (a) primeira descarga e (b) descarga subsequente (adaptado de [27]).

2.4.2 Amplitude da Onda da Corrente

A amplitude da onda corresponde ao valor de pico alcançado pela onda de corrente da descarga e, em si tratando da proteção do sistema elétrico, é o parâmetro físico da corrente de maior interesse. Ele determina os níveis de sobretensão aos quais os componentes do sistema (cadeia de isoladores, aterramentos, etc.) estarão submetidos durante a descarga. Por isso, a amplitude é um parâmetro crítico para dimensionamento do isolamento e definição de práticas de proteção.

Geralmente, a onda da primeira descarga negativa apresenta dois picos antes de começar a decair. Na maioria das vezes o segundo pico atinge o maior valor. Já as ondas de descargas subseqüentes apresentam um único pico e com amplitude mediana bem menor (cerca de 40%). Por outro lado, a descarga positiva apresenta valores de pico bem superior às primeiras descargas negativas. Porém os valores medianos são bastante próximos. Na figura 2.5 são apresentada a forma de onda e os valores medianos dos picos de corrente dos três tipos de descargas citadas anteriormente.

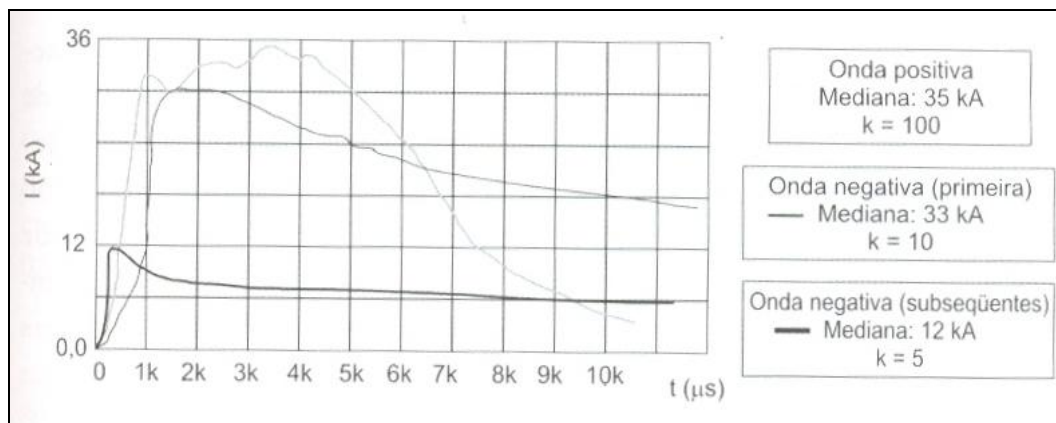


Figura 2.5 – Forma de onda e valores medianos de corrente (adaptado de [21]).

Nas simulações apresentadas no capítulo 5, as sobretensões foram obtidas para uma injeção de corrente de 1 kA, e as unidades de tensão estão em quilovolt por quilo-ampere de corrente injetada (kV/kA).

2.4.3 Tempo de Frente da Onda da Corrente

O tempo de frente de onda é o tempo no qual a onda de corrente da descarga atmosférica parte de um valor próximo de zero até atingir o primeiro pico da onda. Em se tratando de descargas diretas nas linhas de transmissão, este parâmetro está relacionado com a suportabilidade dos isolamentos dos sistemas elétricos, já que a suportabilidade depende significativamente da inclinação da frente de onda e o tempo da sobretensão gerada no sistema é aproximadamente ao tempo de frente da onda de corrente.

Devido à dificuldade de determinar o início da onda de corrente, tendo em vista que antes de se iniciar o pulso da corrente de retorno, já é detectado um pequeno valor de corrente pelos sistemas de medição, foram definidos alguns procedimentos que determina o tempo de frente, assumindo-se como referência os instantes em que são atingidos valores percentuais fixos do valor do primeiro pico da onda de corrente. Os parâmetros são os chamados T10 e T30, que são, respectivamente, os valores dos intervalos de tempo de 10% até 90% e 30% até 90% da corrente de pico, conforme mostrado na figura 2.6.

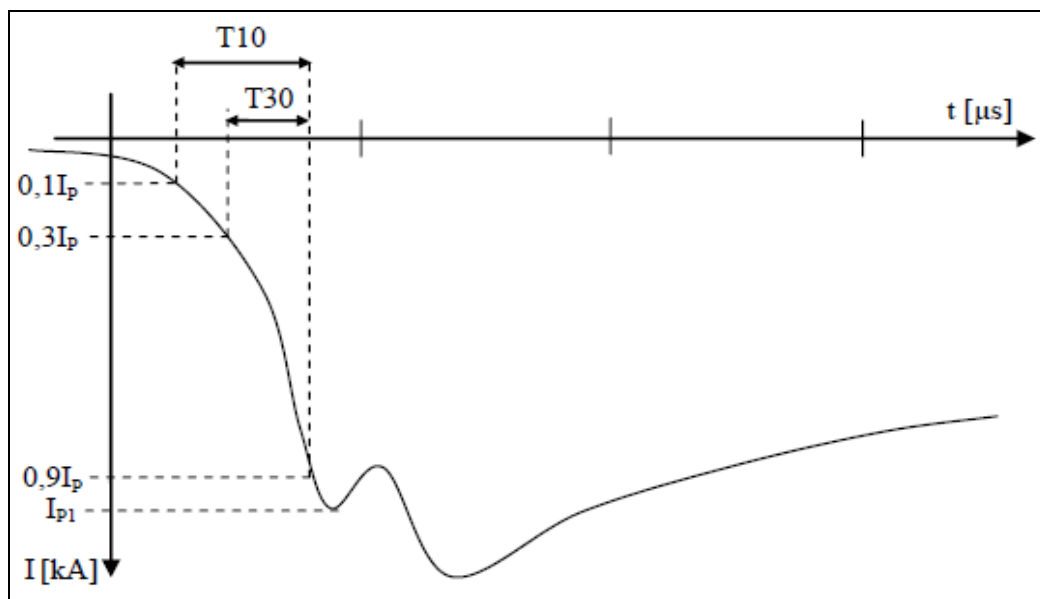


Figura 2.6 – Parâmetros de tempo de onda de descarga (adaptado de [11]).

A partir dos valores T10 e T30 são definidos, respectivamente os valores de TD10 e TD30 que representam o tempo de frente de onda da descarga calculados a partir das equações (2.1) e (2.2).

$$TD_{10} = \frac{0,9I_p - 0,1I_p}{0,8} = \frac{T_{10}}{0,8} \quad (2.1)$$

$$TD_{30} = \frac{0,9I_p - 0,3I_p}{0,6} = \frac{T_{30}}{0,6} \quad (2.2)$$

Estes valores possuem uma variação acentuada e alguns valores medianos de frente de onda são propostos. Tais proposições foram apresentadas a partir de medições realizadas nas estações de San Salvatore e Morro do Cachimbo.

Na tabela 2.1 são indicados os valores medianos da descarga entre nuvem e solo propostos para estes parâmetros. Apesar de não termos registros de descargas positivas na estação do Morro do Cachimbo, nota-se que as grandezas das descargas negativas são bastante aproximadas.

2.4.4 Tempo de Meia Onda

O tempo de meia onda é o tempo que a onda de corrente leva para partir de um valor próximo de zero até o instante em que a corrente, após ultrapassar seu valor de pico, tem seu valor reduzido pela metade do valor de pico. Como este tempo é bem superior ao tempo de frente da onda, não é relevante determinar em qual instante se iniciou a onda de corrente.

Este parâmetro mostra-se relevante quando se analisa a energia transferida pela descarga ao elemento atingido, podendo causar uma instabilidade térmica no isolamento. Como o valor do tempo de meia onda se associa às componentes de baixa frequência, o mesmo se torna pouco relevante para problemas relativos à sobretensão no sistema.

Na tabela 2.1, a seguir, também são apresentados os valores medianos deste parâmetro para descarga entre nuvem e solo.

Parâmetro	Descarga Positiva	Primeira descarga		Descargas subseqüentes	
	San Salvatore	San Salvatore	Morro do Cachimbo	San Salvatore	Morro do Cachimbo
Ipico (kA)	35	30	45	12	16
TD10/TD30 (μ s) *	22	5,6 / 3,8	7 / 4,8	0,75 / 0,67	0,88 / 0,67
TM (μ s)	230	75	53,5	32	16,4
TT (ms)	180	85	-	13	-
Carga (C)	80	4,5	5,2	0,95	0,99
Energia ($10^3 \cdot A^2s$)	650	55	107	60	63

Tabela 2.1 – Valores medianos para os parâmetros de correntes de descargas atmosféricas (adaptado de [21]).

* Para a descarga positiva, os parâmetros TD10 e TD30 foram substituído por tempo de frente.

Vale ressaltar que a densidade de descargas entre nuvem e solo no Brasil, é bem maior se comparado com a densidade em regiões temperadas. Além disso, os registros das descargas apontam que as correntes descendentes negativas têm amplitude maior que aquelas registradas nas regiões temperadas.

3. MECANISMOS DE DESLIGAMENTOS DEVIDO À DESCARGA ATMOSFÉRICA

3.1 Introdução

Uma das grandes preocupações das concessionárias de energia elétrica é reduzir o número de desligamentos não programados nas linhas de transmissão. Tal fato pode causar grandes transtornos em processos produtivos industriais, segurança civil, área médica, etc. Estatísticas internacionais atribuem às descargas atmosféricas cerca de 65% dos desligamentos das linhas. Em regiões como Minas Gerais, devido aos altos índices de densidade de descargas aliados aos altos valores de resistividade do solo (com valores médios de $2.500\Omega.m$, atingindo $20.000\Omega.m$ em alguns locais), o número de desligamentos devido às descargas podem ser ainda maiores, atingindo cerca de 70% do total dos desligamentos [1], [2], [9] e [21]. A figura 3.1, apresenta curvas de densidade de descargas atmosféricas ocorridas em Minas Gerais no período de 1985 a 1996, obtidas por rede de contadores de descargas.

Para que se possa garantir o bom desempenho de uma linha de transmissão é necessário que se conheçam todos os mecanismos determinantes para os desligamentos das LT's devido à descarga. A compreensão destes mecanismos é imprescindível para a definição e aplicação de práticas mais adequadas de proteção.

Os índices que expressam este desempenho levam em conta o número de desligamentos e as suas respectivas durações que vão determinar a qualidade da energia elétrica entregue aos consumidores finais. De acordo com o nível de tensão de operação de uma determinada linha, são definidos os limites aceitáveis do número de desligamentos por cada 100km de linha, conforme mostrado na tabela 3.1. Estes limites são adotados por concessionárias brasileiras do setor de energia elétrica.

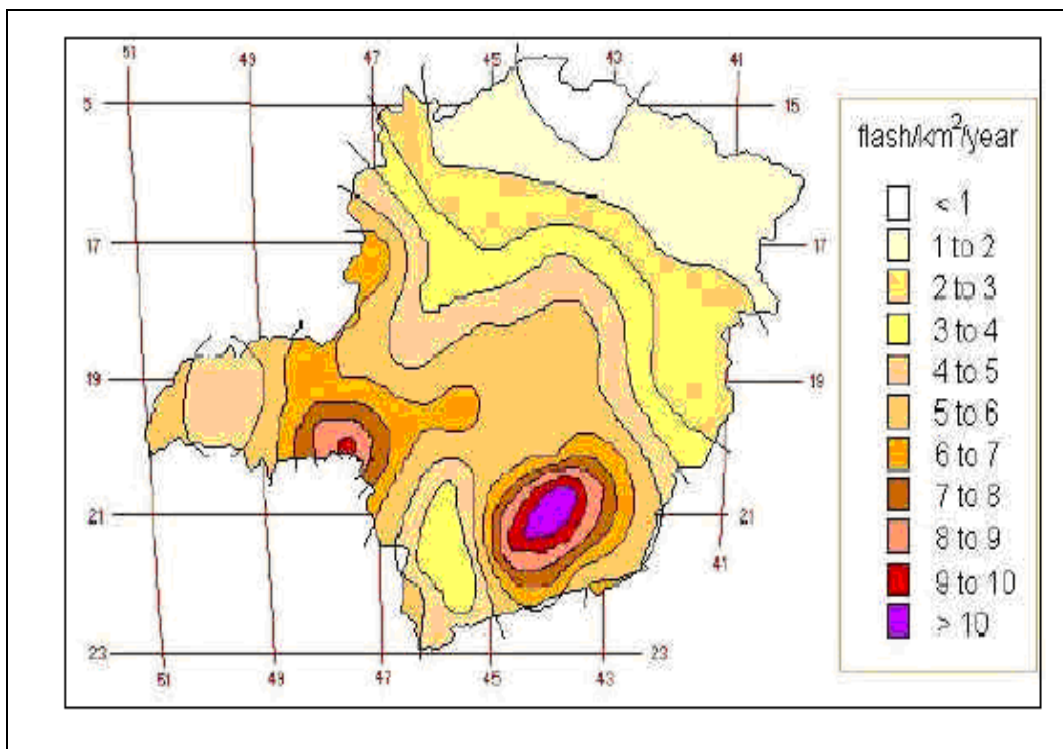


Figura 3.1 – Curvas de isodensidade de descargas atmosféricas em Minas Gerais de 1985 a 1996. (adaptado de [9]).

Nível de tensão de operação da LT	Valor mínimo do Nível Básico de Impulso – NBI (kV)	Valor usual de NBI (kV)	Número máximo de desligamentos (Desl./100km/ano)
69	380	450	10-15
138	650	850	10
230	975	1200	5
345	1240	1350	2-3
500	1612	1750	1-2

Tabela 3.1 – Níveis de isolamento por classe de tensão e valores máximos de sobretensão e desligamentos (adaptado de [21]).

As interrupções das linhas de transmissão podem ocorrer devido à incidência direta ou indireta da descarga atmosférica. No caso da incidência indireta a descarga não atinge a estrutura, o cabo de blindagem ou o condutor fase, mas uma região próxima à linha de transmissão. O mecanismo de estabelecimento é a sobretensão induzida. Quando a descarga incide próxima à linha, uma onda

eletromagnética viaja pelo ar e induz uma tensão nos condutores fase desta linha, conforme figura 3.2. Entretanto, apesar de serem mais freqüentes, as amplitudes das sobretensões geradas nos condutores são relativamente reduzidas (valores máximos próximos de 300kV) e inferiores aos valores de NBI das LT's apresentadas na tabela 3.1. Em geral, estas descargas causam maiores problemas em redes de distribuição e de telecomunicações, além dos sistemas de baixa tensão.

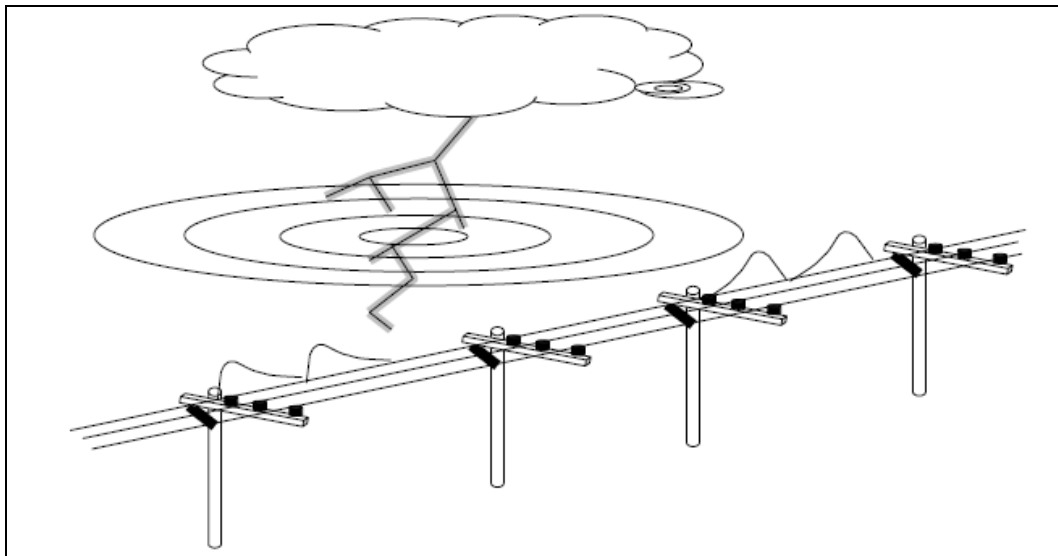


Figura 3.2 – Linha de transmissão sendo iluminada pelo campo eletromagnético gerado por uma descarga atmosférica próxima à linha (adaptado de [11]).

Os maiores problemas relativos à linha de transmissão ocorrem quanto a descarga incide diretamente nos componentes do sistema. Neste caso a descarga pode incidir diretamente no condutor fase, nos cabos de blindagem ou na estrutura metálica (se for o caso). Os mecanismos de estabelecimento de sobretensões por incidência direta são conhecidos como “*flashover*” e “*backflashover*”. O primeiro se estabelece quando a vítima é o condutor fase e o segundo quando é o cabo de blindagem. As características de cada mecanismo são consideradas a seguir.

Para estudo de proteção dos sistemas é importante conhecer a relação entre a disposição física dos cabos fase e o número de descargas que incidem sobre os mesmos, de forma a se criar a possibilidade de mapear quais fases ficam mais vulneráveis a sofrerem descargas.

3.2 Flashover

O estabelecimento do *flashover* ocorre quando a descarga atinge diretamente o condutor fase, devido à falha da blindagem ou ausência da mesma, o que é bastante comum em LT's com níveis de tensão mais baixos. Em geral, a falha do sistema de blindagem acontece em situações onde a amplitude da corrente de descarga é bastante reduzida, sendo capaz de atingir os condutores da linha. Vale ressaltar que, na ocorrência do flashover, o sistema de aterramento não tem influência na redução da sobretensão nas cadeias de isoladores.

Para avaliar os aspectos deste mecanismo, vamos considerar uma linha de transmissão trifásica sem cabos de blindagem sendo atingida por uma descarga atmosférica, conforme mostrado na figura 3.3. Importante ressaltar que a linha está isolada do plano de terra.

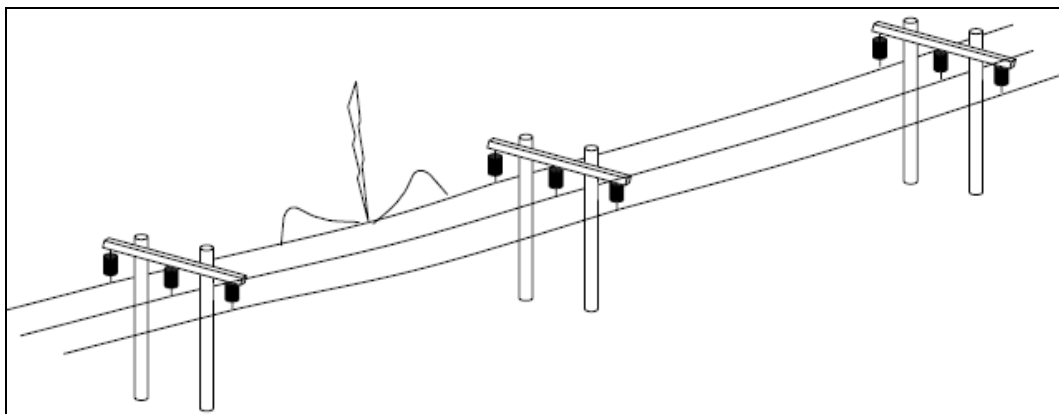


Figura 3.3 – Representação de uma descarga direta numa linha de transmissão trifásica sem cabos de blindagem (adaptado de [11]).

Ao incidir sobre o condutor a onda impulsiva de corrente se divide em duas parcelas praticamente iguais, que se propagarão em direções contrárias, cada uma com metade da amplitude da onda incidente.

Associada a cada onda de corrente tem-se uma onda de tensão que se propagam na linha. A sobretensão resultante é o resultado do produto entre a onda de corrente e a impedância da linha. Entretanto, para eventos rápidos como a descarga atmosférica, esta impedância se aproxima do valor da impedância de surto da linha (Z_s), dada pela equação 3.1, onde L e C são, respectivamente, a indutância e a capacitância da linha.

$$Z_s = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (3.1)$$

As ondas de corrente e tensão se propagam na linha até alcançarem uma estrutura aterrada. Desta forma, o isolador que está entre o condutor fase e a estrutura fica submetido à onda de sobretensão fase-terra. Na maioria das vezes, o valor de sobretensão ao qual é submetido o isolador é suficiente para causar o rompimento do isolamento da linha de transmissão. Desta forma, um arco elétrico entre o condutor energizado e a estrutura aterrada é estabelecido.

Para que se possa projetar a blindagem de linhas de transmissão, fundamentalmente é utilizado o modelo eletrogeométrico donde se permite definir as prováveis regiões de incidência da descarga atmosférica e, conseqüentemente, blindar toda a extensão da linha.

Em [15] são apresentados registros de descargas nas fases energizadas de linhas com disposição vertical, quantificando o número de incidência de descargas em cada uma das fases. Cerca de 43% das descargas atingiram os condutores da fase mais alta na torre, 34% atingiram os condutores na fase central e 23% o condutor na fase mais baixa. Estes dados podem servir como base para aplicação de técnicas de proteção.

3.3 Backflashover

O estabelecimento do *Backflashover* ocorre quando a descarga incide diretamente nos cabos de blindagem ou diretamente na estrutura metálica da linha. Caso a estrutura não seja metálica, os cabos de blindagem são conectados à malha de aterramento através de cabos de descida.

Os condutores de blindagem são posicionados estrategicamente sobre os condutores fase com o objetivo de blindar a linha contra a ocorrência do *flashover*. Entretanto, em função da amplitude da onda de corrente da descarga, pode ocorrer a falha do isolamento da linha quando da incidência no cabo de blindagem.

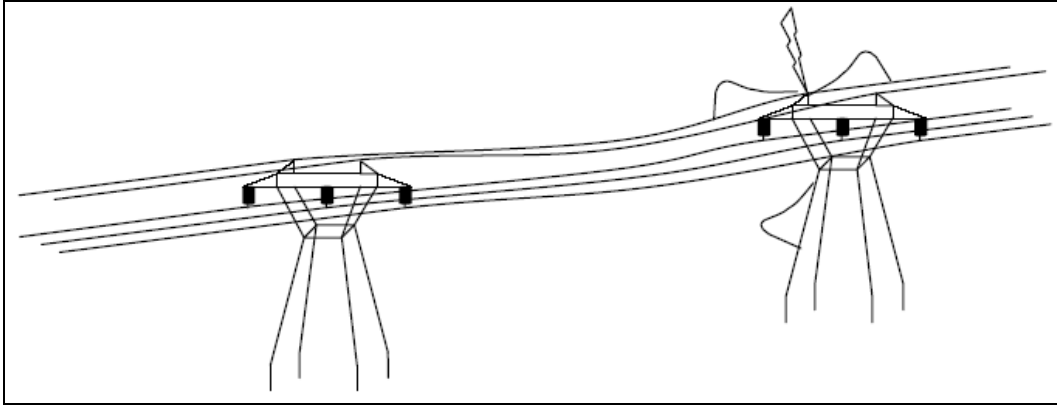


Figura 3.4 – Representação de incidência da descarga no cabo de blindagem (adaptado de [11]).

Ao atingir o cabo de blindagem da linha, conforme mostrado na figura 3.4, a onda de corrente se divide em duas parcelas praticamente iguais, que se propagarão em direções contrárias ao longo da linha, cada uma com metade da amplitude da onda incidente. Quando a incidência for longe das estruturas, estas ondas se propagam até encontrarem as estruturas metálicas (ou condutores que levam ao plano de terra) mais próximas. Grande parte da onda de corrente se propaga em direção ao solo e uma pequena parte continuará se propagando ao longo do cabo de blindagem.

Associada a cada onda de corrente que propaga pela estrutura há uma onda de sobretensão e sua amplitude corresponde ao produto entre a onda de corrente e a impedância de surto da torre, em altas frequências.

Em geral, os valores típicos da impedância de surto (Z_S) de uma torre são maiores que os valores da impedância de aterramento (Z_{AT}). Desta forma, ao atingir o aterramento da torre (ponto de descontinuidade) a onda de tensão sofre uma reflexão. A amplitude da onda de tensão refletida será obtida a partir do coeficiente de reflexão Γ [$\Gamma = (Z_{S2} - Z_{S1}) / (Z_{S2} + Z_{S1})$], que é obtido em função da relação entre as impedâncias de surto da torre e do aterramento. Quando maior a diferença entre as impedâncias maior será a reflexão da onda de tensão que propagará pela torre. Se o valor da impedância de aterramento for menor que a impedância da torre, o coeficiente de reflexão é negativo, indicando que a amplitude dessa onda tem sinal contrário àquele da onda incidente. Caso a impedância de aterramento seja maior, o coeficiente de reflexão é positivo. O valor da sobretensão resultante no topo da torre será obtido a partir da sobreposição entre a onda incidente e a onda refletida. Diante disso, pode-se

afirmar que quanto maior for o coeficiente de reflexão negativa, menor será a sobretensão no topo da torre, tendo em vista que a onda incidente será atenuada pela onda refletida.

Aliado ao coeficiente de reflexão negativo, outro fator que extremamente relevante na determinação da amplitude da sobretensão resultante é o tempo de transito (τ) da onda. Geralmente o tempo de transito é menor que o tempo de frente da onda de descarga e, por isso, a reflexão negativa atua na atenuação da onda de tensão. Quanto menor o τ , mais rápido a onda de tensão será atenuada.

Considerando valores médios de corrente de uma descarga atmosférica e valores típicos de impedância, foi possível fazer um breve estudo da sobretensão no topo da corrente. Os valores considerados foram, respectivamente, 200Ω , 30Ω e 20 kA para a impedância da torre, impedância de aterramento e corrente da descarga. O coeficiente de reflexão $\Gamma = -0,85$. Desta forma, o valor de sobretensão do topo da torre, descontando-se o tempo de 2τ , é de aproximadamente $3,4\text{MV}$. Este valor é bem superior ao nível de suportabilidade das cadeias de isoladores e, neste caso provavelmente resultará no desligamento da linha. Para ser mais preciso, a sobretensão na cadeia de isoladores é a diferença entre a sobretensão no topo da torre e a tensão de fase. Desta forma, a sobretensão será maior na cadeia de isoladores onde a onda de tensão da fase estiver passando pelo máximo valor negativo.

Alguns fatores podem ser bastante determinantes para diminuir o valor da sobretensão resultante nas cadeias de isoladores. Eles serão abordados no próximo capítulo deste trabalho.

3.4 Ruptura de Meio de Vão

O mecanismo de ruptura de meio de vão ocorre geralmente em linhas de transmissão de EAT e UAT que possuem vãos muito extensos entre as torres. Apesar do NBI destas linhas serem bastante elevados, a sobretensão resultante no meio do vão quando a descarga incide no meio do vão (longe das estruturas), pode ser de 3 a 4 vezes maior que o valor da sobretensão obtida quando a descarga atinge diretamente a estrutura [14] e [21]. A figura 3.5 ilustra a

incidência de uma descarga. O cálculo da sobretensão se dá a partir do produto da impedância de surto da linha e a metade da amplitude da onda de corrente.

Diferentemente do que foi citado no item anterior, o tempo de trânsito das ondas de corrente que ali se propagam podem ser maior que o tempo de frente de onda de descarga e desta forma não há tempo hábil para que a onda de reflexão negativa (caso $Z_T > Z_{AT}$) possa atenuar a onda de sobretensão entre o cabo de blindagem e o condutor fase. Na maioria das vezes ocorre a ruptura do isolamento entre o cabo e o condutor que resultará no curto-circuito e, eventualmente, no desligamento da linha. Caso o tempo de trânsito da onda de sobretensão seja menor que o tempo de frente da onda incidente, assim como no item anterior, teremos a atenuação da sobretensão no topo da estrutura. É importante ressaltar que as primeiras ondas de tensão refletidas são determinantes para a redução ou interrupção da onda de sobretensão no ponto de incidência e para que não ocorra a disrupção entre o cabo de blindagem e o condutor fase.

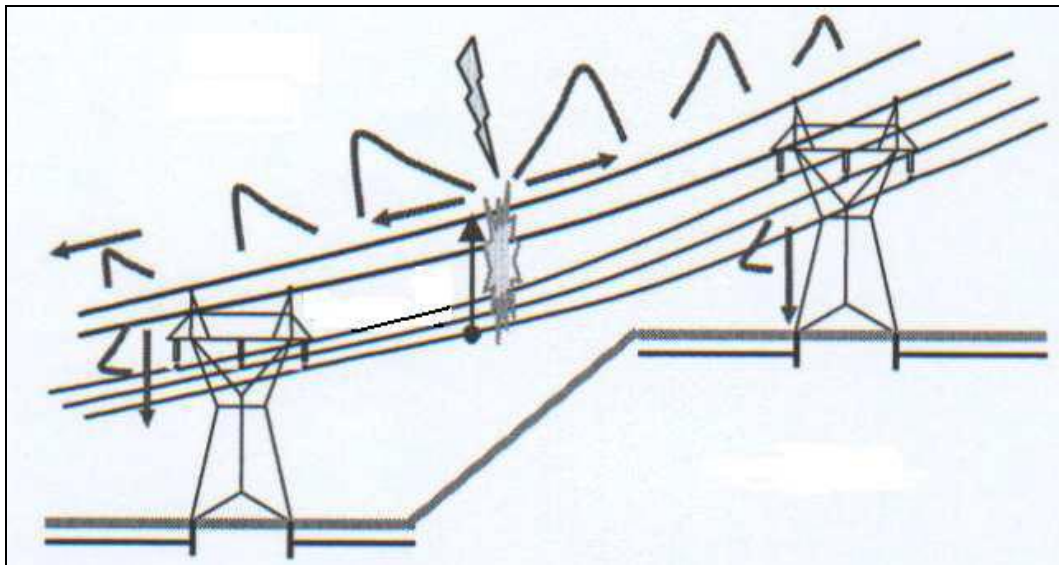


Figura 3.5 – Representação da incidência de uma descarga no cabo de blindagem no meio do vão de uma LT (adaptado de [21]).

Para exemplificar, vamos considerar uma onda com tempo de frente $2\mu\text{s}$ e um vão de 900 metros, sendo que a onda se propaga na velocidade da luz ($3E8$). Neste caso o tempo de transito será de $1,5\mu\text{s}$ e, até a onda refletida

atingir o ponto de incidência da descarga, a onda de sobretensão já atingiu seu pico e a onda de reflexão negativa não surtiu nenhum efeito.

Além das grandezas como amplitude e tempo de frente de onda da corrente, alguns parâmetros relacionados com as características físicas da linha como impedância de surto, tempo de propagação e distâncias mínimas entre os cabos de blindagem e condutores fase, podem influenciar no valor da sobretensão resultante da linha e na probabilidade de seu desligamento.

Conforme citado anteriormente este mecanismo é mais comum em linhas de transmissão com tensão nominal bem elevada. Infelizmente, poucos estudos foram realizados a fim de se promover alternativas para melhorar o desempenho de linha que se encaixe neste perfil.

3.5 Influência das Torres Adjacentes na Minimização do Backflashover

Até o presente momento o estudo do estabelecimento do mecanismo de *Backflashover* foi realizado considerando-se somente uma estrutura da linha. Em simulações realizadas em [14] e [19] foram consideradas a resposta de três torres de uma suposta linha de transmissão frente a descargas atmosféricas.

Conforme salientado anteriormente, quando a descarga incide no cabo de blindagem, a onda de corrente se divide em duas ondas com metade da amplitude. Quando estas ondas de corrente encontram a torre, grande parte desta onda é drenada para terra. Porém uma pequena parcela continua propagando pelo cabo de blindagem até encontrar a outra torre. Nas simulações realizadas uma onda de corrente foi injetada na torre central e, em ambas, as sobretensões estabelecidas nas cadeias de isoladores desta torre tiveram seus valores minimizados. Isso acontece porque os aterramentos das torres adjacentes, ao serem atingidos pela onda de corrente, refletem parte desta onda que retornará para o ponto de incidência da descarga. Geralmente a onda refletida é negativa e contribui para o decréscimo da sobretensão nas cadeias de isoladores da torre central. Diante dos resultados apresentados, pôde-se deduzir também que, quanto menor o vão entre duas torres, mais rápido a contribuição das torres adjacentes chega à torre atingida, atenuando as tensões estabelecidas sobre as cadeias de isoladores.

4. PRINCIPAIS TÉCNICAS UTILIZADAS PARA MELHORAR O DESEMPENHO DAS LT'S

4.1 Introdução

É cada vez mais crescente a preocupação das concessionárias de energia elétrica no que diz respeito ao melhoramento do desempenho das linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas. Diante disso, vários estudos vêm sendo realizados a fim de minimizar o índice de desligamentos das linhas e, conseqüentemente, melhorar a qualidade da energia fornecida aos consumidores.

Devido às suas condições geográficas e sua grande extensão, o Brasil é composto de um sistema elétrico onde muitas de suas linhas de transmissão estão dispostas em regiões que se encontra em situações bastante adversas, apresentando alta resistividade no solo ou em regiões montanhosas. Além disso, o índice de densidade de descarga no Brasil é bem elevado se comparado, principalmente, com países localizados em regiões temperadas.

Existem vários trabalhos na literatura que tratam de técnicas convencionais para a melhoria do desempenho da linha, considerando o *Backflashover* como o principal mecanismo de desligamento da linha.

Além das técnicas convencionais, existem as técnicas denominadas não-convencionais, que também são utilizadas a fim de solucionar ou complementarem as ações para minimizar o número de desligamento de uma determinada linha de transmissão. Em ambas as práticas, o objetivo é diminuir a amplitude da sobretensão resultante na cadeia de isoladores devido a onda de corrente causada pela incidência da descarga. Em geral, as técnicas não-convencionais são mais sofisticadas e caras, e devem ser implementadas em situações onde as técnicas convencionais não apresentaram resultados satisfatórios.

As técnicas citadas, anteriormente, serão abordadas com mais clareza nos itens a seguir.

4.2 Técnicas Convencionais

As sobretensões resultantes nas cadeias de isoladores de uma linha de transmissão dependem diretamente de fatores como a intensidade de corrente da descarga, a impedância de surto da linha, a impedância de surto da estrutura e a impedância de aterramento no pé da estrutura. Para minimizar os danos causados ao desempenho da linha ações como a redução da impedância de aterramento do pé de torre e instalação de equipamentos pára-raios para prevenir a ocorrência de arcos elétricos de contornamento sobre a cadeia de isoladores da linha, são extremamente válidas.

4.2.1 Redução da Impedância de Aterramento

Conforme citado no item anterior e nas referências [22] e [23] a redução da impedância de aterramento é uma das práticas utilizadas com o intuito de reduzir a sobretensão resultante no topo da estrutura da linha e evitar o *Backflashover*. Geralmente esta prática é a mais utilizada porque além de resultados efetivamente positivos na redução da sobretensão, é também uma das mais baratas.

Para adoção desta prática é necessário que se conheça bem, qual o valor da impedância de aterramento será capaz de assegurar um bom desempenho da linha de transmissão em análise. Desta forma, pode-se definir qual serão as dimensões e a configuração do sistema de aterramento a ser implantado.

Como a descarga atmosférica é um fenômeno bastante rápido, faz-se necessário conhecer como comportamento do sistema de aterramento de pé de torre de uma estrutura metálica, quando o mesmo é submetido a frentes de correntes impulsivas oriundas das descargas. Geralmente, o sistema de aterramento é composto por três componentes: o pé da estrutura, os condutores metálicos que se conectam ao pé e a terra que envolve os condutores [23].

Na literatura muito comumente a resposta do aterramento frente a corrente de descargas é caracterizada através da chamada Impedância Impulsiva de Aterramento (Z_p). Este parâmetro é obtido através da equação 4.1 e é determinado a partir da relação entre os valores de pico das ondas de tensão e corrente, presentes no aterramento, em relação ao terra remoto.

$$Z_p = \frac{V_p}{I_p} \quad (4.1)$$

A impedância impulsiva vai depender da forma de onda da corrente e dos parâmetros de tempo de frente da mesma.

Para minimizar o valor de impedância impulsiva de aterramento são utilizados os condutores metálicos (geralmente de cobre) chamados de cabos contrapeso. Com o aumento do comprimento destes cabos, o valor da impedância impulsiva tende a diminuir até se estabilizar num determinado valor, onde, mesmo aumentando o comprimento de cabo, o valor da impedância impulsiva se mantém constante. Ao maior comprimento do cabo que corresponde à mínima impedância impulsiva é dado o nome de “comprimento efetivo” do aterramento. Naturalmente que tal comprimento depende do conteúdo de frequência da onda de corrente. Vale ressaltar que aumentando o comprimento do cabo contrapeso a resistência de aterramento (para baixas frequências) irá diminuir.

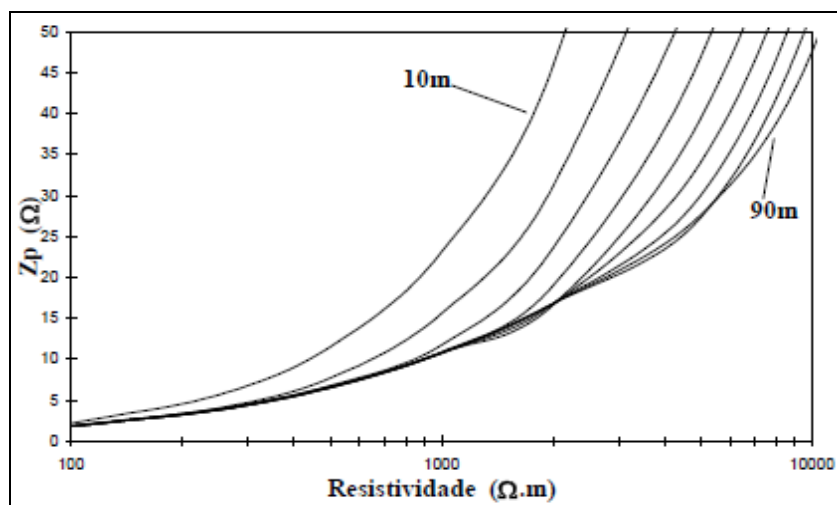


Figura 4.1 – Z_p x resistividade do solo para diversos comprimentos de cabos contrapesos (adaptado de [26])

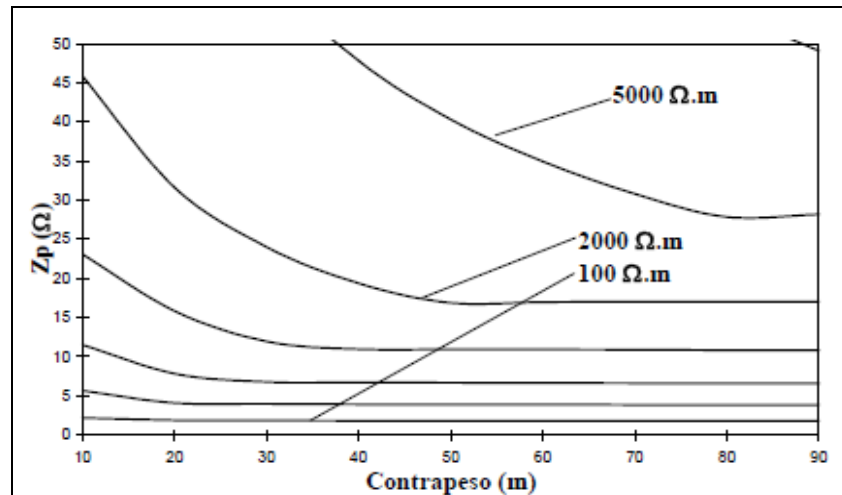


Figura 4.2 – Z_p x comprimento do cabo contrapeso para diversos valores de resistividade (adaptado de [26])

O valor da resistividade do solo também tem grande influência na determinação do valor do comprimento efetivo do cabo contra peso. As figuras 4.1 e 4.2 mostram curvas relacionando a impedância impulsiva com a resistividade do solo e com o comprimento efetivo do cabo contrapeso. A definição do comprimento efetivo do cabo se torna bastante interessante no que diz respeito à otimização do sistema de aterramento e economia de cabos contrapesos.

Para conclusão deste item, há três aspectos importantes que merecem destaque. Primeiramente o fato de que, para aplicações em aterramentos para proteção contra descarga atmosférica, o uso de cabos contrapesos mais compridos que o valor do comprimento efetivo pode ser desperdício. O segundo aspecto faz referência aos cuidados quanto aos critérios muito utilizados por concessionárias de energia que adotam como limite a resistência de aterramento entre 20 e 30 Ω . Vale lembrar que estes valores são obtidos nas medições realizadas em baixas frequências e, o valor reduzido da resistência de aterramento não assegura que a impedância de aterramento também terá seu valor reduzido [23]. Por fim, é importante ressaltar a importância de se definir a geometria dos cabos contrapesos, além de suas disposições no solo, a fim de se obter a menor impedância de aterramento possível, e diminuir a sobretensão resultante nas cadeias de isoladores.

4.2.1.1 Valores recomendados da impedância de aterramento

Em situações onde é possível mensurar a amplitude da onda de corrente característica de uma determinada região nos possibilita determinar qual o valor máximo da impedância de aterramento capaz de assegurar que o NBI da linha de transmissão irá suportar a sobretensão resultante nas cadeias de isoladores devido às descargas. Em [11] cita vários estudos realizados em linhas de transmissão com diferentes valores de tensão de operação. Considerando os valores típicos dos parâmetros das descargas atmosféricas, valores limites para a impedância de aterramento foram sugeridos de acordo com o nível de tensão de operação e o NBI, conforme mostrado na tabela 4.1.

Entretanto, os valores obtidos na prática nem sempre são satisfatórios devido a situações onde a linha está localizada em regiões de difícil acesso (topo de montanha, lugares acidentados) ou quando a resistividade do solo apresenta valores muito elevados. Nestes casos deve-se tentar aproximar o máximo possível o valor da impedância de aterramento daqueles valores recomendados, levando a linha à resultados mais satisfatórios.

Tensão Nominal [NBI] (kV)	69 [450]	138 [850]	230 [1200]	345 [1350]	500 [1750]
Máxima Impedância Impulsiva (Ω)	8	25	35	39	50

Tabela 4.1 - Valores recomendados de impedância para pé de torre (adaptado de [22]).

4.2.2 Utilização de Pára-raios na Linha de Transmissão

Outra técnica bastante convencional é a utilização de dispositivos pára-raios em paralelo com a(s) cadeia(s) de isoladores da linha de transmissão. Estes dispositivos são fabricados em carboneto de silício (SiC) ou óxido de Zinco (ZnO). Porém nas últimas décadas o pára-raios de ZnO vem sendo amplamente utilizado em sistemas de alta tensão devido às suas características elétricas não-lineares e capacidade de absorção de energia superior ao carboneto de silício, tornando-se praticamente o único tipo de dispositivo a ser utilizado. Dentre as melhorias apresentadas podem ser citadas: baixa tensão residual, alta

capacidade de absorção de energia, menor tempo de resposta frente a fenômenos transitórios e alta não-linearidade. As referências [1], [3], [6], [18] e [19] mostram trabalhos realizados onde os pára-raios de ZnO foram utilizados para melhorar o desempenho de linhas de transmissão de alta tensão.

4.2.2.1 Funcionamento do pára-raios de ZnO

Do ponto de vista construtivo os pára-raios de ZnO é composto basicamente de um resistor não linear com a inclusão ou não de gaps dependendo do material utilizado no elemento não linear. Entretanto são desprovidos de centelhadores.

Em operação normal, o equipamento é instalado em paralelo com as cadeias de isoladores, apresentando uma impedância extremamente alta semelhante a um circuito aberto. Neste momento a tensão aplicada em seus terminais é menor que a tensão nominal do dispositivo. No momento que a descarga atmosférica incide na linha, aparece uma onda de sobretensão nas cadeias de isoladores devido a onda de corrente. Quando esta sobretensão for maior que a tensão de disparo do pára-raios, o valor de sua impedância sofre uma grande redução e a onda de corrente impulsiva é drenada. Neste caso, os pára-raios mantêm um valor de sobretensão resultante nas cadeias de isoladores, como mostra a figura 4.3, que ilustra a onda de tensão na ausência ou presença do dispositivo. Após o término da solicitação da onda de sobretensão a impedância do dispositivo volta a ser alta.

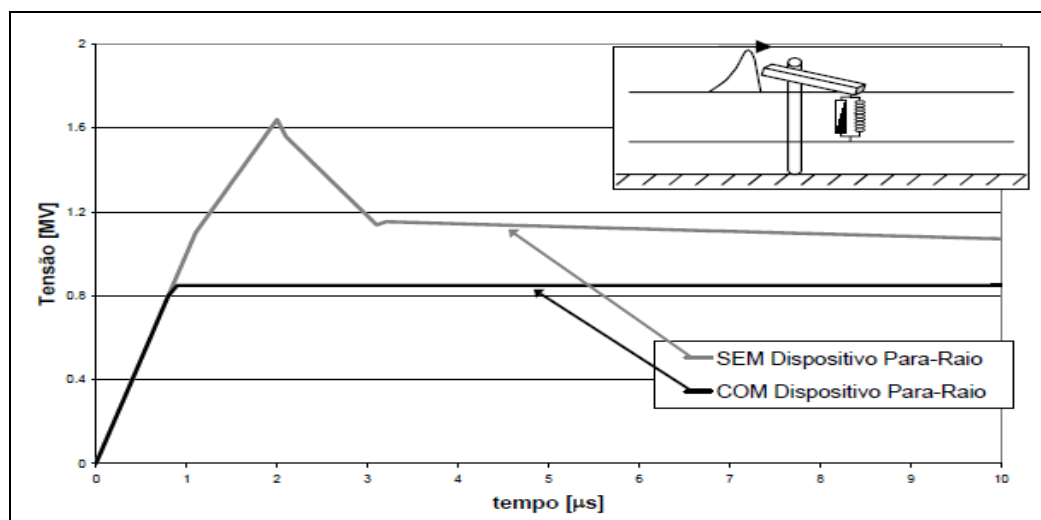


Figura 4.3 – Curvas de sobretensão com e sem a utilização do pára-raios (Adaptado de [11]).

Para selecionar um pára-raios, deve ser levado em consideração sua tensão nominal de operação, as sobretensões de longa duração, sendo a tensão normal de operação, geralmente, a solicitação que prevalece na determinação da tensão nominal do pára-raios.

4.2.2.2 Resultados obtidos a partir da utilização de pára-raios de ZnO

Com o objetivo de avaliar os resultados apresentados com utilização do dispositivo de pára-raios em linhas de transmissão de alta tensão serão apresentados dois estudos realizados por [1] e [3].

. Linha Itutinga – Três Corações 2 – 138kV

A referência [1] mostra o estudo desta linha de transmissão que apresenta extensão de 87,1km, 192 torres e é constituída por cabos de blindagem. A linha está inserida numa região que apresenta alta densidade de descargas, aproximadamente 10 descargas/km²/ano, com 16,2 desligamentos/100km/ano. Antes da realização dos estudos foram medidas as resistividades do solo nos pontos onde seriam instaladas as torres.

Para análise da sobretensão nas cadeias de isoladores foi utilizado o programa EMTP a fim de simular o impacto de uma descarga incidindo diretamente na estrutura sem a utilização dos pára-raios. Os resultados das simulações estão apresentados na tabela 4.2. As correntes de descarga injetadas foram de 41kA e 100kA (50% e 4% de probabilidade de ocorrência na região, respectivamente) com Tf de 3/65µs. Observa-se que o isolamento suporta sobretensões para impedância impulsiva de aterramento de até 20Ω. Como esperado, os resultados apresentados quando a onda de corrente é de 100kA são mais agravantes para manter o bom desempenho da linha.

A partir das simulações sem o pára-raios, novos estudos foram realizados considerando a instalação dos dispositivos (um, dois ou três pára-raios por estrutura) para os mesmos valores de corrente e com Tf de 2,6/62µs. Os resultados são mostrados na tabela 4.3.

Zp (Ω)	ΔV (kV) para corrente de 41kA	ΔV (kV) para corrente de 100kA	V50% da cadeia (kV)
5	282	620	685
10	372	908	
15	512	1261	
20	645	1573	
30	916	2208	
50	1387	3404	

Tabela 4.2 – Simulação do impacto de uma descarga diretamente na estrutura (adaptado de [1]).

Nº de ZnO por torre	I (kA)	Zp (Ω)	ΔV (kV)	Nº de ZnO por torre	I (kA)	Zp (Ω)	ΔV (kV)
1	40	5	278	1	100	5	600
		10	370			10	820
		20	541			20	1229
		30	691			30	1596
		50	951			50	2233
2	40	5	270	2	100	5	540
		10	350			10	717
		20	488			20	1042
		30	605			30	1327
		50	803			50	1808
3	40	5	-	3	100	5	-
		10	-			10	-
		20	-			20	-
		30	-			30	-
		50	-			50	-

Tabela 4.3 – Aplicação de Pára-raios de ZnO (Adaptado de [1])

Considerando que o valor suportável pelo isolamento das cadeias, em caso da ausência do pára-raios, é de 685kV, nota-se que na maioria dos casos onde a impulso de corrente foi de 40kA o isolamento será suficiente. Porém quando se aplica 100kA, dependendo da quantidade de equipamentos instalados e o valor da resistência, o isolamento não suportará a sobretensão.

. *LT Ouro Preto / Mariana – 138kV*

É uma linha composta de circuito simples, construída com estruturas metálicas e com um cabo de blindagem, conforme mostrado em [3]. Foram instalados 03 cabos pára-raios em todas as 108 estruturas de sua extensão (324 unidades). Os resultados são apresentados na tabela 4.4.

. *LT Ouro Preto / Ponte Nova – 138kV*

Esta linha também é citada em [3], possui circuito simples e é composta por torres metálicas e um cabo de blindagem, que apesar de possuir baixas resistências de aterramento possui um desempenho não satisfatório tendo em vista a alta incidência de descargas atmosféricas na região atravessada. Estudos realizados mostraram que 2 pára-raios por estrutura nas fases inferiores seriam suficientes para reduzir o número anual de desligamentos. Foram instalados 264 pára-raios. Os resultados obtidos também são apresentados na tabela 4.4.

. *LT Itutinga / Minduri – 138kV [3]*

É uma das três linhas de transmissão apresentadas em [3], também de circuito simples, com estruturas metálicas e um cabo pára-raios, situado numa região que apresenta altos valores de densidade de descargas atmosféricas. Nessa LT foram instalados 132 pára-raios (1 ou 2 pára-raios por torre dependendo das condições orográficas do terreno e da densidade de descarga negativa no local). A tabela 4.4 apresenta o resumo dos resultados obtidos.

LT	Desligamento / 100km /ano	
	Sem os pára-raios	Com os pára-raios
Ouro Preto / Mariana	40	0
Ouro Preto / Ponte Nova	20	4,5
Itutinga / Minduri	19	4,3

Tabela 4.4 – Resultados da Aplicação de Pára-raios de ZnO em LT's 138 kV (Adaptado de [3])

Os resultados apresentados mostram que a utilização do dispositivo de pára-raios em paralelo com as cadeias de isoladores é bastante eficiente, garantindo que a linha de transmissão não sofra interrupções e garanta assim, o fornecimento de energia de qualidade.

Apesar da eficiência desta técnica, o alto custo para instalação e manutenção destes dispositivos, principalmente em linhas de transmissão de alta tensão, inviabiliza a instalação. Diante disso, a alternativa é selecionar os pontos mais críticos de desligamento.

4.2.3 Acréscimo de Isoladores na Cadeia

Outra prática usual consiste no acréscimo de discos nas cadeias de isoladores. Com este procedimento, a idéia é aumentar a suportabilidade do isolamento com o aumento da distância entre os condutores fase e a estrutura aterrada. Entretanto, em função das geometrias da linha e das torres, esta extensão tem limites. Outro problema apresentado com esta prática é o aumento do balanço dos condutores da linha sob ação de ventos e tempestades. Neste caso pode haver a aproximação entre os condutores energizados e a estrutura aterrada, provocando um possível desligamento da linha.

4.3 Técnicas Não-Convencionais

Geralmente, a redução de impedância de pé de torre e a instalação de dispositivos pára-raios são as primeiras técnicas utilizadas pelas concessionárias de energia elétrica para prevenir a linha de transmissão. Isso se deve ao fato de tais práticas serem bastante eficientes, apesar dos custos elevados quando se instala o dispositivo pára-raios.

As práticas não-convencionais exploram os efeitos dos parâmetros que influenciam na amplitude de sobretensão resultante desenvolvida nas cadeias de isoladores devido à incidência das descargas atmosféricas. Tais parâmetros consistem na impedância de surto e altura da torre e no acoplamento

eletromagnético entre os condutores energizados e parte metálicas da linha (cabos de blindagem e a estrutura) [25].

4.3.1 *Resultados Obtidos com Técnicas Não-Convencionais*

A literatura técnica refere-se à algumas práticas não-convencionais sugerindo: (i) instalação de cabos metálicos entre as estruturas, posicionados abaixo dos condutores fase, (ii) cabos contrapesos contínuos e (iii) cabos estais. Além destas práticas, outra técnica não-convencional é apresentada em [28]. Trata-se da utilização dos dados obtidos através do Sistema de Detecção e Localização de Descargas Atmosféricas (SLT's) da CEMIG, ao longo da linha de transmissão. Os trabalhos apresentados, a seguir, foram desenvolvidos em duas linhas de transmissão com tensão nominal de operação de 230kV e estão abordados de forma mais detalhada em [8] e [25].

. LT Guilman Amorim – Ipatinga 1

Esta linha de transmissão tem uma extensão de 50,25km com 92 estruturas metálicas, percorrendo uma região de alta resistividade do solo e alto índice de incidência de descargas atmosféricas [8]. Na época, a linha apresentava um índice de desligamento de 7,96/100 km/ano, acima dos índices citados na tabela 3.1.

Inicialmente foi analisada a incidência das descargas atmosféricas na região onde se localiza a linha, a partir dos dados obtidos em [28]. Com estas informações foi possível determinar quais as estruturas que estavam em regiões mais críticas e, conseqüentemente, requeriam maior atenção. Além disso, foi verificado se houve desligamento nos trechos onde se localizam estas estruturas.

Somente a partir das referidas análises e verificações ao longo da linha, as práticas ditas convencionais como: reconstituição de aterramento, o tratamento químico e a instalação de pára-raios de ZnO foram aplicadas. Primeiramente foram calculados os comprimentos corretos para os cabos contrapesos das estruturas críticas e aquelas que o comprimento não estava adequado,

garantindo a integridade do sistema de aterramento. Além dos cabos contrapesos com o correto comprimento efetivo, foi instalado um anel equalizador na base da estrutura, interligando os pontos de injeção de corrente. Em algumas torres houve redução de até 50% da impedância de aterramento. Após a reconstituição do aterramento, em algumas estruturas foi realizado o tratamento químico que consiste na aplicação de um material de alta condutividade nos primeiros 10 metros de cada cabo contrapeso lançado na base da estrutura com o intuito de “aumentar” a seção do cabo contrapeso. Em alguns casos, onde a resistividade do solo é muito alta, houve redução de até 50% do valor da resistência de aterramento. Para concluir as ações para melhoria do desempenho da linha foram instalados dispositivos pára-raios de ZnO nas três fases das estruturas extremamente críticas (03 estruturas). Após a instalação dos dispositivos não foram localizados nenhum desligamento.

Os resultados mostram que houve uma redução de 75% dos desligamentos/100 km/ano da referida linha, conforme mostrado na figura 4.4, passando de quase 8 para 2 interrupções. Vale ressaltar que o mais importante no melhoramento localizado de uma linha e analisar com detalhes toda a extensão da linha e identificar os trechos mais críticos.

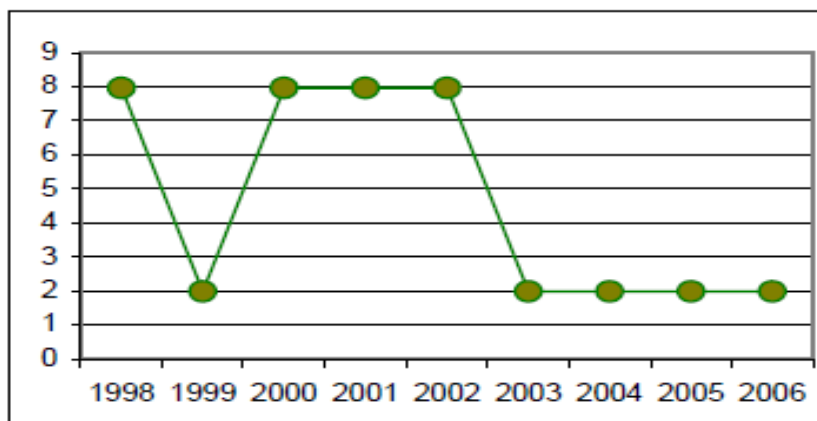


Figura 4.4 – Índice de desligamentos por ano na referida LT (Adaptado de [8]).

. LT 230 kV

Esta linha tem aproximadamente 400 km de extensão e 900 estruturas, com vãos médios da 500m, conforme descrito em [25]. Sua rota também percorre

uma região de alta resistividade do solo e alto índice de incidência de descargas atmosféricas. A linha apresentava um índice de desligamento de 7,0/100 km/ano.

Com as indicações de um equipamento de localizar de faltas e a análise dos valores medidos de resistência de aterramento foram identificadas quais as estruturas que, aparentemente, eram responsáveis pela maioria dos desligamentos devido às descargas. Todas essas estruturas estavam posicionadas no topo de colinas que apresentam alto valor de resistividade no solo.

Para avaliar a eficiência das práticas a serem utilizadas, algumas melhorias foram simuladas e as sobretensões resultantes foram quantificadas, a partir de uma onda de corrente de 50kA, 2 x 70 μ s, com a impedância impulsiva de pé de torre variando entre 100 e 500 Ω e impedância impulsiva da torre de 100 Ω . As seguintes condições foram simuladas:

- (i) configuração original, com a utilização de cabos contrapesos;
- (ii) utilização de dois condutores aterrados, instalados abaixo dos condutores energizados, mantendo-se uma distância de segurança;
- (iii) instalação de quatro cabos estais, conectados aos cabos de ancoragem e estendidos sobre o solo;
- (iv) cabos estais associados a condutores muito longos colocados diretamente sobre a superfície do solo.

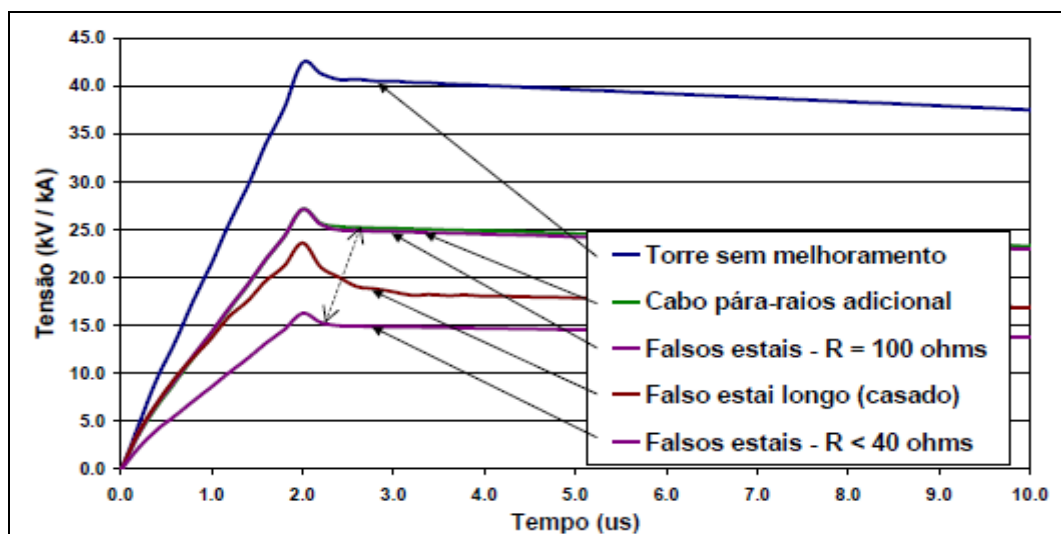


Figura 4.5 – Sobretensão desenvolvida nas cadeias de isoladores (Adaptado de [25]).

Os valores obtidos nas simulações são apresentados na figura 4.5. A utilização das técnicas apresentou, respectivamente, reduções de 39% e 61% na amplitude da sobretensão quando se utilizou os cabos aterrados sob as fases e quando se foram instalados os estais combinados com os eletrodos horizontais enterrados na terminação. A partir destas simulações foram definidos os procedimentos a serem realizados nas estruturas problemáticas.

Os resultados mostraram que os desligamentos devido às descargas atmosféricas nos dois anos após a implementação das práticas foram reduzidos a zero.

5. MODELAGEM DE LINHAS DE TRANSMISSÃO E ESTUDO DE CASO

5.1 Introdução

Vários aspectos devem ser considerados no desenvolvimento da modelagem de uma linha de transmissão a fim de computar os transitórios eletromagnéticos causados pela incidência da descarga atmosférica. A partir de ferramentas computacionais, é possível modelar todos os componentes envolvidos no percurso da onda impulsiva de descarga como cabos aéreos (condutores fase e cabos de blindagem), as estruturas metálicas e o aterramento no pé da torre da linha. A figura 5.1 ilustra esses componentes. Vale ressaltar que os componentes da linha estão presentes em meios com características eletromagnéticas diferentes que são o solo e o ar.

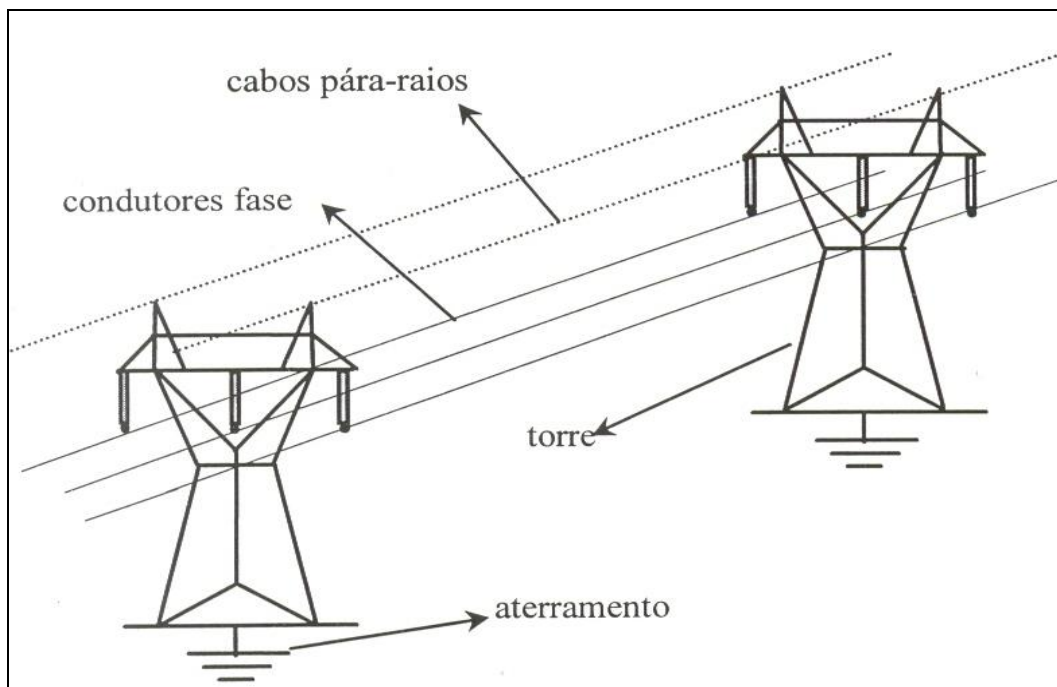


Figura 5.1 – Ilustração dos componentes da linha envolvidos no percurso da corrente de descarga (adaptado de [12]).

Partindo de tal modelagem, o fenômeno de incidência em qualquer ponto da linha pode ser simulado e as sobretensões resultantes podem ser calculadas. Neste trabalho as modelagens são realizadas através do programa de simulação de transitórios eletromagnéticos “Alternative Transients Program – ATP”. Esta ferramenta computacional realiza seus cálculos no domínio do tempo.

Ainda neste capítulo são apresentados os resultados da simulação da incidência de descargas atmosféricas negativas ao longo da extensão de uma linha de transmissão real de 138kV, localizada no estado de Tocantins. As modelagens dos parâmetros da linha e das correntes de retorno da descarga, assim como o estudo de caso são discutidas nos próximos itens. Com os resultados das sobretensões apresentadas, foram calculados os valores críticos de corrente para que não ocorra a ruptura do isolamento da linha de transmissão e, conseqüentemente, não cause seu desligamento.

5.2 Modelagem da Linha de Transmissão

As linhas de transmissão podem apresentar diversas configurações diferentes dependendo do tipo de torre, cabos aéreos e a resistência de pé-de-torre. Diante disso, estas configurações podem criar diferentes respostas do sistema quando é submetido a uma descarga atmosférica.

Neste trabalho foi realizada a simulação e análise do desempenho de uma linha de transmissão 138kV frente a descargas atmosféricas. A linha é composta por estruturas metálicas autoportantes, conforme mostrado na figura 5.2.

Durante a construção da linha de transmissão o percentual da carga de ruptura horizontal máximo admitido nos condutores fase foi de 20%. Já para os cabos de blindagem este percentual ficou em torno de 10%. As variações do último percentual são válidas para garantir que as flechas dos cabos de blindagem sejam aproximadamente 85% das flechas dos condutores fase. Na tabela 5.1 (a) e (b) são apresentados os dados mecânicos e elétricos destes cabos aéreos. Os valores das flechas dos cabos de blindagem e condutores fase, utilizados nas simulações, foram calculados considerando-se a temperatura de 35°C e 50°C, respectivamente.



Figura 5.2 – Estrutura típica da linha de transmissão estudada.

Nome do Cabo/ Tipo	Linnet / CAA*			
	0-150	151-300	301-450	451-600
Comprimento do vão (m)				
Quantidade de vãos	2	4	8	3
Seção do cabo (mm ²)	198,38			
Diâmetro interno (mm)	6,75			
Diâmetro externo (mm)	18,31			
Carga de ruptura (kgf)	6390			
Resistência em CC** (Ω)	0,1671			
Carga de ruptura aplicada (%)	20%			

(a)

* CAA – Cabo de Alumínio com Alma de Aço

** CC – Corrente Contínua

Nome do Cabo	Cabo de Aço – EHS 5/16			
Comprimento do vão (m)	0-150	151-300	301-450	451-600
Quantidade de vãos	2	4	8	3
Seção do cabo (mm ²)	35,8			
Diâmetro externo (mm)	7,94			
Carga de ruptura (kgf)	5081			
Resistência em CC** (Ω)	4,76			
Carga de ruptura aplicada (%)	10%			

(b)

Tabela 5.1 – Dados elétricos e mecânicos dos cabos aéreos utilizados na linha de transmissão. (a) condutores fase e (b) cabo de blindagem.

Os comprimentos dos vãos foram calculados de forma mais conveniente, respeitando-se a distância mínima entre os condutores fase e o solo. As alturas das estruturas metálicas da linha variam entre 37,6 e 39,0 metros. Por conveniência foi adotado um valor de 38,0 metros nas simulações.

O programa utilizado para as simulações (ATP) apresenta alguns modelos que podem representar uma linha de transmissão. Entretanto, como se trata da incidência de descarga na linha de transmissão e a descarga é um fenômeno que envolve componentes de alta frequência, faz-se necessário utilizar um modelo que contempla a representação neste domínio. Foi utilizada a modelagem desenvolvida por J. Marti para simular os condutores fase e os cabos de blindagem de cada vão da linha. Todos os parâmetros elétricos são calculados considerando-se uma faixa de frequência definida na simulação.

Como já informado, a simulação ocorre no domínio do tempo e, após transformação para o domínio da frequência, o modelo supõe a síntese da função de propagação por meio de funções racionais e, desta forma, a impedância característica da linha é modelada como uma rede de conjunto de componentes RC série. Vale ressaltar que esta modelagem não é recomendada para simulações onde as linhas de transmissão são assimétricas ou polifásicas.

Neste trabalho foi adotada a frequência de 200kHz para primeiras descargas e 1MHz para as descargas subseqüentes, o que corresponde aos limites

superiores das componentes de frequência das ondas típicas destas descargas [10]. A faixa de frequências utilizada no cálculo dos parâmetros da linha foi de 10Hz a 200kHz. Além disso, durante a simulação foi considerado o efeito pelicular e a resistividade do solo, assumindo um valor igual a 1000 Ω .m.

As torres da linha de transmissão foram consideradas como linhas de transmissão verticais sem perdas, cuja modelagem foi elaborada de parâmetros distribuídos constantes com a frequência, uma vez que a torre pode ser tratada como um elemento de extensão reduzida. O valor utilizado para representar a impedância de surto de cada torre foi de 200 Ω , obtido a partir da formulação proposta em [13]. A velocidade de propagação da onda de corrente ao longo da torre foi considerada como sendo 85% da velocidade da luz [13].

A partir das medições de resistência de pé-de-torre, realizadas em campo utilizando o método desenvolvido por Frank Wenner [20], verificou-se a necessidade de aplicação de técnicas para redução do valor da resistência de pé de torre. As resistências medidas, considerando um espaçamento de 8m entre as hastes de medição variaram entre 20 e 2640 Ω . Foi adotada uma configuração composta por 4 fios contrapesos de 4 BWG instalados a 0,4m de profundidade, sendo 2 fios em cada lado da estrutura, dispostos paralelamente sob a faixa de servidão da linha (18m) e com comprimentos diferentes a fim de se obter um valor médio desejável de 20 Ω para a resistência de aterramento.

Em alternativa ao uso do ATP para simular sobretensão em LT's devida a incidência de descargas atmosféricas, a literatura técnica apresenta outros modelos utilizados para calcular as sobretensões resultantes nas cadeias de isoladores das estruturas metálicas [11], [12] e [14].

5.3 Modelagem das Ondas de Corrente

Além da modelagem mais apropriada para ser utilizada durante as simulações é fundamental modelar as formas de onda da corrente de retorno (primeiras descargas e subseqüentes) para reproduzir de forma mais precisa, os valores máximos e as formas de onda das sobretensões resultados nas cadeias de isoladores devido às descargas atmosféricas. Formas de onda que não

representem bem o fenômeno, podem levar a resultados incorretos e sem qualquer validade [14]. Os parâmetros de tempo de frente e a amplitude da onda de corrente são os mais relevantes.

Conforme tratado no item 2.4.3, o tempo de frente da onda pode ser caracterizado através dos parâmetros T10 e T30 que são, respectivamente, os tempos necessários para a amplitude da onda de corrente crescer de 10 a 90% e 30 a 90% do valor do primeiro pico.

Em função da facilidade de geração e variação dos parâmetros da onda de corrente através de circuitos bem simples (capacitores e resistência), a literatura tradicional sugere que as ondas de corrente de retorno sejam representadas pela dupla exponencial. Tal representação constitui-se de duas formas de onda exponenciais de sinais contrários, porém com constantes de tempos diferentes. Entretanto, as ondas geradas não representam de forma adequada, a natureza côncava das curvas reais de correntes de descarga. Também, a derivada máxima da corrente ocorre no início da onda, enquanto que nas ondas reais a derivada máxima é próxima ao pico. Tal divergência pode comprometer a qualidade dos resultados da sobretensão calculada no topo da torre, levando a resultados diferentes daqueles gerados por ondas reais de corrente [10].

Desta forma, a modelagem para as simulações das correntes de retorno foi baseada na função analítica desenvolvida por Heidler, apresentada em [4], [10] e [21], onde é possível controlar a amplitude, o tempo de frente e de decaimento da onda de corrente e, assim, representar de forma mais adequada, as curvas de corrente média ou mediana, obtidas a partir de medições realizadas em torres instrumentadas. A função de Heidler é apresentada na equação 5.1, a seguir.

$$Zp = \frac{I_0}{\eta} \frac{(t/\tau_1)^n}{1+(t/\tau_1)^n} \exp(-t/\tau_2) \quad (5.1)$$

Onde:

I_0 : é a amplitude da corrente na base do canal;

τ_1 : tempo relacionado a frente de onda da corrente;

τ_2 : tempo relacionado ao decaimento da onda de corrente;

η : fator de correção da amplitude;

n : expoente de ajuste.

Neste caso, as correntes de descarga são representadas como o somatório do número de funções de Heidler utilizadas, a fim de representar as ondas de corrente das primeiras descargas e das subseqüentes utilizadas na simulação. As primeiras descargas foram representadas pela soma de sete funções de Heidler, enquanto que as subseqüentes foram representadas pela soma de apenas duas funções [4].

Neste trabalho, de modo a se obter formas de onda de corrente de retorno das primeiras descargas e subseqüentes, os parâmetros de cada função de Heidler foram obtidos a partir da referência [10], onde tais funções foram adaptadas para se obter a forma de onda com amplitude de 1kA, com os mesmos parâmetros de tempo das descargas negativas descendentes medidas nas torres instrumentadas da estação do Morro San Salvatore. As tabelas 5.2 e 5.3 mostram os parâmetros utilizados nas funções de Heidler para sintetizar as formas de onda das correntes simuladas. Já as figuras 5.3 e 5.4 mostram as formas de onda obtidas para as primeiras descargas e descargas subseqüentes.

k	I_0 (A)	n	τ_1 (μ s)	τ_2 (μ s)
1	96,77	2	3	76
2	145,16	3	3,5	25
3	96,77	5	5,2	20
4	122,58	7	6	60
5	438,71	44	6,6	60
6	354,84	2	100	600
7	183,87	15	11,7	48,5

Tabela 5.2 – Parâmetros considerados para obtenção da curva de corrente da primeira descarga com pico duplo (adaptado de [10]).

k	I_0 (A)	n	τ_1 (μ s)	τ_2 (μ s)
1	670,67	2	0,7	15
2	350,67	3	1	20

Tabela 5.3 – Parâmetros considerados para obtenção da curva de corrente da descarga subseqüente (adaptado de [10]).

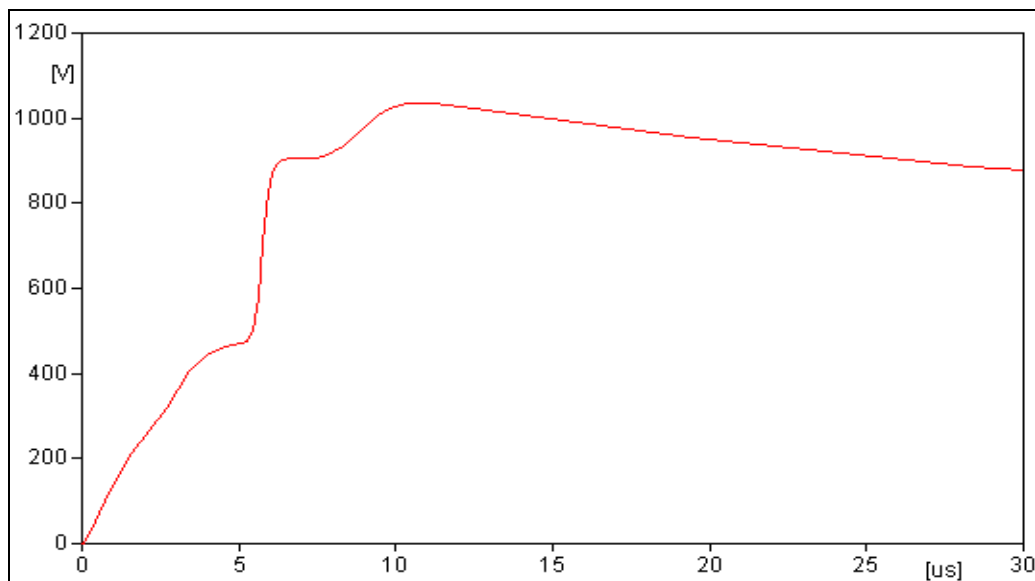


Figura 5.3 – Forma de onda da primeira descarga com pico duplo usada na simulação com ATP.

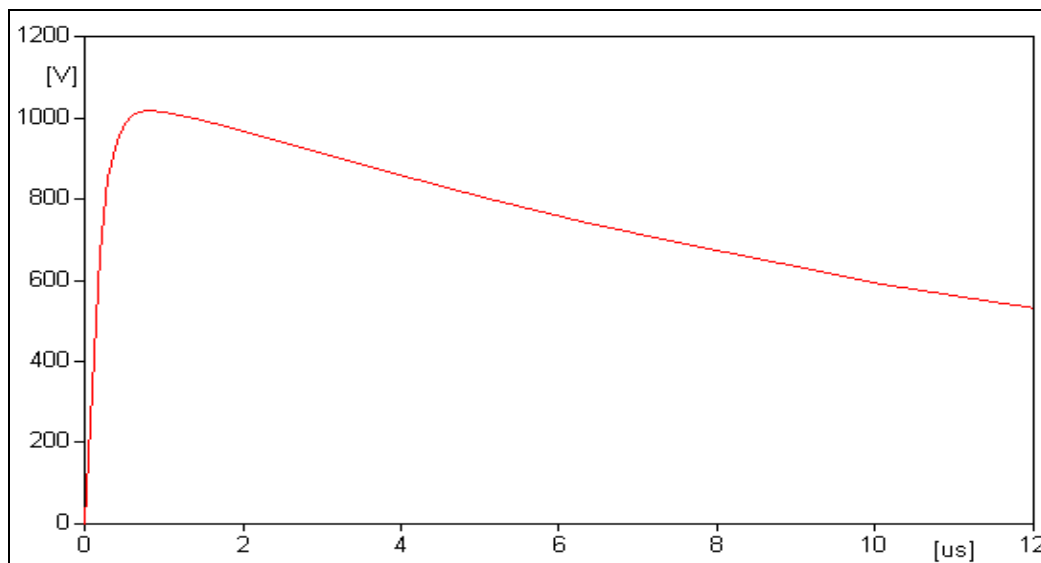


Figura 5.4 – Forma de onda da descarga subsequente usada na simulação com o ATP.

Apesar da amplitude da onda de corrente das descargas subsequentes serem bem inferiores às primeiras descargas (cerca de 40%), é importante que as mesmas sejam consideradas, tendo em vista que a frente de onda destas descargas é bastante rápida e que a linha de transmissão estudada apresenta vão grande (superiores a 500m), podendo gerar sobretensões importantes na extensão da linha.

5.4 Estudo de Caso

5.4.1 Introdução

Conforme já mencionado anteriormente, neste trabalho foi simulada a incidência de descargas atmosféricas (primeiras e subseqüentes) em uma linha de transmissão 138kV, localizada no município de Dianópolis/TO para conectar duas Pequenas Centrais Hidroelétricas – PCH's a uma linha já existente, gerenciada pela Concessionária de Energia Elétrica do Estado de Tocantins - CELTINS. O bloco de energia a ser transmitido a partir das PCH's é de aproximadamente 28MW. Além da preocupação com o fornecimento de energia, a motivação para tal estudo é justificada pelos altos índices estimados de densidade atmosférica para a região onde se encontra a linha de transmissão (4 a 12 descargas / km / ano), conforme apresentado em [21].

A linha é composta por 17 torres metálicas autoportantes (todas com a mesma configuração), apresentando circuito simples, distribuídas numa extensão de aproximadamente 6km. Os condutores fase estão dispostos num arranjo triangular e, acima dos mesmos, temos a presença do cabo de blindagem.

As simulações foram realizadas a partir das modelagens dos parâmetros da linha (cabos aéreos, estruturas metálicas e aterramento de pé-de-torre) e das formas de onda da corrente de retorno, apresentadas no item 5.2 e 5.3. Os cabos aéreos foram representados a partir do modelo de J.Marti. Já as estruturas metálicas foram consideradas como linhas verticais sem perdas e com o valor de impedância de surto constante, já que a torre é um elemento de pequena extensão. Quanto à impedância de aterramento, foi considerada uma resistência concentrada no pé de cada estrutura, com o valor igual a 0,7 x resistência de aterramento [26]. Os valores das resistências de aterramento foram obtidos através de medições realizadas em campo, após a montagem das referidas linhas e da instalação do cabo contrapeso em cada pé da estrutura, conforme mostrado na figura 5.5. Na tabela 5.4 são apresentados todos os valores dos parâmetros utilizados para montagem do circuito equivalente da linha que foi simulada.

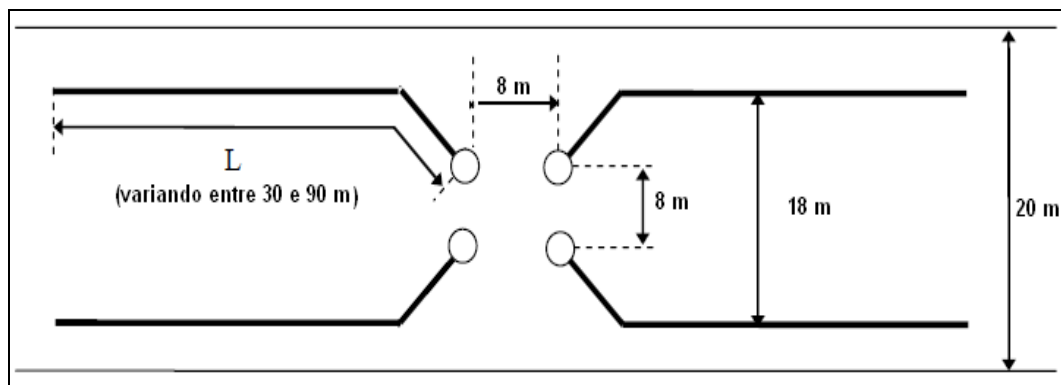


Figura 5.5 – Configuração do aterramento no pé da estrutura metálica, vista em planta.

Nº da Estrutura ou Vão	Altura (m)	Impedância de surto (Ω)	Resistência de aterramento (Ω)	Comprimento do Vão Avante (m)	Impedância de aterramento (Ω)
1	39,0	200,00	16,3	314,4	11,41
2	38,07		21,8	403,0	15,26
3	38,07		46,2	283,0	32,34
4	38,07		50,2	400,0	35,14
5	38,07		63,4	600,0	44,38
6	38,07		72,0	398,0	50,4
7	37,8		21,6	347,0	15,12
8	38,07		33,2	572,6	23,24
9	37,6		17,5	376,7	12,25
10	37,6		12,3	313,7	8,61
11	37,8		15,5	145,7	10,65
12	37,8		42,6	254,9	29,82
13	37,6		14,8	280,1	10,36
14	38,07		27,9	452,7	19,53
15	38,07		26,8	308,4	18,76
16	38,07		61,3	241,2	42,91
17	37,8		34,8	133,6	24,36

Tabela 5.4 – Parâmetros elétricos e físicos das torres para montagem equivalente da LT estudada.

As ondas de corrente de retorno, foram modeladas a partir da função analítica de Heidler e foram injetadas no topo de cada estrutura metálica da linha e as sobretensões resultantes neste ponto, puderam ser medidas. As figuras 5.6

e 5.7 ilustram a configuração da linha com a incidência de uma primeira descarga e com a incidência de uma descarga subsequente, respectivamente.

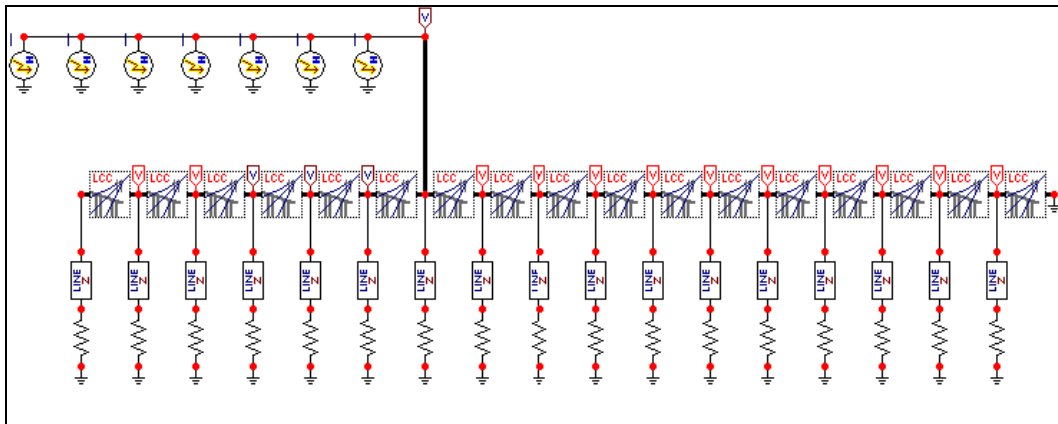


Figura 5.6 – Representação da incidência de uma primeira descarga na LT estudada.

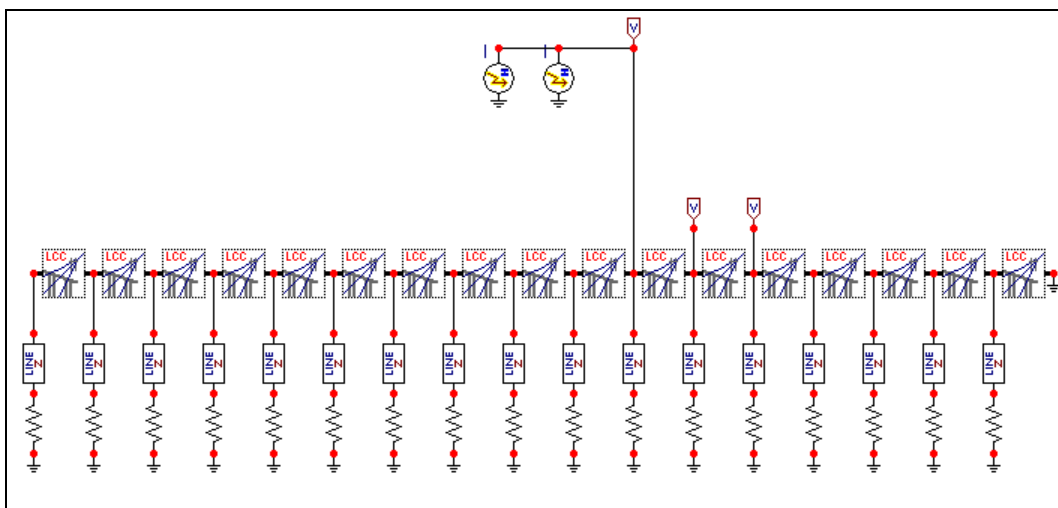


Figura 5.7 – Representação da incidência de uma descarga subsequente na LT estudada.

Apesar da linha de transmissão estudada não ser muito extensa, verificou-se que a linha apresenta três vãos com comprimentos superiores a 450 metros, como mostrado na tabela 5.4. A fim de verificar a possibilidade de desligamento da linha por ruptura de meio de vão, foram realizadas simulações considerando a incidência das descargas no meio destes vãos. Para que isso fosse possível, a representação destes trechos foi feita por um conjunto de elementos de 50 metros cada um, de modo a permitir a medição da tensão entre os cabos de blindagem e o condutor fase mais próximo ao longo do vão, além da possibilitar a variação do ponto de incidência da descarga.

5.4.2 Cálculo da Corrente de Retorno Crítica

Após a obtenção das sobretensões resultantes máximas (kV/kA) no topo de cada estrutura e no meio de alguns vãos, a partir da injeção de ondas de corrente de 1kA, foi possível calcular o valor mínimo da amplitude de corrente capaz de causar um desligamento da linha. De acordo com a tabela 3.1, o nível básico de isolamento para uma linha de 138kV é de 850kV, ou seja, para sobretensões superiores a este valor podem ocorrer ruptura do isolamento da linha e, conseqüentemente, a interrupção do fornecimento de energia elétrica. Os valores críticos da corrente de descarga foram calculados a partir da equação 5.2, mostrada a seguir:

$$I_c = \frac{V_m}{V_s} \quad (5.2)$$

onde:

- . I_c = é a corrente crítica que pode levar ao desligamento. V_s = sobretensão obtida a partir das simulações
- . V_m = sobretensão máxima suportável pela linha (NBI)

Para o caso das correntes críticas para os três meios de vãos considerados, pode-se calcular um valor médio da corrente crítica, tanto para primeiras descargas ou subseqüentes, através da equação 5.3.

$$I_{cm} = \frac{I_i + I_f}{2} \quad (5.3)$$

onde:

- . I_{cm} = é a corrente crítica média
- . I_i = corrente crítica início do vão
- . I_f = corrente crítica no fim do vão

Para análise dos valores da corrente crítica, encontrados a partir das equações 5.2 e 5.3, foram considerados como referência os valores 30 e 12kA de pico de corrente para as primeiras descargas e descargas subseqüentes, conseqüentemente.

5.5 Resultados das Simulações

5.5.1 Introdução

Neste item são discutidos os resultados das simulações e cálculos obtidos neste trabalho. Inicialmente foram analisadas algumas formas de onda de sobretensões resultantes a partir da injeção da onda de corrente de descarga em cada estrutura e nos três vãos maiores da linha. Em seguida, são apresentados os valores calculados das correntes críticas para cada situação em que houve a injeção de corrente. Finalmente, com os valores das correntes críticas determinadas, foi possível estimar os pontos onde é possível que ocorra a interrupção da linha.

5.5.2 Forma de Onda das Sobretensões Resultantes

Durante a simulação foi verificado que as estruturas adjacentes têm influência na redução do valor da sobretensão resultante no topo da estrutura atingida pela descarga, embora esta influência seja reduzida, conforme mostrado também em [14] e [19]. Desta forma, apesar da linha ser composta por 17 estruturas, somente foram analisadas as sobretensões apresentadas nas primeiras torres adjacentes, sendo uma de cada lado da estrutura vítima.

As figuras 5.8 a 5.13 mostram algumas sobretensões resultantes de injeções de corrente nas estruturas onde as resistências de pé-de-torre apresentavam valores mais elevados (estruturas 5, 6 e 16). Já nas figuras 5.14 a 5.19 são apresentadas as sobretensões nos três vãos mais extensos da linha (vãos 5, 8 e 14). Em ambos os casos, as formas de onda injetadas de primeira descarga e descarga subsequente foram aquelas apresentadas nas figuras 5.3 e 5.4. Para se encontrar o valor real das sobretensões resultantes no topo de cada torre, basta multiplicar pelo valor real da corrente de descarga, uma vez que as ondas de corrente foram configuradas com uma amplitude de 1kA.

No caso das sobretensões no meio dos vãos, a simulação foi realizada apenas até a metade do vão, considerando a simetria do vão e que as descargas atingem o vão de forma distribuída.

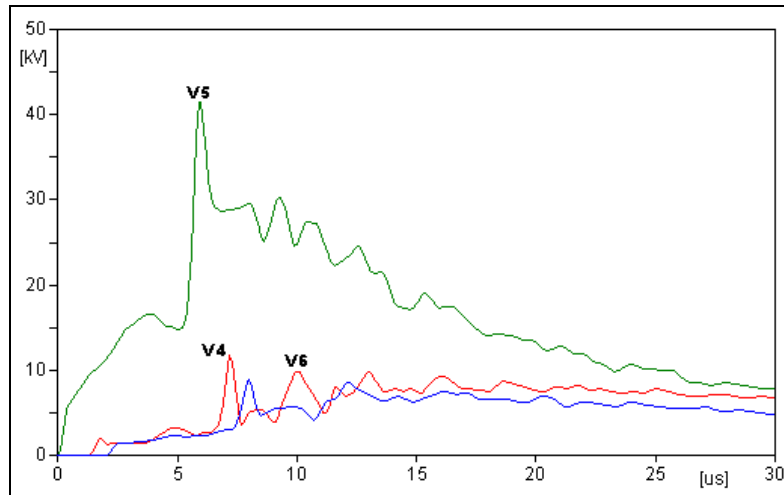


Figura 5.8 – Sobretensões resultantes com a injeção de corrente no topo da estrutura 5. Primeira Descarga.

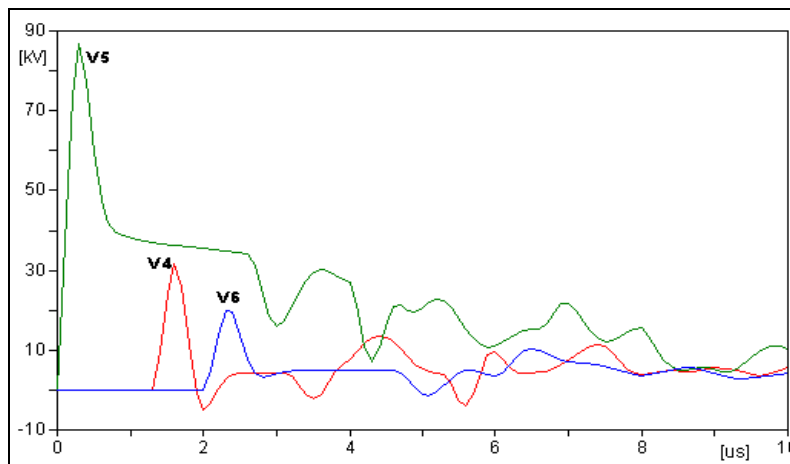


Figura 5.9 – Sobretensões resultantes com a injeção de corrente no topo da estrutura 5. Descarga Subseqüente.

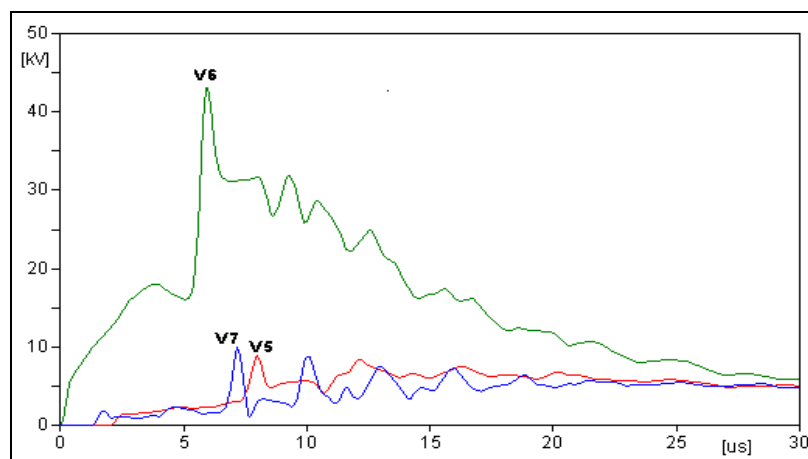


Figura 5.10 – Sobretensões resultantes com a injeção de corrente no topo da estrutura 6. Primeira Descarga.

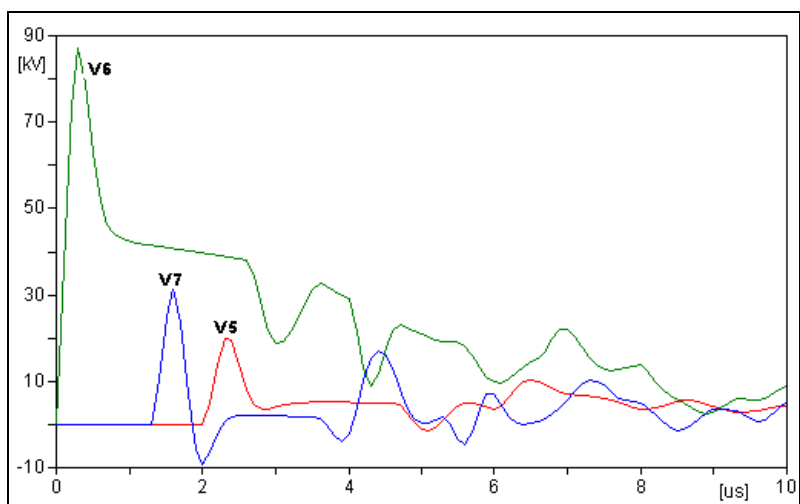


Figura 5.11 – Sobretensões resultantes com a injeção de corrente no topo da estrutura 6. Descarga Subseqüente.

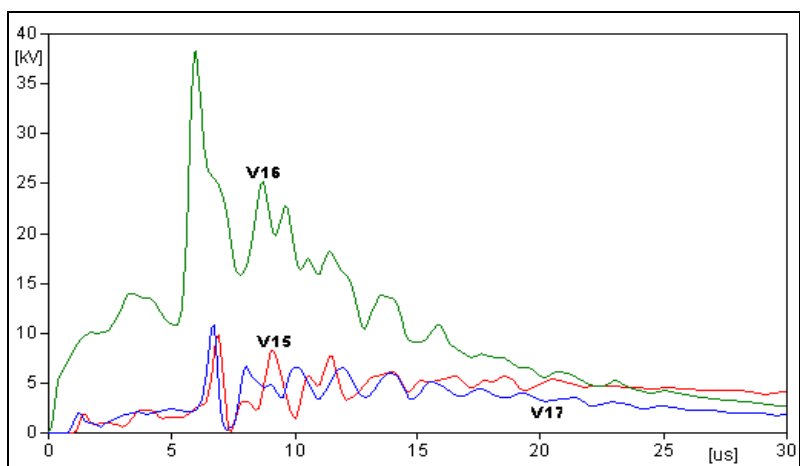


Figura 5.12 – Sobretensões resultantes com a injeção de corrente no topo da estrutura 16. Primeira Descarga.

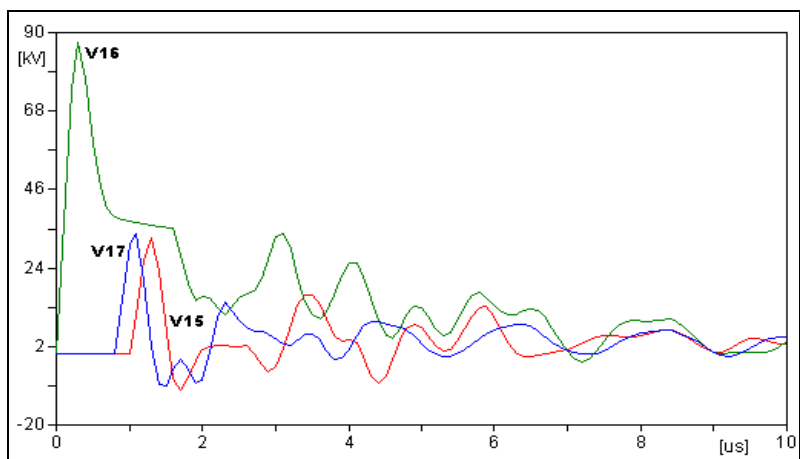


Figura 5.13 – Sobretensões resultantes com a injeção de corrente no topo da estrutura 16. Descarga Subseqüente.

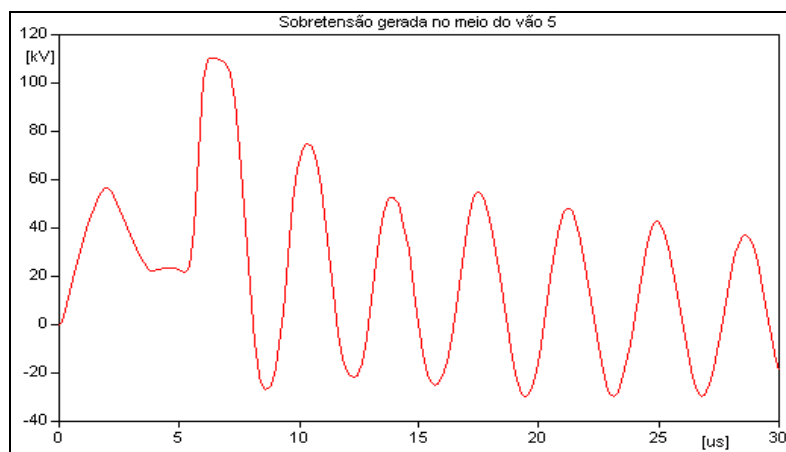


Figura 5.14 – Sobretensão resultante com a injeção de corrente no meio do vão 5. Primeira Descarga.

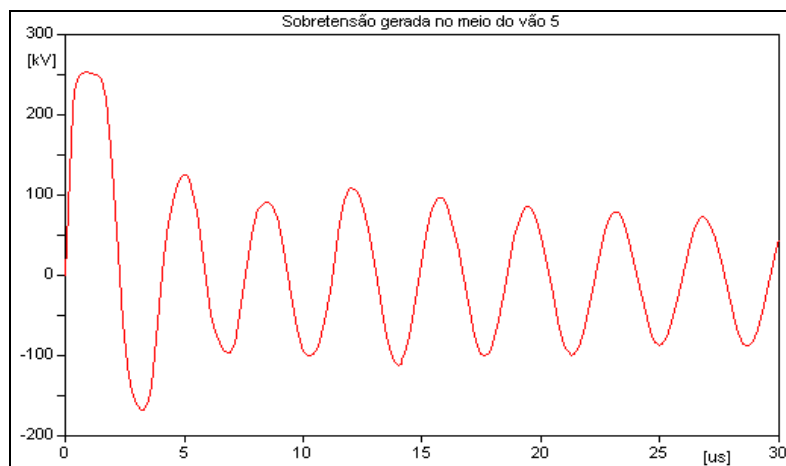


Figura 5.15 – Sobretensão resultante com a injeção de corrente no meio do vão 5. Descarga Subseqüente.

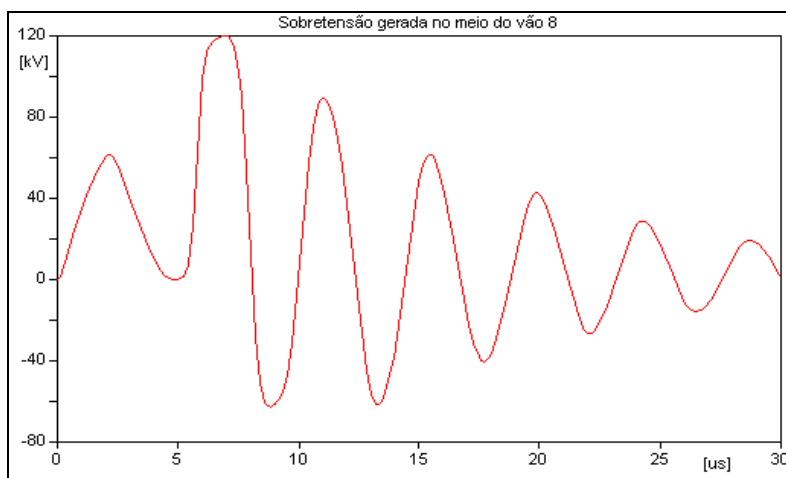


Figura 5.16 – Sobretensão resultante com a injeção de corrente no meio do vão 6. Primeira Descarga.

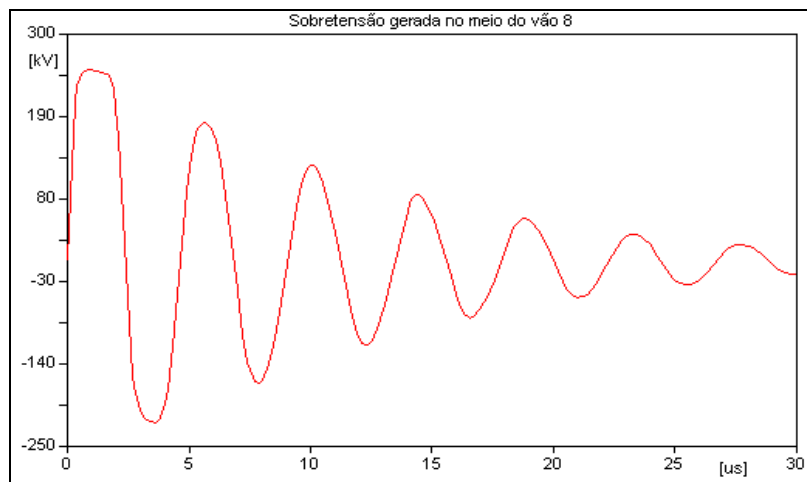


Figura 5.17 – Sobretensão resultante com a injeção de corrente no meio do vão 6. Descarga Subseqüente.

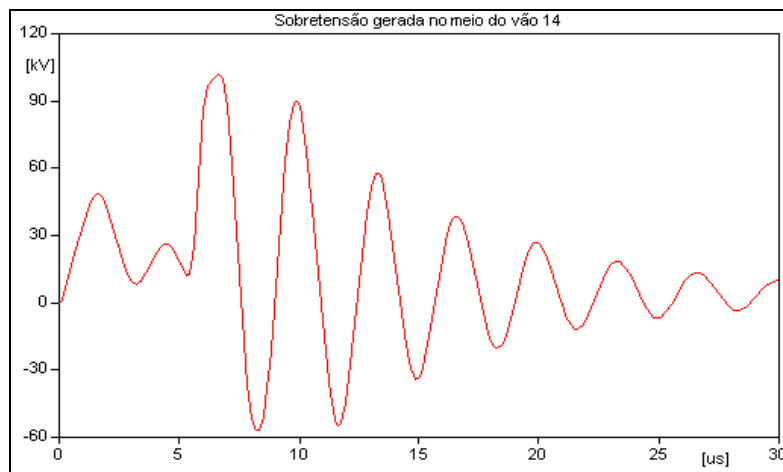


Figura 5.18 – Sobretensão resultante com a injeção de corrente no meio do vão 14. Primeira Descarga.

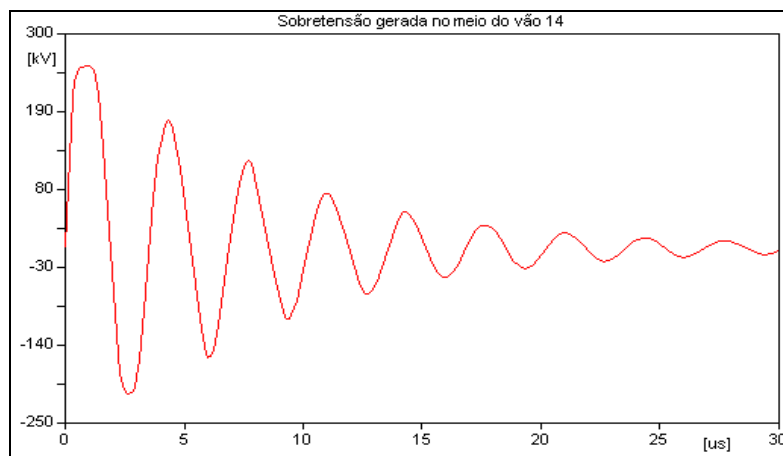


Figura 5.19 – Sobretensão resultante com a injeção de corrente no meio do vão 14. Descarga Subseqüente.

As tabelas 5.5 e 5.6 apresentam, respectivamente, as sobretensões obtidas a partir da injeção de corrente no topo de cada estrutura e ao longo dos vãos mais extensos.

Nº da Estrutura	Sobretensão devido a Primeira Descarga (kV/kA)			Sobretensão devido a Descarga Subseqüente (kV/kA)		
	Torre Adjacente	Torre Principal	Torre Adjacente	Torre Adjacente	Torre Principal	Torre Adjacente
01	-	26,44	6,76	-	83,53	30,69
02	5,40	30,27	9,02	30,69	84,54	30,82
03	9,02	36,35	10,88	30,81	86,54	32,39
04	10,88	37,19	9,14	32,29	86,83	22,57
05	11,66	41,53	8,90	31,98	87,29	20,68
06	8,96	43,31	10,00	20,78	87,81	31,80
07	7,73	29,95	8,63	21,78	84,50	30,58
08	8,63	33,87	7,26	30,58	85,17	29,12
09	7,26	29,01	7,89	29,12	83,77	30,00
10	7,89	27,27	7,06	30,00	83,66	30,82
11	7,06	28,94	9,31	30,82	84,11	31,74
12	9,31	33,26	8,37	31,74	86,46	31,73
13	8,37	29,08	7,45	31,73	84,06	31,62
14	7,45	32,34	7,96	31,62	85,02	31,25
15	7,96	32,43	9,88	31,25	84,86	32,59
16	9,88	38,29	10,80	32,59	87,70	34,15
17	10,80	31,49	-	34,15	85,85	-

Tabela 5.5 – Sobretensões resultantes devido à incidência direta de uma descarga atmosférica no topo das estruturas da LT.

Nº do Vão	Sobretensão devido a Primeira Descarga (kV/kA)			Sobretensão devido a Descarga Subseqüente (kV/kA)		
	1/6 do Vão (m)	1/3 do Vão (m)	1/2 do Vão (m)	1/6 do Vão (m)	1/3 do Vão (m)	1/2 do Vão (m)
05	106,54	110,47	110,94	242,00	252,83	252,84
08	103,48	113,43	119,94	242,81	252,24	252,24
14	96,62 *	101,74 **	101,78	245,42 *	254,91 **	254,91

Tabela 5.6 – Sobretensões resultantes nos possíveis pontos de incidência da descarga atmosférica no meio de vão da linha.

* A distância considerada foi 2/9 do vão.

** A distância considerada foi 4/9 do vão.

Analisando as figuras e as tabelas apresentadas neste item, observa-se que as maiores sobretensões foram obtidas, em ambos os casos, quando houve a injeção da forma de onda da corrente subsequente. Isto pode ser explicado devido ao curto tempo de frente que esta onda apresenta. Entretanto, as amplitudes reais da corrente das descargas subsequentes apresentam valores bem menores, quando comparado com as amplitudes das primeiras descargas.

Nas sobretensões no topo das estruturas, os valores máximos foram obtidos nas estruturas onde os valores de resistência de pé-de-torre eram maiores tanto para a primeira descarga quanto para as descargas subsequentes. Com relação às sobretensões obtidas nas estruturas adjacentes à estrutura atingida pela descarga, os valores não são significativos se comparadas com o NBI da linha.

No caso das sobretensões obtidas para descarga incidindo no meio do vão, é possível observar um aumento significativo nos valores máximos na região central dos vãos, à medida que se aumenta o comprimento do mesmo. Os valores mais elevados de sobretensão foram encontrados na região central dos vãos estudados. Em se tratando de amplitude os valores são bastante significativos e merecem devida atenção.

5.5.3 *Cálculo da Corrente Crítica*

A partir dos valores de sobretensões máximas obtidas no topo de cada estrutura e ao longo dos vãos mais extensos foi possível calcular o valor da corrente crítica em cada ponto de injeção de corrente, a partir da equação 5.2.

Na figura 5.20 são apresentadas os valores da corrente crítica para injeção de corrente no topo das estruturas. Os resultados mostram que os valores das correntes críticas da primeira descarga são muito próximos dos valores medianos, medidos em torres instrumentadas (30kA), porém os valores críticos da descarga subsequente são bem inferiores aos valores medianos (12kA).

Na figura 5.21 são apresentados as correntes críticas para injeção de corrente ao longo de três vãos da linha. Os valores das correntes críticas calculadas são menores que os valores medianos.

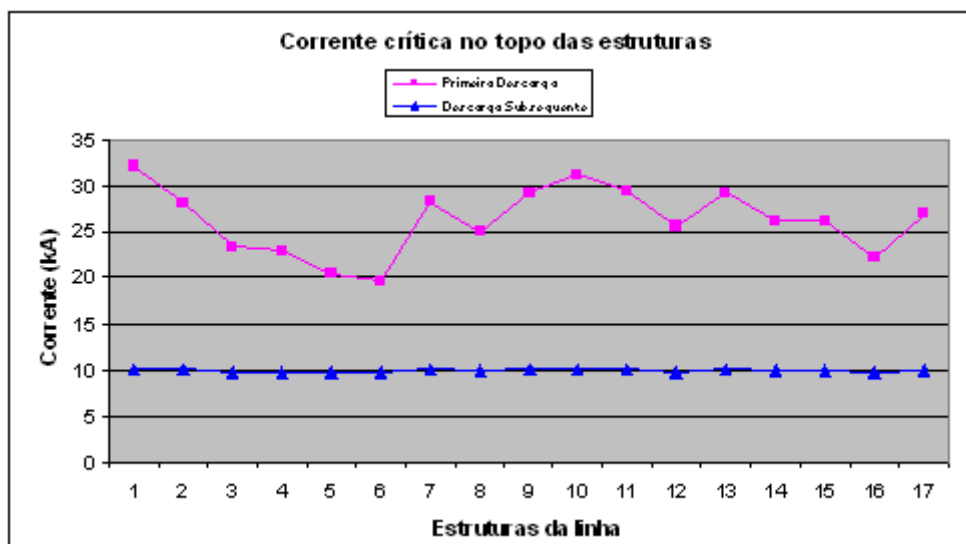


Figura 5.20 – Corrente crítica para injeção de corrente no topo da estrutura.

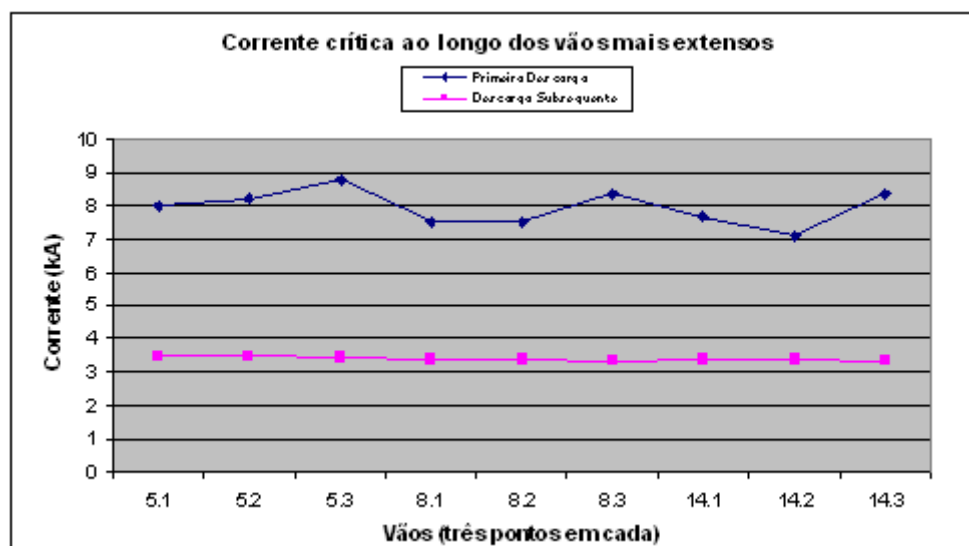


Figura 5.21 – Corrente crítica para injeção de corrente em três pontos ao longo dos três vãos mais extensos da linha.

Conforme já explicitado no item anterior as maiores sobretensões resultantes por unidade de corrente (kV/kA) ocorreram a partir da injeção da forma de onda da corrente subsequente. Os valores calculados para a corrente crítica reduziram bastante e os menores valores de corrente foram encontrados nas torres onde a resistência de pé-de-torre apresenta os valores mais elevados e no meio de vão, à medida que aumentamos seu comprimento.

5.5.4 Análise Geral dos Resultados

Para análise dos resultados apresentados durante a simulação foram consideradas as amplitudes de 30 e 12kA para as correntes de primeira descarga e descarga subsequente. Entretanto, quando a descarga incide diretamente na estrutura, nem toda a corrente percorre a mesma. Desta forma, para estimar a sobretensão máxima no topo da estrutura foi considerado apenas 80% da onda de corrente, ou seja, 24 e 9,6kA. No caso das incidências no meio do vão, a corrente se divide em duas parcelas praticamente iguais e, assim, o valor das correntes consideradas foram 15 de 6kA. Em função destes valores podemos estimar qual é a real sobretensão resultante ao qual estará submetida à linha, nos diversos pontos estudados. Nas tabelas 5.7 e 5.8 foram calculadas estas sobretensões. Vale lembrar que o NBI para uma linha de 138kV é de 850kV.

Nº da Estrutura	Sobretensão no topo da torre (kV)			
	Simulada	Com a corrente real da primeira descarga	Simulada	Com a corrente real da descarga subsequente
01	26,44	634,56	83,53	801,88
02	30,27	726,48	84,54	811,58
03	36,35	872,40	86,54	830,78
04	37,19	892,56	86,83	834,53
05	41,53	996,72	87,29	837,98
06	43,31	1.039,44	87,81	842,98
07	29,95	718,8	84,50	811,20
08	33,87	812,88	85,17	817,63
09	29,01	696,24	83,77	804,19
10	27,27	654,48	83,66	803,14
11	28,94	694,56	84,11	807,46
12	33,26	798,24	86,46	830,02
13	29,08	697,92	84,06	806,98
14	32,34	776,16	85,02	816,19
15	32,43	778,32	84,86	815,62
16	38,29	918,96	87,70	841,92
17	31,49	755,76	85,85	824,16

Tabela 5.7 – Sobretensões resultantes devido à incidência direta de uma descarga atmosférica real no topo das estruturas da LT.

Nº do Vão	Sobretensão no meio do vão (kV)			
	Simulada	Com a corrente real da primeira descarga	Simulada	Com a corrente real da descarga subsequente
05	110,94	1.664,10	252,84	1.517,04
08	119,94	1.799,10	252,24	1.513,44
14	101,78	1526,70	254,91	1.529,46

Tabela 5.8 – Sobretensões resultantes nos possíveis pontos de incidência de uma descarga atmosférica real no meio de vão da linha.

Baseado na tabela 5.7, as sobretensões críticas são aquelas calculadas para a primeira descarga incidindo naquelas torres que têm a Resistência de Aterramento maior que a recomendada (torres 3, 4, 5, 6 e 16). Por outro lado, o valor da sobretensão devida as correntes subseqüentes tendem a ser maior, apesar de sua amplitude ser aproximadamente 1/3 da amplitude das correntes de primeira descarga. Isso se explica pelo fato do tempo de frente de onda da descarga subsequente ser bem mais rápido que a onda de primeira descarga.

Como foi considerado o valor mediano para as correntes de descarga, e os valores de sobretensões se aproximaram ou ultrapassaram o NBI da linha, pode-se considerar que 50% das incidências levariam ao desligamento da linha. Entretanto, acredita-se que os resultados obtidos sejam extremamente rigorosos, por não considerarem alguns aspectos que contribuiriam para reduzir as sobretensões. Este é o caso do acoplamento eletromagnético entre os condutores fase e os cabos de blindagem da linha. Durante a simulação no ATP, tanto o espaçamento entre os condutores aéreos quanto a altura no meio do vão são considerados como constantes e maiores. Porém, como a linha está localizada numa região bastante íngreme, estas distâncias variam ao longo da linha, principalmente nas regiões próximas ao topo das estruturas, fazendo com que o acoplamento eletromagnético seja maior e, conseqüentemente, a sobretensão nas cadeias de isoladores se torne menor.

Comparando os valores das sobretensões obtidas na tabela 5.8 com o valor do NBI da linha de transmissão, verifica-se que em todos os três vãos simulados, a sobretensão resultante é bem maior que o NBI da linha e, conseqüentemente, podem levar à interrupção do fornecimento de energia ou danos ao sistema.

5.5.5 Sugestões para Garantir o bom Desempenho da Linha

Diante das possibilidades de interrupção do fornecimento de energia, apresentadas no item anterior e, mesmo sabendo que a linha de transmissão estudada já está completamente montada e comissionada para ser energizada, faz-se necessário propor sugestões a serem implementadas nas configurações do aterramento de pé-de-torre.

Em estudo realizado em sistemas de aterramentos de torres de transmissão da CEMIG frente a descargas atmosféricas [26], foi proposta uma configuração aprimorada visando reduzir a impedância impulsiva. As configurações são constituídas de um anel de equalização ligando os pontos de injeção de corrente no solo, além de cabos adicionais colocados de forma paralela e ortogonal à faixa de servidão da linha, conforme apresentado na figura 5.22. Segundo o estudo, estes modelos de aterramento contribuirão na redução de até 69% da impedância de pé-de-torre nas linhas de 138kV.

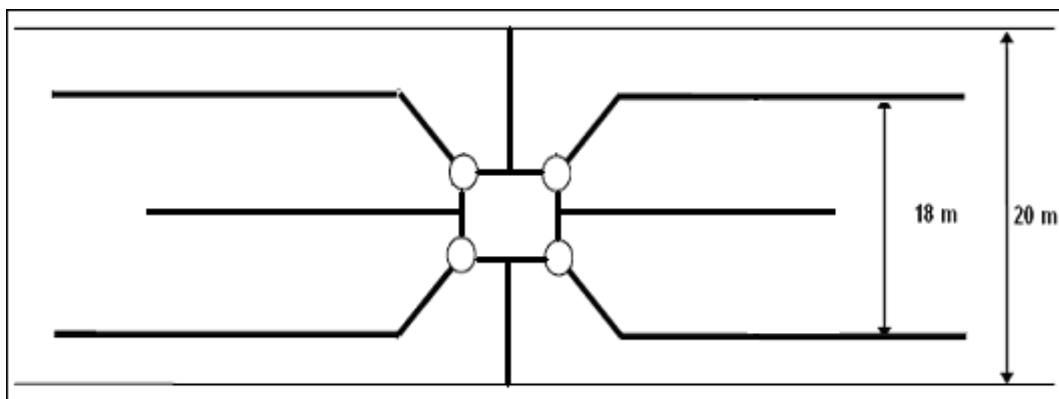


Figura 5.22 – Configuração aprimorada para o aterramento das estruturas metálicas autoportantes (adaptado de [26]).

Com base neste estudo a impedância de aterramento das torres, onde a sobretensão foi superior ao NBI da linha, foram reduzidas em 50% e novas simulações foram realizadas, considerando a descarga incidindo diretamente nas estruturas metálicas. Os resultados obtidos foram satisfatórios ($< 850\text{kV}$) e as novas sobretensões resultantes são mostradas na tabela 5.9 a seguir.

Nº da Estrutura	Sobretensão no topo da torre (kV)			
	Simulada (kV/kA)	Com a corrente real de primeira descarga (kV)	Simulada (kV/kA)	Com a corrente real da descarga subsequente (kV)
03	30,62	734,88	84,90	815,04
04	31,14	747,36	85,04	816,38
05	33,46	803,04	85,07	816,67
06	34,71	833,04	85,34	819,26
16	32,86	788,64	85,52	820,99

Tabela 5.9 – Sobretensões resultantes no topo das estruturas com a nova configuração no aterramento de pé-de-torre.

Além de aprimorar o aterramento das estruturas que apresentaram problemas, foi sugerido que se aumente o comprimento do cabo contrapeso de 90 para 120 metros, tendo em vista que a resistividade do solo, onde estas estruturas estão localizadas é bastante elevado.

Com relação aos problemas apresentados com a incidência da descarga no meio do vão, a redução da impedância impulsiva no pé da estrutura foi pouco significativa, de forma que a sobretensão ao longo do vão ainda será maior que o NBI da linha.

6. CONCLUSÃO

6.1 Introdução

Esta monografia teve como objetivo abordar a questão do desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas e realizar uma aplicação no tema com emprego dos conhecimentos desenvolvidos no Curso de Especialização em Sistemas Elétricos de Potência - CESEP. Basicamente o trabalho se desenvolveu segundo as seguintes vertentes: (1) caracterização do fenômeno descarga atmosféricas, citando os principais processos para sua formação e os principais parâmetros físicos, assim como os principais mecanismos de desligamento de um sistema provocado pela mesma; (2) abordagem das principais técnicas convencionais e não-convencionais utilizadas para melhorar o desempenho da linha de transmissão frente a descargas; e (3) que trata da modelagem de uma linha de 138kV, a partir de simulação computacional, para avaliação das sobretensões desenvolvidas no topo das estruturas metálicas e em meio de vão (para vãos mais extensos). Posteriormente foram sugeridas técnicas para alteração da configuração do aterramento de pé-de-torre a fim de melhorar o desempenho da linha.

6.2 Conclusões Gerais

No que concerne às investigações realizadas em estudos para minimizar os desligamentos em linhas de transmissão, apresentados no capítulo 4 deste trabalho, vale apresentar as seguintes considerações:

- Na melhoria do aterramento de pé-de-torre, o uso de cabos contrapesos maiores que o valor do comprimento efetivo pode ser um desperdício. Além disso, o valor estimado da impedância de aterramento pode ser bem diferente do esperado, uma vez que este valor é relacionado com o valor da resistência de aterramento medida em baixas frequências. Vale lembrar que o aumento do cabo contrapeso pode diminuir a resistência
-

de aterramento, mas, isto não assegura que a impedância de aterramento também terá seu valor reduzido;

- É recomendável que a impedância de aterramento da estrutura metálica não seja superior a 25Ω , para garantir o bom desempenho da linha de 138kV e desta forma assegurar que a sobretensão na cadeia de isoladores seja inferior ao NBI da linha para uma corrente de descarga de 45kA;
- A utilização do dispositivo pára-raios em paralelo com as cadeias de isoladores, torna-se uma solução bastante eficiente, principalmente quando se faz a seleção dos pontos mais críticos da linha que permitem determinar a posição e os quantitativos dos dispositivos a serem instalados na linha;
- A utilização de práticas não-convencionais (cabos aterrados sob a fase, reconstituição do aterramento, tratamento químico, anéis equalizadores na base da torre, etc) apresentou resultados bastante expressivos, no que diz respeito à redução dos desligamentos nas linhas de transmissão estudadas. Estas técnicas devem ser utilizadas, principalmente, em linhas onde se pretende reduzir a impedância de aterramento, mas a região apresenta altos valores de resistividade do solo;

Considerando os resultados obtidos com a simulação da linha de transmissão de 138kV, modelada de forma a representar todos os componentes envolvidos no percurso da onda impulsiva de descarga (cabos aéreos, estrutura metálica e o aterramento de pé-de-torre), pode-se tecer as seguintes conclusões:

- Quanto menor a impedância de aterramento, menores foram as sobretensões resultantes no topo da estrutura onde incidiu a descarga, assim como nas estruturas adjacentes;
 - A incidência da descarga subsequente nas estruturas, proporcionaram maiores sobretensões (kV/kA) tanto na estrutura vítima quanto nas estruturas adjacentes. Isso se deve ao pequeno tempo de frente da onda impulsiva de corrente. Entretanto, as sobretensões resultantes, devidos
-

às estas descargas, não representaram problemas no isolamento da linha;

- Em se tratando da primeira descarga incidindo diretamente na torre, foram detectadas possíveis estruturas que podem ter problemas. As sobretensões resultantes foram superiores ao NBI da linha. Desta forma, foi sugerida uma nova configuração para minimizar o valor da impedância de aterramento das torres problemáticas. Foram realizadas novas simulações e os resultados foram satisfatórios. Entretanto, para as descargas subseqüentes a redução da impedância de aterramento se mostrou pouco eficaz para redução das sobretensões resultantes no topo das estruturas.
 - No caso das descargas (primeira ou subseqüente) atingindo pontos ao longo de vãos da linha, as sobretensões ali resultantes são bem superiores àquelas desenvolvidas nos isoladores quando da incidência da descarga diretamente na torre. Apesar das sobretensões causadas pelas primeiras descargas serem mais elevadas que as descargas subseqüentes, ambas podem resultar na interrupção do fornecimento de energia ou danos ao sistema, pois os valores são bastante significativos.
 - A redução do valor da impedância de aterramento, assim como a influência das torres adjacentes, tem pouca influência na redução da sobretensão no meio do vão e nas sobretensões das descargas subseqüentes.
-

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BEZERRA, A. C. G.; **“Diagnóstico de Desempenho sob ação de Descargas Atmosféricas de LT em Projeto com Aplicação de Pára-Raios de ZnO”**, XV SNPTEE, GLT/11 - 17 a 22 de outubro de 1999, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil.
- [2] CARVALHO, A., M.; ABREU, M. S.; FILHO, A. C.; CARVALHO, A. C.; CHERCHIGLIA, L. C. L.; DINIZ, J. H., **“Tecnologia para Análise e Melhoria do Desempenho de Instalação de Transmissão Frente a Descargas Atmosféricas”**, XV SNPTEE, GSI/12 - 17 a 22 de outubro de 1999, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil.
- [3] CHERCHIGLIA, L. C. L.; ROCHA, A. C. O.; BEZERRA, A. C. G.; SOUZA, V. J., **“Estudo para Aplicação de Pára-raios de ZnO em Linhas de Transmissão da CEMIG”**, XV SNPTEE, GSI/13 - 17 a 22 de outubro de 1999, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil.
- [4] DE CONTI, A.; VISACRO, S., **“Analytical Representation of Single- and Double-Peaked Lightning Current Waveforms”**, IEEE Transactions and Electromagnetic Compatibility, vol. 49, nº 2, pp. 448-451, May 2007.
- [5] DE CONTI, A.; VISACRO, S.; SILVA, E. G., **“Calculation of Tower Surge Impedance with Jordan’s Equations”**, XIX-th International Conference on Electromagnetic Disturbances, September, 23-25, 2009, Bialystok, Poland.
- [6] FRANCO, J. L.de; WENDLER, M. V.; LIRA, E. A., **“Melhoria de Desempenho de Linhas de Transmissão através de Aplicação de Pára-raios”**, XV SNPTEE, GLT/11 - 17 a 22 de outubro de 1999, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil.
- [7] LIMA, J. L. C., **“Avaliação Experimental sobre o Efeito da Ionização do Solo devido à Injeção de Correntes Impulsivas”** – Dissertação de Mestrado, Orientador: Visacro, S., LRC – PPGEE/UFMG, Setembro 2008.
- [8] MIRANDA, D.C.; CUNHA, L.V.; VISACRO, S. F.; DIAS, R. N.; MESQUITA, C. R., **“Resultados de Aplicação de Metodologia Inovadora para Melhoria de Desempenho da LT Guilman Amorim – Ipatinga 1, 230KV, Frente a Descargas Atmosféricas”**, XV SNPTEE, GLT/21 – 14 a 17 de Outubro de 2007, Rio de Janeiro, Brasil.
- [9] NOGUEIRA, P. J. C., **“Influência na Estratificação do Solo na Impedância Impulsiva de Aterramentos de Linhas de Transmissão”** – Dissertação de Mestrado, Orientador: Alves, M.F., CEMIG – PPGEE/PUC-MG, Março 2002.
- [10] ROCHA, L. C., **“Desempenho de Linhas de Transmissão EAT e UAT Frente a Descargas Atmosféricas: Influência da Ruptura a Meio de Vão”** – Dissertação de Mestrado, Orientador: Visacro, S., LRC – PPGEE/UFMG, Março 2009.
- [11] SILVA, A. P., **“Melhoria de Desempenho de Linhas de Transmissão frente a Descargas Atmosféricas: Desenvolvimento de Sistema de Informações e Análises de Casos”** – Dissertação de Doutorado, Orientador: Visacro, S., LRC – PPGEE/UFMG, Dezembro 2007.
-

-
- [12] SOARES Jr., A., **“Modelagem de Linhas de Transmissão para Avaliação de Desempenho frente a Descargas Atmosféricas”** – Tese de Doutorado, Orientador: Visacro, S., LRC – PPGEE/UFMG, 2001.
- [13] SOARES Jr., A.; VISACRO, S. F.; SILVA, A. P., **“Proposição de Fórmulas Simplificadas para Cálculo da Impedância de Surto de Torres de Transmissão Autoportantes”**, XVIII. GSC/03 – 16 a 21 de outubro de 2005, Curitiba, Paraná, Brasil
- [14] SOARES Jr. A.; SCHROEDER M. A. O.; VISACRO S., **“Transient Voltages in Transmission Lines Caused by Direct Lightning Strokes”**, IEEE – Transactions on Power Delivery, vol. 20, n.2, pp.1447-1452, April 2005
- [15] TAKAMI, J.; OKABE, S., **“Characteristics of Direct Lightning Strokes to Phase Conductors of UHV Transmission Lines”**, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, pp 537-546, Janeiro 2007a.
- [16] TAKAMI, J; OKABE, S., **“Observational Results of Lightning Current on Transmission Towers”**, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, nº 1, pp 547-556, Janeiro 2007b.
- [17] TANOGUCHI, S; OKABE S., **“A Contribution to the Investigation of the Shielding Effect of Transmission Line Conductors to Lightning Strikes”**, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 15, nº 3, pp. 710-720, June 2008.
- [18] TARCHINI, J.A.; GIMENEZ, W. **“Line Surge Arrester Selection to Improve Lightning Performance of Transmission Lines”**, Paper accepted for presentation at 2003 IEEE Bologna PowerTech Conference, June 23-26, Bologna, Italy.
- [19] VIANA, J. C. C., **“Estudo de Aplicação de Pára-Raios de ZnO em Linhas de Transmissão em Regiões de Nível Cerâmico e Resistência de Aterramento Elevados”** – Dissertação de Mestrado, Orientador: Lopes, I. J. – PPGEE/UFMG, Setembro 2009.
- [20] VISACRO, S. F., **“Aterramentos Elétricos: Conceitos Básicos; Técnicas de Medição e Instrumentação; Filosofias de Aterramentos”**, Editora Artliber, São Paulo, 2005.
- [21] VISACRO, S. F., **“Descargas Atmosféricas: Uma Abordagem de Engenharia”**, Editora Artliber, São Paulo, 2005.
- [22] VISACRO, S. F., **“Direct Strokes to Transmission Lines: Considerations on the Mechanism of Overvoltage Formation and Their Influence on the Lightning Performance of Lines”**, Journal of Lightning Research., v.1, pp.60-68, 2007.
- [23] VISACRO, S. F., **“Resposta dos Aterramentos Elétricos Frente à Correntes de Descargas Atmosféricas”**, XIX SNPTEE, GSC/09 – 14 a 17 de outubro de 2007, Rio de Janeiro, Brasil.
- [24] VISACRO, S.F., **“A Comprehensive Approach to the Grounding Response to Lightning Currents”**, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, nº 1, pp. 381-386, January 2007.
-

[25] VISACRO, S. F.; SOARES Jr., A.; GUEDES, V. T.; SPALENZA, A.; ANTUNES, E. P., **“Práticas não Convencionais para a Melhoria do Desempenho de Linhas de Transmissão Frente a Descargas Atmosféricas”**, XVIII SNPTEE, GLT/33 – 16 a 21 de outubro de 2005, Curitiba, Paraná, Brasil.

[26] VISACRO, S.F.; SOARES Jr., A.; SCHROEDER, M.A.; CHERCHIGLIA, L.C.L.; CARVALHO, A. M., **“Investigação sobre o Aterramento de Torres de Sistema de Transmissão da CEMIG para Melhoria de Desempenho de Linhas Frente a Descargas Atmosféricas”**, SIPDA – 1997, São Paulo, Brasil.

[27] VISACRO, S. F., **“Statistical Analysis of Lightning Current Parameters: Measurements at Morro do Cachimbo Station”**, Journal of Geophysical Research., v.109, D01105, 2004.

[28] VISACRO, S.F.; DIAS, R.N.; MESQUITA, C.R., **“Novel Approach for Determining Spots of Critical Lightning Performance along Transmission Lines”**, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, nº 2, pp. 1459-1464, April 2005.
