

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**MELHORIA DE DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO FRENTE
A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS: DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA
DE INFORMAÇÕES E ANÁLISE DE CASOS**

ADELINO PINHEIRO SILVA

ADELINO PINHEIRO SILVA

**MELHORIA DE DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO FRENTE
A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS: DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA
DE INFORMAÇÕES E ANÁLISE DE CASOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Automática

Linha de Pesquisa: Sistemas de Energia Elétrica

Orientador: Prof. Silvério Visacro Filho

Co-orientador: Prof. Peterson Resende

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGEE
CENTRO DE PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - CPDEE
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS - UFMG
BELO HORIZONTE
DEZEMBRO – 2007

AGRADECIMENTOS

Que estas minhas palavras de agradecimento não fiquem presas nesta simples página, mas que elas possam representar o meu profundo sentimento de orgulho e reconhecimento da contribuição de cada um de vocês na idealização desta etapa.

Agradeço primeiramente a Deus, aquele que acima de tudo honro como criador.

Agradeço especialmente ao professor Silvério Visacro Filho, meu orientador, por sua significativa contribuição na realização deste texto e por sua dedicação em orientar-me e transferir parte de seu valioso conhecimento. Sua confiança e encorajamento têm sido fonte da minha formação como engenheiro.

Ao professor Peterson Resende, por seu interesse e, sem dúvida, sua grande contribuição durante o desenvolvimento e avaliação deste trabalho.

Não poderia deixar de agradecer aos demais membros da banca, professores Amiltom Soares Júnior e José Tavares de Oliveira pela considerável contribuição neste texto.

Agradeço também à minha família, à Lúcia e ao Raimundo, que mais contribuíram para a minha criação, à minha irmã Leila pela ajuda e à minha companheira Fabiana, que sempre me compreendeu e me incentivou na minha longa jornada da engenharia elétrica.

Merecem também meus agradecimentos meus amigos e irmãos Guilherme, Rafael, Leonardo, que estão na luta comigo desde o segundo grau. Agradeço também a João Carlos, Thiago, Marcela, Vladimir, Acauã, Marina, Débora e muitos outros amigos que convivem ou conviveram comigo nesta longa caminhada.

Também não posso deixar de agradecer aos meus amigos de pesquisa Luiz Mariano, Renato, Fernando, Alberto, Fabrício, Fuad, e às meninas Cláudia, Rosilene e Antônia.

Agradeço também aos meus colegas de trabalho Marcelo, Bruno, Carlos Roberto e a todos os colegas da Polícia Civil, que me incentivam no meu trabalho.

RESUMO

A investigação dos desligamentos de linhas de transmissão por descargas atmosféricas engloba diferentes frentes de pesquisa, sendo a redução do número de desligamentos o foco dos desenvolvimentos. Esta dissertação busca apresentar uma contribuição, particularmente no domínio das linhas de transmissão de níveis de tensão compreendidos entre 69 kV e 230 kV, e se insere em uma vigorosa linha de pesquisa em curso no LRC¹.

As realizações deste trabalho contemplam fundamentalmente dois tópicos, a compilação das informações sobre linhas de transmissão e avaliações da eficiência de práticas de melhoria do desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas.

No primeiro tópico, foi desenvolvido um sistema computacional de informações para organização dos dados necessários para a avaliação do desempenho de linhas de transmissão.

No segundo tópico, foram realizadas extensivas simulações computacionais para avaliação das práticas tradicionais e não-convencionais capazes de impactar positivamente o desempenho das linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas. As avaliações foram realizadas na forma de estudo de dois casos, respectivamente para linhas de 69 kV e 230 kV.

¹ LRC - Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas (resultado da parceria UFMG-CEMIG).

ABSTRACT

The investigations of outages of transmission line due lightning effects include different fields of research. Reducing the number of outages is the focus of developments. This text presents a contribution in this respect, concerning particularly transmission lines with operational voltage level between 69 kV and 230 kV, following a vigorous research in progress at LRC².

This work includes two fundamental topics, the compilation of information about transmission lines and an evaluation about the efficiency of practices for improving the lightning performance of transmission lines.

In the first topic, a computational system was developed to organize all information required for evaluation of the line performance.

In the second topic, systematic computational simulations were performed in order to evaluate traditional and non-conventional practices intended to improve the lightning performance of transmission lines. The evaluations were developed, considering two case studies, respectively for 69 kV and 230 kV lines.

² LRC - Lightning Research Center, a cooperation between UFMG (Federal University of Minas Gerais) and CEMIG (Minas Gerais State Energy Company).

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 RELEVÂNCIA DA INVESTIGAÇÃO	1
1.2 OBJETIVO	3
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	3
2. A DINÂMICA DO DESLIGAMENTO DA LT POR DESCARGA ATMOSFÉRICA	5
2.1 PARÂMETROS DE INTERESSE EM CORRENTES DE DESCARGAS	5
2.2 MECANISMOS DE DESLIGAMENTO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO	8
2.2.1 INCIDÊNCIA INDIRETA	9
2.2.2 INCIDÊNCIA DIRETA	11
2.2.2.1 O <i>FLASHOVER</i>	11
2.2.2.2 O <i>BACKFLASHOVER</i>	13
2.2.2.3 RUPTURA A MEIO DE VÃO	15
3. SISTEMA DE INFORMAÇÕES PARA LINHAS DE TRANSMISSÃO	17
3.1 INTRODUÇÃO	17
3.2 CARACTERÍSTICAS DE SISTEMAS COMPUTACIONAIS APLICADOS A SISTEMAS DE TRANSMISSÃO	20
3.2.1 LOCALIZADORES DE FALTAS	20
3.2.2 SISTEMA DE DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE RAIOS (LLS)	21
3.3 PROPOSTA DE DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE INFORMAÇÕES DE LINHAS DE TRANSMISSÃO	21
3.3.1 INFORMAÇÕES RELEVANTES À PROTEÇÃO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO	23
4. DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE INFORMAÇÕES PARA APLICAÇÃO NO ESTUDO DOS DESLIGAMENTOS DE LT'S POR DESCARGAS	25
4.1 INTRODUÇÃO	25
4.2 ARQUITETURA DO SISTEMA	26
4.2.1 TÉCNICAS DE ARMAZENAMENTO DE DADOS	28
4.2.2 TÉCNICAS DE SEGURANÇA DAS INFORMAÇÕES	30
4.2.2.1 INTERDEPENDÊNCIA	31

4.2.2.2 CRIPTOGRAFIA	31
4.2.3 ORGANIZAÇÃO DE CLASSES	33
4.3 ORGANIZAÇÃO FUNCIONAL DO LTINFO	36
4.3.1 PROCESSO DE TRATAMENTO DO ARQUIVO	37
4.3.2 ACESSO AO BANCO DE DADOS GERAL	39
4.3.3 ACESSO AO BANCO DE DADOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO	42
4.3.4 ACESSO A INSERÇÃO E EDIÇÃO DE MAPAS	47
4.4 FUNCIONALIDADES QUE PODEM SER APLICADAS	49
<u>5. TÉCNICAS DE MELHORIAS DE DESEMPENHO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS</u>	<u>50</u>
5.1 INTRODUÇÃO	50
5.2 TÉCNICAS TRADICIONAIS DE MELHORIA	51
5.2.1 USO DE PÁRA-RAIOS	51
5.2.2 AUMENTO DO NÚMERO DE ISOLADORES	52
5.2.3 MELHORIA DO ATERRAMENTO DE PÉ DE TORRE	53
5.2.4 VALORES RECOMENDÁVEIS DE IMPEDÂNCIA	56
5.3 TÉCNICAS DE MELHORIA NÃO CONVENCIONAIS	57
<u>6. APLICAÇÕES: RESULTADOS DE ESTUDO DE DESLIGAMENTOS EM LT'S</u>	<u>60</u>
6.1 MODELO COMPUTACIONAL UTILIZADO	60
6.2 PRIMEIRO CASO ESTUDADO: LINHA DE 230 kV	64
6.2.1 INTRODUÇÃO AO CASO	64
6.2.2 CONFIGURAÇÃO ANALISADA	64
6.2.3 PARÂMETROS ANALISADOS NO ATERRAMENTO	66
6.2.4 FORMA DE ONDA DE CORRENTE UTILIZADA	66
6.2.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS	67
6.2.6 COMPORTAMENTO DA TORRE FRENTE À DESCARGA ATMOSFÉRICA COM SISTEMA DE ATERRAMENTO CONCENTRADO	67
6.2.7 COMPORTAMENTO DA TORRE FRENTE À DESCARGA ATMOSFÉRICA COM SISTEMA DE ATERRAMENTO COM CABOS CONTRAPESO	71
6.2.8 ANÁLISE DAS SOBRETENSÕES NO PÉ DE TORRE COM SISTEMA DE ATERRAMENTO COM CABOS CONTRAPESO	77
6.2.9 ANÁLISE GERAL DOS RESULTADOS OBTIDOS	80
6.3 SEGUNDO CASO ESTUDADO: LINHA DE 69 kV	81

6.3.1 INTRODUÇÃO AO CASO	81
6.3.2 CONFIGURAÇÃO ANALISADA	82
6.3.3 PARÂMETROS E FORMA DE ONDA UTILIZADA	84
6.3.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	85
6.3.5 COMPORTAMENTO DA TORRE FRENTE À DESCARGA ATMOSFÉRICA COM SISTEMA DE ATERRAMENTO REPRESENTADO POR IMPEDÂNCIA CONCENTRADA	86
6.3.6 COMPORTAMENTO DA TORRE FRENTE À DESCARGA ATMOSFÉRICA COM UTILIZAÇÃO DE UM CABO INFERIOR ATERRADO	88
6.3.7 COMPORTAMENTO DA TORRE FRENTE À DESCARGA ATMOSFÉRICA COM UTILIZAÇÃO DE DOIS CABOS INFERIORES CONECTADOS A TORRE	90
6.3.8 ANÁLISE GERAL DOS RESULTADOS OBTIDOS	92
7. CONCLUSÕES E CONTRIBUIÇÕES	100
7.1 INTRODUÇÃO	100
7.2 RESULTADOS DESENVOLVIDOS	100
7.3 PROPOSTA DE CONTINUIDADE	102
7.3.1 PROPOSTAS REFERENTES AO LT-INFO	102
7.3.2 PROPOSTAS REFERENTES AO ESTUDO DE DESLIGAMENTOS	102
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104

Lista de Siglas e Abreviaturas

ANSI - *American National Standards Institute* (Instituto Nacional Americano de Padronização).

ASCII - *American Standard Code for Information Interchange* (Código Americano Padrão para Troca de Informações).

ASI - Arquitetura de Sistemas de Informação.

CAD - *Computer Aided Design* (Projeto Assistido por Computador).

DA - Descarga Atmosférica.

HEM - *Hybrid Eletromagnetic Model* (Modelo Eletromagnético Híbrido).

LLS - *Lightning Location System* (Sistema de Detecção e Localização de Raios).

LT - Linha de Transmissão.

MFC - *Microsoft Foundation Class*.

NBI - Nível Básico de Isolamento.

SI - Sistema de Informação.

SIG - Sistema de Informações Geográficas.

TSI - Tensão Suportável ao Impulso.

VCL - *Visual Component Class*.

1 Introdução

1.1 Relevância da Investigação

Do ponto de vista do desenvolvimento tecnológico, a utilização consciente da energia elétrica sempre foi um fator relevante. Nas últimas décadas o aumento do consumo de energia elétrica, assim como o crescimento de sua necessidade, vem impondo várias exigências em relação à qualidade de energia fornecida bem como à sua disponibilidade.

O estudo do assunto descargas atmosféricas abrange diversas ramificações do conhecimento. Trata-se de um fenômeno de alta importância na manutenção do equilíbrio do planeta e que também é fonte de efeitos devastadores. Desde os primórdios da humanidade, tais efeitos têm provocado o fascínio dos seres humanos e, mais recentemente, a curiosidade dos pesquisadores ao redor do mundo.

Como aspecto relevante para a engenharia elétrica, o fenômeno descarga atmosférica constitui-se na principal fonte de desligamentos não programados de linhas de transmissão e de redes de distribuição. Tais desligamentos correspondem a um importante fator de comprometimento da disponibilidade de energia elétrica e de sua qualidade. A minimização desses desligamentos requer altos investimentos por parte das concessionárias de energia, com objetivo de manter e aumentar a robustez do sistema e de precaver-se contra os efeitos das descargas atmosféricas.

A partir de convênio instituído entre a UFMG e a CEMIG, foi constituído, em Minas Gerais, um centro de pesquisa e desenvolvimento em descargas atmosféricas, o LRC³. Tal centro concentra um conjunto de valiosos recursos para o estudo e investigação sobre descargas atmosféricas, destacando-se particularmente a Estação de Morro de Cachimbo, equipada para medição direta de parâmetros de corrente de descarga. Na sede do centro no campus da UFMG localiza-se um conjunto de laboratórios especializados, incluindo o LATER (Laboratório de Aterramento Elétricos) onde foi desenvolvido este e muitos outros trabalhos relacionados a descargas atmosféricas.

Basicamente as descargas atmosféricas promovem desligamentos de linhas através de dois tipos de eventos, a incidência direta na linha e a tensão nela induzida por uma descarga próxima. A descarga direta é aquela que incide nos condutores da linha de transmissão, sejam eles energizados (condutores fase) ou não (condutores de blindagem). As tensões induzidas na linha são provocadas pelo campo eletromagnético gerado a partir da corrente de retorno que flui pelo canal de descarga. Este campo qual ilumina a linha de transmissão quando a descarga atmosférica atinge suas proximidades.

Em ambos os casos a tensão resultante na linha de transmissão pode promover o rompimento do isolamento entre os cabos condutores e as partes aterradas, provocando um curto-circuito.

A presente dissertação encaixa-se no contexto de pesquisa da equipe do LRC relativa à investigação de desligamento de linhas de transmissão, sendo que o presente trabalho se insere em num segmento que busca integrar várias ferramentas em um sistema fundamentado na prevenção contra desligamentos. Apesar do período de desenvolvimento limitar o perímetro do trabalho, os passos iniciais e os planos de expansão estão prontos para prover a sua continuidade.

³ LRC - Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas (resultado da parceria UFMG-CEMIG).

1.2 *Objetivo*

Esta dissertação possui basicamente dois objetivos.

O primeiro consiste na constituição de um sistema de informação, na forma de aplicativo computacional, capaz de armazenar de forma organizada todas as informações e parâmetros sobre as linhas de transmissão de uma empresa relevantes para avaliação do desempenho destas frente a descargas atmosféricas.

O segundo objetivo é a realização de uma investigação sobre os principais parâmetros das linhas que influenciam nesse desempenho. A metodologia de pesquisa consiste na simulação computacional sistemática, com emprego de elaborado modelo computacional, para se verificar quantitativamente o grau de influência destes parâmetros. A realização dessa investigação considera dois casos de estudo de linhas, com a aplicação da variação desses parâmetros através de práticas tradicionais ou não-convencionais de melhoria de desempenho das linhas.

1.3 *Organização do Texto*

Este texto foi organizado em oito capítulos. O *Capítulo Um* tem como objetivo expor a motivação desta investigação e traçar resumidamente os aspectos abordados em cada capítulo.

O *Capítulo Dois* considera os aspectos relativos ao fenômeno descarga atmosférica de forma mais pragmática, incluindo os principais parâmetros de interesse para entendimento dos temas considerados na dissertação. Nesse capítulo também são apresentadas descrições dos principais mecanismos de estabelecimento de sobretensões em linhas de transmissão decorrentes de descargas atmosféricas.

Um breve levantamento de características de sistemas computacionais dedicados a linhas de transmissão e seus parâmetros aplicáveis na análise do desempenho da linha de transmissão é realizado no *Capítulo Três*. A abordagem tem a finalidade de arrecadar informações para tratamento de dados e informações que podem ser utilizadas para gerar

metodologias de análise dos efeitos das descargas atmosféricas sobre linhas de transmissão.

O *Capítulo Quatro* propõe uma organização de informações sobre linhas de transmissão em forma de um sistema computacional, com intuito de tratar os dados estruturais dos sistemas de transmissão juntamente com as informações de interesse relativas a atividades atmosféricas e de proteção do sistema. Tal proposta busca uma abordagem mais sistemática sobre os desligamentos de linhas de transmissão, possibilitando a localização de pontos críticos do sistema e o tratamento das possíveis falhas de forma preventiva.

O *Capítulo Cinco* deste trabalho discute as principais técnicas de melhoria do desempenho de sistemas de transmissão contra descargas atmosféricas, descrevendo as técnicas convencionais e não-convencionais e avaliando metodologias em decorrência da tipicidade da linha de transmissão e suas particularidades.

Um estudo de caso prático, para linhas de transmissão é apresentado no *Capítulo Seis*. Tal estudo aplica técnicas de melhoria do desempenho de linhas de transmissão e discute particularidades de cada linha, apresentando resultados de simulação computacional e a análise de sua aplicação para a melhoria do desempenho da linha de transmissão em questão.

As conclusões deste trabalho de análise e as propostas de continuidade para expandir os horizontes do projeto encontram-se no *Capítulo Sete*.

As referências bibliográficas utilizadas na elaboração deste trabalho encontram-se no *Capítulo Oito*, as quais estão organizadas em seqüência alfabética.

2 A Dinâmica do Desligamento da LT por Descarga Atmosférica

2.1 Parâmetros de Interesse em Correntes de Descargas

Para compreensão dos mecanismos de desligamentos de linhas de transmissão devido a descargas atmosféricas, faz-se necessário o conhecimento dos principais parâmetros das ondas de corrente de descarga.

Em poucas palavras, é possível definir a descarga atmosférica como um fenômeno transitório, que ocorre na atmosfera com origem na nuvem de tempestade e que se expressa, em seu estágio final, através do fluxo de uma onda de corrente impulsiva com alta intensidade em um curto intervalo de tempo através de um percurso constituído pelo canal de descarga. Apesar de existirem diferentes variações de descargas atmosféricas nuvem-solo (UMAN, 1987), a de maior interesse no quesito de proteção de linhas de transmissão são as descargas negativas descendentes, que constituem cerca de 90% do total de que atinge o solo, sendo que dentro deste conjunto de descargas estão incluídas as descargas negativas únicas e as múltiplas.

Para efeitos de aplicação em engenharia de proteção vale caracterizar os seguintes parâmetros de interesse nas descargas atmosféricas:

- Valor do primeiro da onda de corrente ou corrente de pico I_{p1} ;
 - Tempo gasto para a onda de corrente sair de zero e atingir o primeiro de pico t_r ;
 - Tempo necessário para o valor de corrente cair até a metade do valor máximo t_m ;
-

- Carga total transferida pela onda de corrente;
- Energia por unidade de resistência da onda de corrente.

Conceitualmente, o valor do tempo de frente é um valor de difícil definição devido à dificuldade de se estipular o início da onda de corrente da descarga atmosférica. Assim, é comum definir-se tempos de frente virtuais, conhecidos como t_{f30} e t_{f10} como mostram as equações a seguir com base nos tempos T_{10} e T_{30} apresentados na figura 2.1.

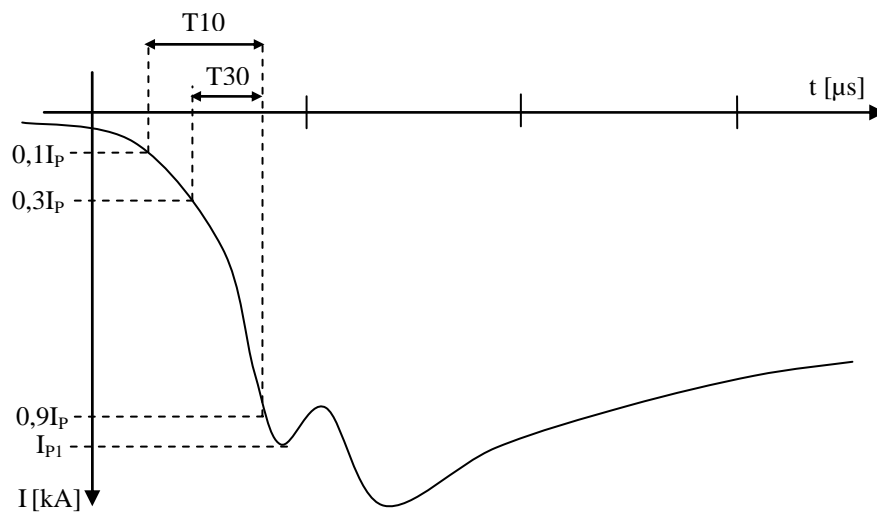


Figura 2.1 – Forma de onda típica adotada para correntes de descarga atmosférica. (adaptada de (SCHOROEDER, 2001)).

Em valores absolutos, devido ao formato tipicamente côncavo da onda de corrente em estágio inicial, t_{f10} usualmente assume valores superiores a t_{f30} , sendo este último muito adotado em abordagens mais conservadoras.

$$t_{f10} = \frac{T_{10}}{0,8} \quad (2.1)$$

$$t_{f30} = \frac{T_{30}}{0,6} \quad (2.2)$$

A literatura mostra que os parâmetros de uma descarga atmosférica sofrem grandes variações regionais, sendo que estas variações devem ser levadas em conta para um projeto de proteção mais coerente. Comparando na Tabela 2.1 a seguir, a massa de dados de Berger realizadas no Monte San Salvatore (Suíça) com os coletados na Estação do Morro do Cachimbo (Brasil), observa-se que os valores medianos do valor de pico, a carga e a integral do quadrado da onda coletados no Brasil apresentam valores mais elevados, sugerindo a maior severidade do fenômeno nas condições

regionais brasileiras.

Valores Medianos	Primeira descarga de Retorno		Descargas Subseqüentes	
	Morro do Cachimbo	San Salvatore	Morro do Cachimbo	San Salvatore
I_{P1} [kA]	45,3	31,1	16,3	11,8
t_{f10} [μ s]	5,6	4,5	0,7	0,6
t_{f30} [μ s]	2,9	2,3	0,4	0,4
t_m [μ s]	53,5	75	16,4	32
Carga [C]	5,2	4,5	0,99	0,95
Energia [$10^3 A^2 s$]	107	55	6,3	6

Tabela 2.1 – Valores medianos para os parâmetros de Correntes de Descargas Atmosféricas (adaptado de (VISACRO, 2004b)).

Além dos parâmetros citados, merece um comentário a forma de onda da descarga utilizada no estudo de desligamentos de linhas de transmissão por descargas atmosféricas. Nas medições de corrente de descarga efetuadas a onda de corrente apresenta sua frente côncava, diferentemente da onda dupla exponencial que é utilizada na maioria dos ensaios e simulações. A diferença entre as ondas dupla exponencial, triangular e côncava, esta última proposta por Portela (1983), é mostrada na figura 2.2 a seguir.

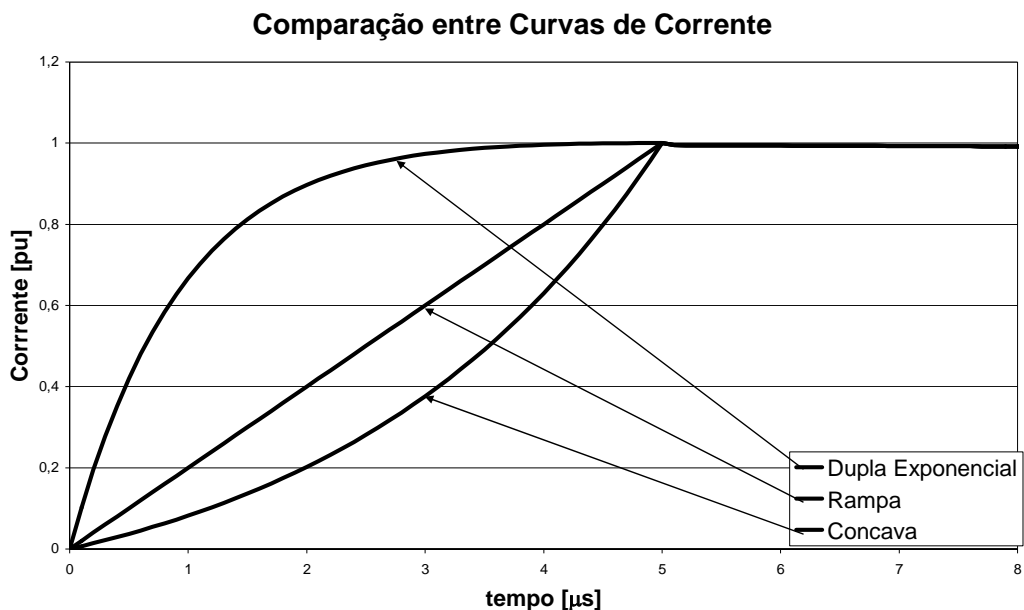


Figura 2.2 – Gráfico comparativo das ondas dupla exponencial, triangular e côncava (adaptada de (SOARES Jr, 2005)).

Um estudo de comparativo realizado por Soares Jr. (2005), entre os resultados obtidos por simulação com cada uma das curvas, mostra que a amplitude da sobretensão resultante da

incidência de uma descarga no condutor de blindagem de uma linha de transmissão depende muito da forma de onda utilizada. Assim, a escolha de uma forma de onda não representativa pode influenciar o resultado.

2.2 Mecanismos de Desligamento de Linhas de Transmissão

Conhecer a dinâmica que envolve os desligamentos das linhas de transmissão por descargas atmosféricas permite identificar as ações mais eficazes para melhoria do desempenho das linhas de transmissão. Os índices que expressam o desempenho da linha de transmissão em termos da qualidade de energia entregue as cargas consumidoras levam em conta o tempo de duração e o número de desligamentos de cada linha de transmissão. Considerando o fato que 70% dos desligamentos não programados são referentes a descargas atmosféricas (CEMIG, 1993), o estudo deste fenômeno se fez necessário para a definição de práticas consistentes, capazes de contribuir na melhoria dos índices de desempenho das linhas de transmissão.

De acordo com a classe de tensão da linha de transmissão, são definidos limites aceitáveis de número de desligamentos em função da extensão da linha. A tabela 2.2 a seguir apresenta valores praticados por concessionárias de energia brasileiras em função do valor de tensão de operação e do NBI (valor mínimo de sobretensão que não provoca desligamento em 90% dos casos). Muitas vezes, fatores como a alta resistividade do solo e o alto índice de incidência de descargas, dificultam a manutenção do bom desempenho de linhas de transmissão, sendo que em certas situações é difícil obter bons índices de desempenho apenas com metodologias tradicionais, sendo algumas vezes necessário o emprego de metodologias mais elaboradas.

Nível de tensão de operação da linha	Valor mínimo da Tensão Suportável ao Impulso TSI(kV)	Valor usual de TSI ou NBI (kV)	Número máximo de desligamentos (d/100 km/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 2.2 – Níveis de Isolamento por classe de tensão apresentando valores de sobretensão e índices máximos de desligamentos (adaptada de (VISACRO, 2002b)).

Descargas atmosféricas são capazes de causar o desligamento de linhas de transmissão através da

incidência indireta (incidência próxima à linha) ou através da incidência direta nos condutores da linha de transmissão.

As tensões induzidas (*lightning induced voltages*) provocadas pela incidência próxima à linha, são fenômenos mais frequentes que, entretanto, provocam amplitudes de sobretensão relativamente reduzidas nos condutores da linha (valores máximos situam-se por volta de 300 kV, (VISACRO, 2002b)). Estes valores de sobretensões são inferiores aos valores de NBI das linhas de transmissão apresentados na tabela 2.2. Desta forma, as sobretensões relacionadas à incidência indireta são importantes para sistemas de média e baixa tensão, como redes de distribuição de energia.

O mecanismo de estabelecimento de sobretensões em linhas de transmissão por incidência direta nos condutores energizados é conhecido como *flashover*. Quando há incidência nos condutores de blindagem, o rompimento do isolamento pode ocorrer na cadeia de isoladores após a reflexão da onda de corrente no sistema de aterramento, segundo mecanismo conhecido como *backflashover*. No caso de incidência nos cabos de blindagem a meio de vão, caso o vão seja muito extenso, pode ocorrer ruptura no ar entre os cabos de blindagem e fase. Apesar de menos frequentes, as consequências de uma incidência direta são altamente severas, podendo promover o desligamento de linhas de transmissão de alta tensão.

2.2.1 Incidência Indireta

A sobretensão provocada por incidência indireta, também conhecida como tensão induzida, é provocada pelo campo eletromagnético que ilumina a linha que transmite energia quando uma descarga atmosférica incide nas proximidades do seu percurso (figura 2.3). Nestas linhas de transmissão, também associada à onda de tensão induzida, existe uma onda de corrente que trafega pelos condutores da linha. A tensão induzida é, na realidade, a solução do cálculo da integral do campo elétrico entre os condutores e o solo.

Dois principais fatores podem influenciar na amplitude da tensão induzida por correntes de descargas atmosféricas. O primeiro é a característica da onda de corrente, em especial o tempo de frente e o valor de pico, e o outro a distância do ponto de incidência a linha de transmissão. A forma como corrente de descarga que flui pelo canal ionizado se distribui ao longo do canal é uma função de diferentes fatores, como a tortuosidade do canal, as condições do terreno entre outros aspectos dinâmicos.

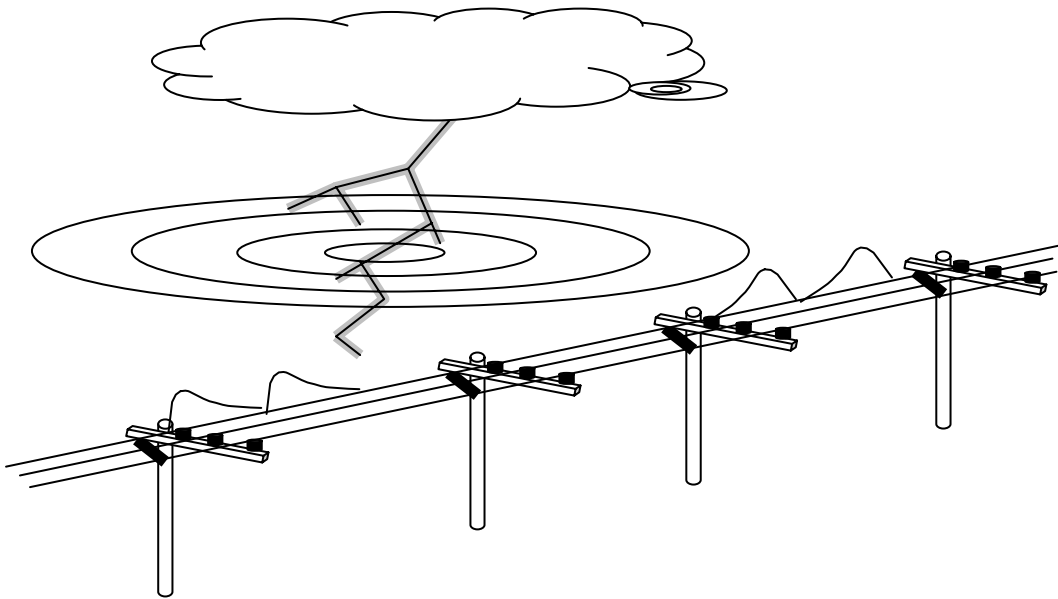


Figura 2.3 - Representação de uma linha sendo iluminada pelo campo eletromagnético gerado por descarga atmosférica.

É conhecido o fato de que apenas a presença de cargas ao longo do canal já é capaz de gerar campo elétrico estático. Com o início do fluxo de cargas durante a descarga do canal, temos uma corrente associada e, conseqüentemente, um campo magnético em conjunto com o campo elétrico. Como a variação de corrente ao longo do canal é acentuada, este fenômeno gera a irradiação de campo eletromagnético e a superposição destes fenômenos é responsável pela tensão induzida. Em muitos modelos, utiliza-se a aproximação do canal por vários dipolos de Hertz para o cálculo de campos associados às correntes de descarga (MASTER, 1983).

Quando o campo gerado pela corrente de retorno ilumina a linha de transmissão estabelece-se nos pontos iluminados uma onda de tensão associada ao campo eletromagnético incidente, que se propaga ao longo da linha com uma corrente associada. É conhecido na literatura (VISACRO, 2002b) que a onda de tensão induzida por descarga atmosférica possui o tempo de crescimento de sua frente diretamente relacionado ao tempo de crescimento da onda de corrente de retorno da descarga atmosférica, sendo praticamente diretamente proporcional ao valor de pico da corrente e aproximadamente inversamente proporcional tempo de frente. Após a passagem pelo valor de pico da corrente de retorno, o valor da tensão induzida decresce rapidamente, se anulando após um curto intervalo de tempo, evidenciando a grande influência do campo eletromagnético gerado durante o intervalo do tempo de frente da corrente. Após o tempo de pico, o valor da variação da corrente decresce substancialmente se comparado com os instantes iniciais da descarga, e a tensão induzida tende a se anular.

Além dos fatores relativos à corrente de descarga, parâmetros como a altura da linha e a disposição dos condutores são capazes de influenciar o valor da onda de tensão induzida (SILVEIRA, 2001), sendo a altura da linha o parâmetro de maior influência, pois este afeta diretamente a superfície de integração do campo elétrico entre a linha e o solo. A onda de tensão induzida ao chegar a uma estrutura aterrada (poste ou torre) pode ser capaz de provocar o rompimento dos isoladores e gerar um curto-circuito. Principalmente em linhas de média e baixa tensão onde os níveis de isolamento são menores.

2.2.2 Incidência Direta

2.2.2.1 O Flashover

Também conhecida como Descarga Disruptiva no Isolamento, o *Flashover* é o mecanismo de falha no isolamento que pode ser associado à incidência de uma descarga atmosférica em um condutor energizado da linha de transmissão (figura 2.4). Este tipo de incidência pode ocorrer na situação em que a linha de transmissão não possui cabos de blindagem ou devido à falha no sistema de blindagem.

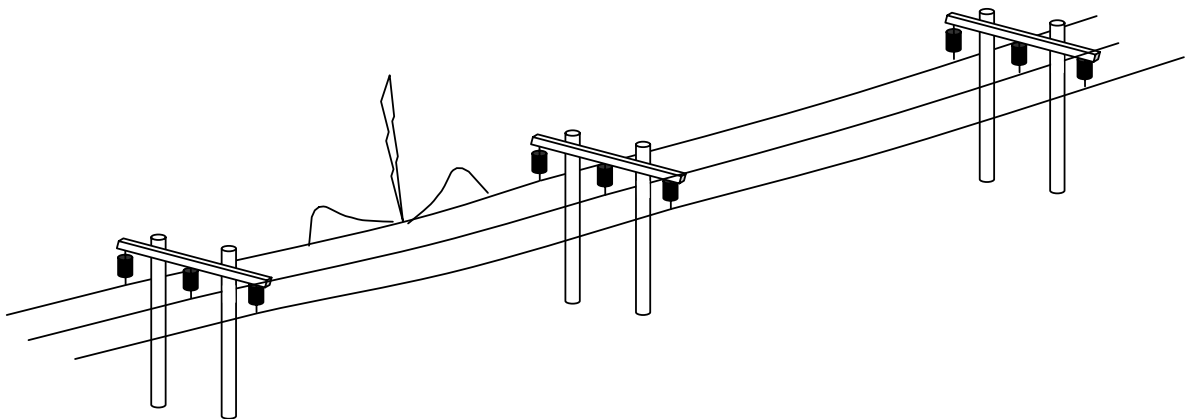


Figura 2.4 - Linha trifásica, sem cabos de blindagem sendo atingida diretamente por uma descarga.

Usualmente, a falha do sistema de blindagem ocorre em situações em que a amplitude da corrente de descarga é muito reduzida, sendo esta capaz de penetrar na área protegida atingindo os condutores energizados.

A linha de transmissão pode ser modelada pela sua impedância de onda a partir de seus parâmetros por unidade de comprimento, sendo eles a resistência (R) e a indutância (L) série, e a condutância (G) e a capacitância (C) paralela, como sendo:

$$Z_L = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (2.3)$$

Sendo ω o valor da frequência angular e j a unidade complexa. Para situações de propagação de ondas impulsivas rápidas ou de alta frequência em linhas de transmissão, o valor da impedância de onda tende para o valor da impedância de surto da linha, sendo a esta calculada como a raiz quadrada do quociente entre indutância (L) e capacitância (C) da linha ($Z_s = [L/C]^{1/2}$) (VISACRO, 2002b).

Nestas situações de incidência de descarga tem-se o estabelecimento de elevados níveis de sobretensões entre os condutores energizados da linha e a terra. A amplitude da onda de sobretensão associada à incidência direta pode ser calculada basicamente pelo resultado do produto entre a amplitude da onda de corrente que trafega na linha pelo valor da impedância de surto desta.

Considerando um valor de pico mediano para a corrente de descarga negativa única no valor de 45 kA (VISACRO, 2004b) e se esta descarga atingir o condutor energizado no meio do vão de uma linha de transmissão, tem-se que aproximadamente metade do valor (22,5 kA) de amplitude da onda de corrente trafegará em cada sentido da linha. Admitindo que a linha de transmissão possua um valor de impedância de surto de 300 Ω encontra-se o valor de 6,75 MV para a amplitude da onda de tensão que trafegará em cada sentido da linha de transmissão. A onda de tensão associada a corrente de descarga, que atinge diretamente o condutor energizado da linha, trafega ao longo desta até encontrar a primeira estrutura aterrada submetendo o isolador da linha a um elevado valor de sobretensão.

Na maioria dos casos, o valor de sobretensão ao qual é submetido o isolador é suficiente para causar o rompimento do isolamento da linha de transmissão e para estabelecer um arco elétrico que liga o condutor energizado à estrutura aterrada. Este arco geralmente possui caráter superficial, através do ar circunvizinho ao isolador, e em alguns casos possui caráter volumétrico, danificando o isolador.

A corrente proveniente da descarga atmosférica flui rapidamente em direção a terra pelo arco elétrico formado entre o condutor energizado e a estrutura aterrada. Em muitos casos o arco pode se manter sustentado pela própria tensão de operação da linha de transmissão, pois, uma vez estabelecido o arco elétrico, não é necessário um valor de tensão elevado para sustentá-lo (VISACRO, 2006c).

A sustentação do arco pelo sistema configura um curto-circuito entre os condutores energizados e a terra. Devido à quantidade de potência disponível no sistema tem-se que, uma falta deste tipo, com circulação de corrente de baixa frequência dos condutores energizados para a terra, pode ser muito destrutiva para o sistema. Nesta situação, o sistema de proteção é sensibilizado por este fluxo de corrente, comandando o desligamento da linha de transmissão.

A metodologia mais aplicada na proteção contra o *flashover* é a instalação de cabos de blindagem sobre os condutores energizados. Também conhecidos como cabos pára-raios, ou cabos terra, os cabos de blindagem são diretamente ligados às estruturas aterradas ao solo através dos sistemas de aterramento. A utilização destes cabos é muito comum em linhas de tensão de operação superior a 69 kV, embora sua aplicação dependa da filosofia de proteção adotada pelas concessionárias de energia. Mas apesar de ser uma prática de proteção muito usual, ela por si só não é capaz de eliminar a falha. Em certas situações as descargas atmosféricas de baixa amplitude de corrente são capazes de vazar blindagem. Há ainda outros mecanismos capazes de levar à ruptura do isolamento mesmo com a existência de condutores de blindagem sobre a linha.

2.2.2.2 O *Backflashover*

Os condutores de blindagem são posicionados estrategicamente sobre os condutores fase com o objetivo evitar a incidência direta de descargas atmosféricas nos condutores energizados, prevenindo da Descarga Disruptiva no Isolamento (*Flashover*). Entretanto, mesmo com esta proteção existe ainda a possibilidade de ocorrer falha no isolamento quando uma descarga atmosférica incide no condutor de blindagem. Este diferente mecanismo é conhecido como Descarga Disruptiva de Retorno, ou *Backflashover*.

Ao incidir sobre o condutor de blindagem, sendo no meio de vão ou diretamente na estrutura aterrada (torres metálicas ou postes equipados com condutores de decida), como mostra a figura 2.5. A onda corrente proveniente da descarga atmosférica propaga-se nos condutores de blindagem, buscando descarregar-se no solo através das diversas estruturas aterradas. Associada a esta corrente propaga também uma onda de tensão cuja amplitude é dada aproximadamente pelo produto entre a amplitude da onda de corrente e a impedância de surto da linha.

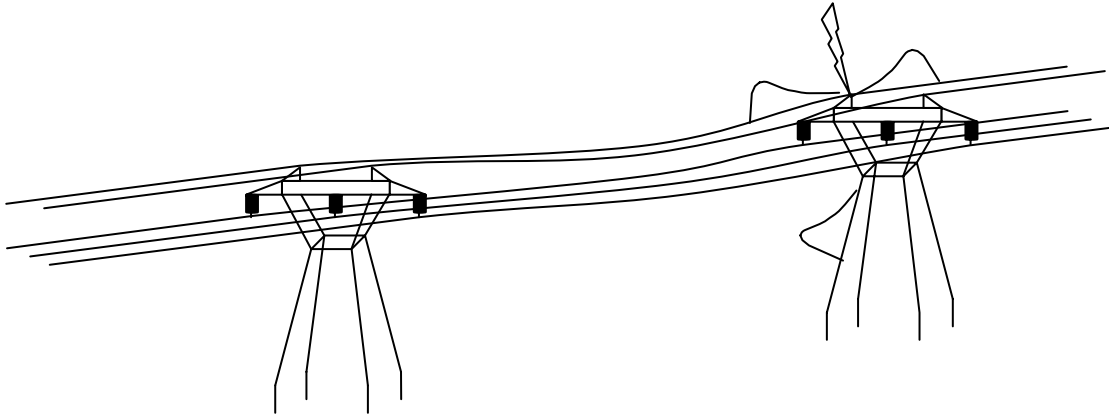


Figura 2.5 – Linha de transmissão trifásica sendo atingida em seus condutores de blindagem por uma descarga atmosférica.

Adotando-se a simplificação de modelar a torre e o aterramento por suas respectivas impedâncias de surto, e que existe um tempo de trânsito para a propagação desta onda (SOARES Jr, 2005b), tem-se que a onda viajante de corrente, ao atingir a primeira estrutura aterrada, dividi-se em duas parcelas, sendo que grande parte da corrente flui pela estrutura aterrada em direção ao solo e o restante continua viajando pelos condutores de blindagem. Em conjunto com a onda de corrente, flui também uma onda de tensão associada pela estrutura aterrada, que em geral possui uma impedância de onda superior à impedância do aterramento. Em ato contínuo, a onda de tensão atinge o aterramento onde sofre uma reflexão, e a amplitude da onda de tensão refletida depende fortemente da relação entre a impedância de onda da torre e do aterramento conforme a equação 2.4 (adaptada de (PORTELA, 1983)).

$$\Gamma = \frac{Z_G - Z_T}{Z_G + Z_T} \quad (2.4)$$

$$V_R = \Gamma \cdot V_I \quad (2.5)$$

Onde Γ representa o coeficiente de reflexão da onda de tensão, Z_G e Z_T as impedâncias de surto do aterramento e da torre respectivamente, e V_R e V_I , respectivamente, as amplitudes das ondas refletidas e incidentes.

Em continuidade, a onda de tensão refletida chega ao topo da estrutura aterrada estabelecendo o valor final de sobretensão, que é imposto entre a estrutura aterrada e os condutores energizados. Para melhor visualizar a situação, ao adotar estilização da corrente de descarga por uma onda triangular, com tempo de frente de $1,2 \mu\text{s}$ e um tempo de meia onda de $50 \mu\text{s}$ e obtém-se o gráfico da figura 2.6 a seguir.

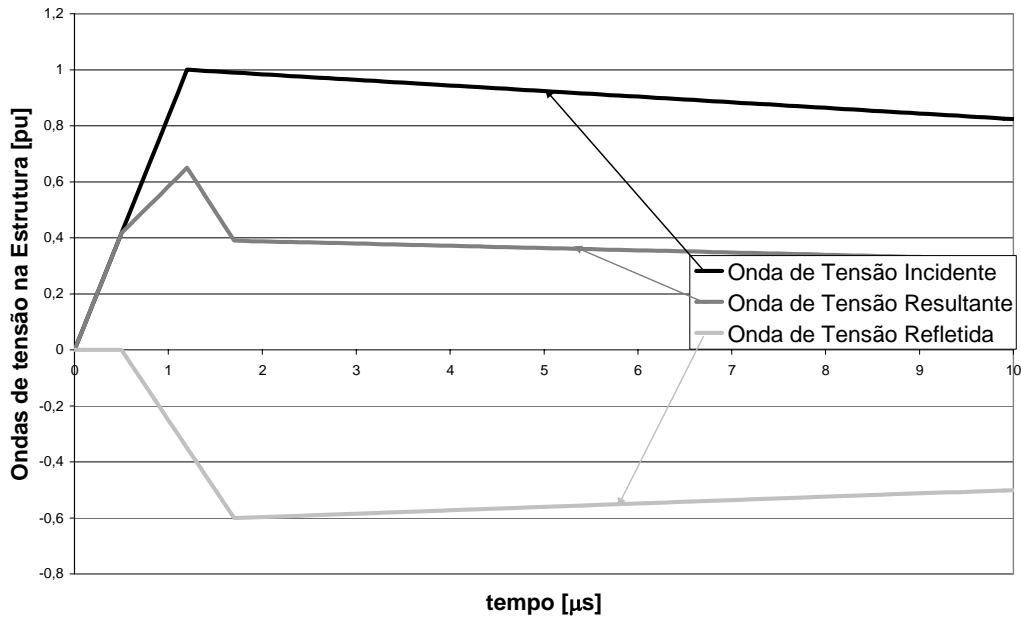


Figura 2.6 – Representação estilizada da onda de tensão que atinge a cadeia de isoladores. (Adaptada de (SOARES Jr, 1996)).

É claro que este efeito da onda refletida na base da estrutura aterrada é apenas o mais significativo das diversas reflexões que podem ocorrer nas estruturas adjacente, nos diferentes cabos de blindagem e nos eletrodos dos condutores de aterramento. Para prática de proteção, o fenômeno de maior interesse é a sobretensão resultante sobre a cadeia de isoladores, onde pode-se observar que o valor da impedância de aterramento possui grande influência no resultado final da sobretensão estabelecida nos terminais da cadeia de isoladores.

Diferentes filosofias de proteção podem ser adotadas para a proteção contra a Descarga Disruptiva de Retorno, sendo que muitas destas práticas são detalhadas no capítulo 5 deste texto.

2.2.2.3 Ruptura a Meio de Vão

Completando o quadro sobre os mecanismos de desligamento, tem-se a solicitação por ruptura a meio de vão. Este mecanismo, em geral, ocorre em linhas que possuem vãos muito extensos entre torres e ocorre incidência de descarga atmosférica nos condutores de blindagem a meio de vão. A sobretensão ali gerada entre o condutor de blindagem e o condutor energizado pode ser da ordem de três a quatro vezes superior à sobretensão resultante na cadeia de isoladores no caso de incidência na torre.

Devido ao comprimento do vão, a onda de tensão refletida nos aterramentos das estruturas

aterradas limítrofes do vão, que na Descarga Disruptiva de Retorno (*backflashover*) é responsável pela redução no valor da amplitude da sobretensão, pode levar um tempo superior ou da ordem do tempo de frente para retornar ao ponto de incidência (VISACRO, 2007b). Nesta situação a onda de sobretensão pode alcançar o valor de pico antes do efeito da onda negativa, estabelecendo uma grande solitação até mesmo para correntes de descarga com amplitudes moderadas.

Neste caso, o valor de sobretensão associado é basicamente o produto da impedância de surto pela metade da corrente de descarga (considerando que metade da corrente se propaga em cada sentido do condutor). Assim, o valor de sobretensão já é capaz de provocar a ruptura do isolamento de ar que separa o condutor de blindagem do condutor energizado.

Exemplificando, supondo que a onda de corrente possui um tempo de frente de $2 \mu\text{s}$ e trafega à velocidade da luz ($300 \times 10^6 \text{ m/s}$), tem-se que em um vão de 600m que sofre incidência exatamente no centro, a onda de tensão associada à corrente é capaz de atingir o valor máximo antes da onda refletida negativa retornar ao ponto de incidência.

Em uma situação como esta, o valor da impedância de aterramento pouco influencia no valor máximo de sobretensão estabelecida. Porém este tipo particular de mecanismo é mais comum para linhas de mais alta tensão, que usualmente possuem torres mais elevadas e vãos maiores ou em linhas instaladas em relevos montanhosos onde são fixadas torres em alto de colinas e longos vãos são configurados. A única medida para evitar tal mecanismo é a manipulação de uma distância satisfatória entre a fase e o condutor de blindagem.

3 Sistema de Informações para Linhas de Transmissão

3.1 *Introdução*

Dentro de qualquer sistema de grande complexidade, a organização é um requisito básico para manutenção e, em um foco mais específico, para proteção e operação. Além da organização, o tratamento sistêmico das informações é um quesito básico para o sucesso frente qualquer imprevisto.

Diante do exposto, o foco deste capítulo é apresentar e analisar as informações estratégicas, métodos e ferramentas dos Sistemas Elétricos de Transmissão para compor um sistema de informação (SI) para desempenho de LT's frente a Descargas Atmosféricas.

Segundo Fonseca (2004), os SI's surgiram no Canadá, e reuniam informações referentes a banco de dados com processamento para *plotagem* e análise, e a maioria era baseada em informações de ordem econômica ou de geoprocessamento. A topologia e as funcionalidades dos SI's são definidas pelas suas características. A figura 3.1 a seguir apresenta uma estrutura básica de um sistema de informações adaptado para organização de sistemas de energia elétrica.

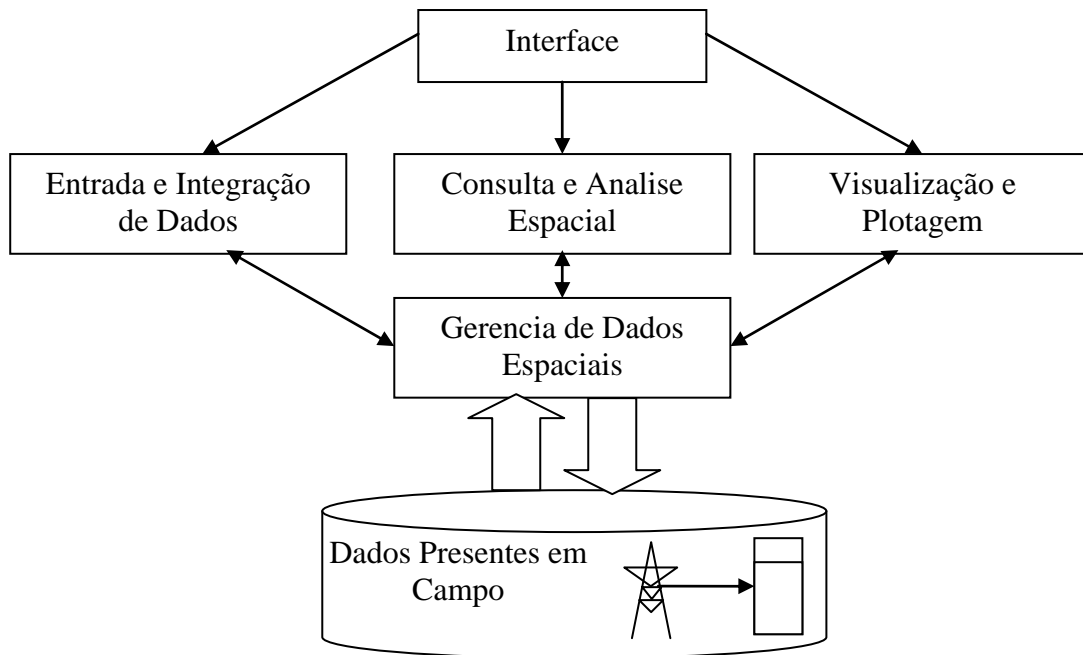


Figura 3.1 – Estrutura de um Sistema de Informação adaptado para Sistemas Elétricos (adaptado de (FONSECA, 2004)).

Um sistema de informações referente a desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas deve possuir a seguinte estrutura mínima:

- Interface com o usuário – sendo que esta interface pode ser de acesso local ou remoto;
- Entrada e Integração de Dados – bloco que efetua operações de edição e inserção;
- Consulta e Análise Espacial – setor que promove o acesso aos dados contidos;
- Visualização e *Plotagem* – apresentação dos dados na formas de informações;
- Armazenamento e Recuperação de Dados – gerenciador que organiza os dados em estrutura de banco e forneça o acesso aos demais blocos do sistema.

É possível observar pela hierarquia que o nível de acesso passa de uma camada na interface homem-máquina, por uma camada intermediária de tratamento até o nível mais interno de armazenamento e gerência que é exclusivo da máquina. Tal modelo é uma adaptação organizacional referente aos sistemas de transmissão.

Observando as características de diferentes sistemas computacionais propostos dentro do universo relativo aos sistemas de energia elétrica, são encontrados vários softwares como diferenciados a seguir:

- Sistemas para gerenciamento de proteção, incluindo softwares específicos para análise de faltas em sistemas de transmissão (ABREU, 2005) e de distribuição (VALADÃO, 2005) fundamentados em diferentes filosofias e algoritmos;
- Sistemas de gerenciamento da operação, sendo a grande maioria focada em projeto e/ou planejamento de linhas de transmissão (SILVA, 2005), dotados de simuladores computacionais e técnicas de previsão;
- Sistemas de automação e comunicação, voltados para o controle supervisorio, transmissão de dados e monitoramento, sejam estes de modo local ou remoto;

Além da gama previamente citados existe também um grande conjunto de ferramentas computacionais para diferentes finalidades como simulação de efeitos transitórios (VISACRO, 2005a; DOMEL, 1969), projetos de linhas de transmissão (BATES, 1989), e diferentes otimizações de funcionamento.

Em um estudo de análise das causas de impactos e falhas realizados em 162 casos de linhas de transmissão reportados pelo Conselho Norte Americano de Confiabilidade Elétrica (NERC – North American Electric Reliability Council) apresentado por Xie (2002), foi observado que as intempéries (atividades elétricas na atmosfera), as faltas não previstas nos sistemas e as falhas de equipamentos são as três causas mais comuns de perturbações no sistema elétrico, sendo as duas primeiras com 25,31% e a terceira com 20,99% das ocorrências, mostrando, com base em fatos materiais, a importância dos fenômenos atmosféricos e do monitoramento de equipamentos no desempenho de linhas de transmissão.

No estudo referido anteriormente, os autores também denotam a importância de fundir e consolidar a massa de informações referentes aos sistemas de transmissão e apresentam vários gargalos referentes às falhas de comunicação entre os diferentes sistemas computacionais de gerência de sistemas de transmissão. No texto desta dissertação serão discutidas as relevâncias das informações de cada sistema de forma característica a fim de absorver o essencial para organizar uma estrutura para a composição de um projeto de um software, com características um sistema de informações, com objetivo de contribuir no desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas.

3.2 Características de Sistemas Computacionais Aplicados a Sistemas de Transmissão

Apesar do incalculável número de contribuições em soluções para proteção de sistemas elétricos, o texto desta dissertação, devido foco em proteção contra descargas atmosféricas, procura se ater ao fundamento do software e sua contribuição com o sistema elétrico, sendo a duas principais contribuições, que são os localizadores de faltas e o sistema de detecção e localização de raios.

3.2.1 Localizadores de Faltas

Os sistemas localizadores de faltas não programadas em sistemas elétricos dividem-se de acordo com o objetivo da rede elétrica protegida. Existindo basicamente os sistemas localizadores de redes de distribuição e os de redes de transmissão.

Atualmente, no setor de localização de falhas no sistema de distribuição, existe uma grande variedade de técnicas computacionais capazes de localizar os referidos distúrbios. Mas de forma mais aplicada, pode-se afirmar que softwares localizadores de faltas em sistemas de distribuição baseiam-se na leitura dos dados amostrados do sistema de distribuição, nos parâmetros elétricos, na topologia e na configuração da rede de distribuição (VALADÃO, 2005).

No conjunto de localizadores aplicados a sistemas de transmissão existem outras dificuldades de práticas de atuação. Inicialmente em linhas de transmissão, que muitas vezes possuem extensões quilométricas, o objetivo é localizar o ponto na sua extensão em que ocorreu a falha. As principais técnicas são baseadas em ondas viajantes (ABREU, 2005), onde a onda de tensão e/ou corrente provocada devido à falha é medida em um ou nos dois terminais da linha de transmissão.

Para uma eficiente localização, o software de localização utiliza-se dos parâmetros da linha de transmissão, obtidos a partir da distribuição física e estrutural dos condutores nas estruturas de sustentação, a topologia geométrica da rede, das impedâncias de cada terminal, modeladas a partir dos equipamentos. Com tais parâmetros, torna-se possível o cálculo por um ou dois terminais pelo método das ondas viajantes.

3.2.2 Sistema de Detecção e Localização de Raios (LLS)

O sistema de detecção e localização de raios possui origem na idéia de efetuar a localização de descargas atmosféricas a partir do campo eletromagnético irradiado gerado pela corrente de retorno do canal de descarga. Para efetuar a localização, o LLS faz uso de sensores estrategicamente posicionados (Estações de Detecção), que são iluminados pela radiação eletromagnética, são capazes de armazenar e enviar as informações para uma central de processamento, onde são correlacionadas e associadas ao mesmo evento. A partir do campo eletromagnético associado a um evento de descarga pode-se estimar qualitativamente alguns parâmetros da descarga.

A localização de descargas permite determinar pontos críticos de incidência de descargas atmosféricas em rotas de linhas de transmissão, como proposto em (VISACRO, 2005b). Para implementação de tal técnica utiliza-se de características geográficas e estruturais da linha de transmissão como altitude, altura e resistência de aterramento das torres, extensão, tensão de operação da linha de transmissão, número de estruturas e respectivos vãos.

A partir de índices de severidade que levam em conta as características de toda a linha e de índices de incidência de descargas obtidos do LLS realiza-se uma análise estatística e classificam-se as torres e os trechos críticos das linhas de transmissão.

3.3 Proposta de Desenvolvimento de um Sistema de Informações de Linhas de Transmissão

Um dos objetivos da proposta de um sistema de informação não consiste somente em manipular informações em simples operações de inserção e visualização. O sistema computacional deve ser capaz de tratar e apresentar as informações de forma mais objetiva e interativa, além de promover consultas e tomadas de decisão. Doravante com a proposta estabelecemos os seguintes quesitos de funcionalidade de acordo com suas particularidades:

- Um sistema elétrico composto por unidades geradoras e LT's apresenta escala dimensional quilométrica, e a utilização de mapas eletrogeográficos é uma forma
-

mais elegante e dinâmica de localizar espacialmente as instalações de linhas de transmissão, hidrelétricas, subestações entre outras.

- As estruturas físicas, como torres de sustentação, aterramentos e disposição dos condutores, possuem características espaciais que são relevantes para o sistema elétrico e podem ser representadas de forma gráfica, melhorando a apresentação e a percepção das informações.
- Capacidade de correlacionar informações referentes com a atividade elétrica da atmosfera, as faltas não previstas e as falhas nos equipamentos, o que pode incluir a identificação de pontos críticos no sistema elétrico.
- O armazenamento das informações de forma criptografada, por algoritmos que permitam a segurança durante o armazenamento e compartilhamento das informações fora dos domínios do sistema de informação.

A entrada e o tratamento de dados em aplicações que regem diferentes tipos de informação, e permitem uma variada gama de visualizações, é um processo bem mais complexo se comparado com aplicações cuja função o uso direto de rotinas de cálculo e armazenamento de dados alfanuméricos. A complexidade se deve ao fato da entrada e o tratamento dos dados não se limitar a simples operações de inserção e apresentação, assim as dificuldades surgem por duas razões:

Primeiro, por se tratar de informações gráficas, que no caso englobam informações eletrogeográficas e as referentes às estruturas físicas presentes, o que naturalmente já é uma tarefa mais complexa do que a entrada de dados de representação alfanumérica, e dependendo de sua natureza, a informação assume diferentes tipos de representação abstrata.

Segundo, as fontes de entrada de dados precisam gerenciar as diferentes fontes de dados, para evitar que a alimentação do banco de dados seja uma tarefa maçante e dispendiosa, pois é imprevisível a quantidade de fontes de dados que podem existir para os diferentes tipos de informação.

3.3.1 Informações Relevantes à Proteção de Linhas de Transmissão

Inicialmente, é importante definir quais são as informações relevantes a serem armazenadas pela estrutura de um banco de dados, cuja função é organizar e controlar informações. Partindo desta premissa fundamental pode-se, a partir do objetivo proposto, listar quais são as informações de relevância inicial para um sistema de informações sobre Linhas de Transmissão.

Com base na experiência de autores anteriores em trabalhar com linhas de transmissão ((SOARES, Jr 2005b) e (VISACRO, 2005c)) pode-se propor uma hierarquia para o sistema que pode definir uma linha de trabalho para as informações.

Para implementação de um mapa eletrogeográfico seria necessário o conhecimento de toda rota de linha de transmissão, das subestações e usinas existentes. Preferencialmente conhecer as coordenadas geográficas de cada entidade.

Dessa forma cada linha de transmissão poderia ser caracterizada pela suas características descritivas, construtivas, físicas e funcionais listadas e detalhadas a seguir:

- **Detalhes Descritivos da Linha de Transmissão:** essas informações trariam consigo detalhes que caracterizam a linha como tensão de operação, faixa de servidão;
 - **Detalhes Construtivos da Linha de Transmissão:** informações que incluem os tipos de condutores utilizados, os tipos de isoladores, as torres de sustentação, equipamentos auxiliares instalados e as características dos aterramentos;
 - **Características Físicas da Linha de Transmissão:** consiste em manter o modelo tridimensional, e características associadas às torres como a disposição dos condutores, dos aterramentos, das subestações e dos equipamentos;
 - **Características Funcionais da Linha de Transmissão:** manter o histórico de funcionamento da linha com, por exemplo, detalhe de fluxo de carga, data de manutenção de equipamentos, de medições efetuadas, de desligamentos; e histórico de descargas em pontos próximos entre outros.
-

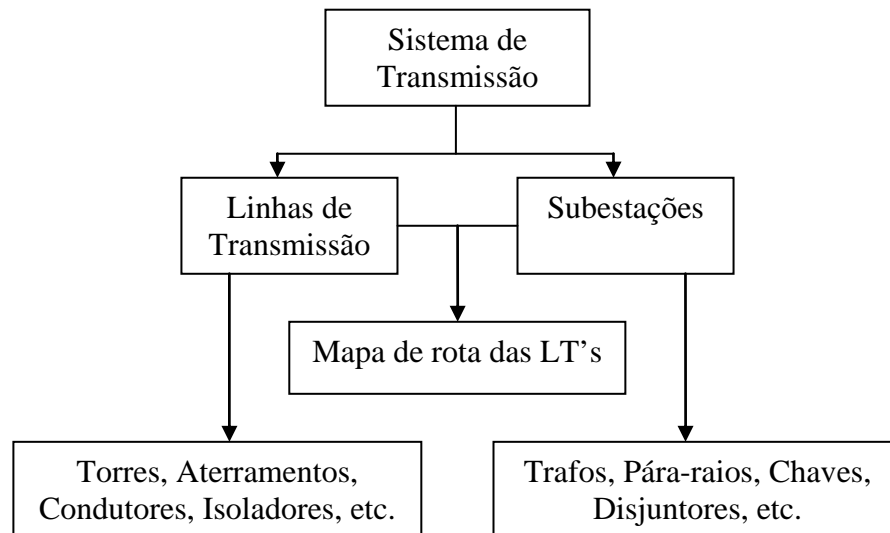


Figura 3.4 - Hierarquia dentro de um Sistema de Transmissão e Energia Elétrica

O conjunto destas informações permite a implementação de diversas funcionalidades para proteção de linhas de transmissão além de gerenciar o conjunto funcional da empresa.

4 Desenvolvimento de um Sistema de Informações para Aplicação no Estudo dos Desligamentos de LT's por Descargas

4.1 Introdução

O crescente aumento da tecnologia e a preocupação em confiabilidade dos sistemas de transmissão de energia elétrica levam cada vez mais todas as empresas a investirem em informação, possibilitando o estudo de seu comportamento, além de prever e marcar seus pontos mais críticos de forma técnica e eficiente. Com objetivo de melhorar desempenho de sistemas de energia elétrica, foi desenvolvida um sistema para organizar as informações pertinentes a um sistema de energia e correlacioná-las a fim obter melhores resultados de desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas.

Batizado como LT-Info, o sistema foi planejado observando todos os detalhes já citados anteriormente, possuindo como seus principais objetivos:

- Organizar de forma sistêmica as informações referentes a um sistema de transmissão de energia elétrica;
 - Apresentar de forma visual os dados referentes ao sistema de transmissão e suas respectivas linhas de transmissão;
 - Armazenar massa de dados referentes à operação e proteção das linhas de transmissão e permitir análise posterior;
-

A linguagem de programação C++, com orientação a objeto, e o ambiente de desenvolvimento *Borland Builder C++®*, com base na VCL (*Visual Component Library*), foram estas as ferramentas utilizadas para o desenvolvimento do LT-Info, com plataforma para o sistema operacional MS-Windows XP®, que em sua primeira versão conta com um sistema restrito para funcionar em uma máquina.

4.2 Arquitetura do Sistema

A arquitetura de um sistema resume-se no conjunto de classes que compõem as camadas de processamento e nas funções envolvidas nas operações do sistema incluindo as políticas de implementação e segurança. Levando em conta que a essência do projeto de um software esta no planejamento e na execução (TAIT, 2000), faz-se necessário a adoção de medidas que visem possibilitar a execução levando em conta as possibilidades de expansão e aprimoramento das ferramentas desenvolvidas.

A arquitetura Documento/Visão (*Document/View Architecture*) (JONES, 1999) proposta pela MFC (*Microsoft Foundation Class*) foi adaptada neste trabalho para a VCL. A referida arquitetura facilita a expansão do software e propicia a divisão de tarefas no escopo do programa. O diagrama a seguir apresenta de forma simplificada o funcionamento desta adaptação na Arquitetura Documento/Visão adaptada para o *framework* da VCL.

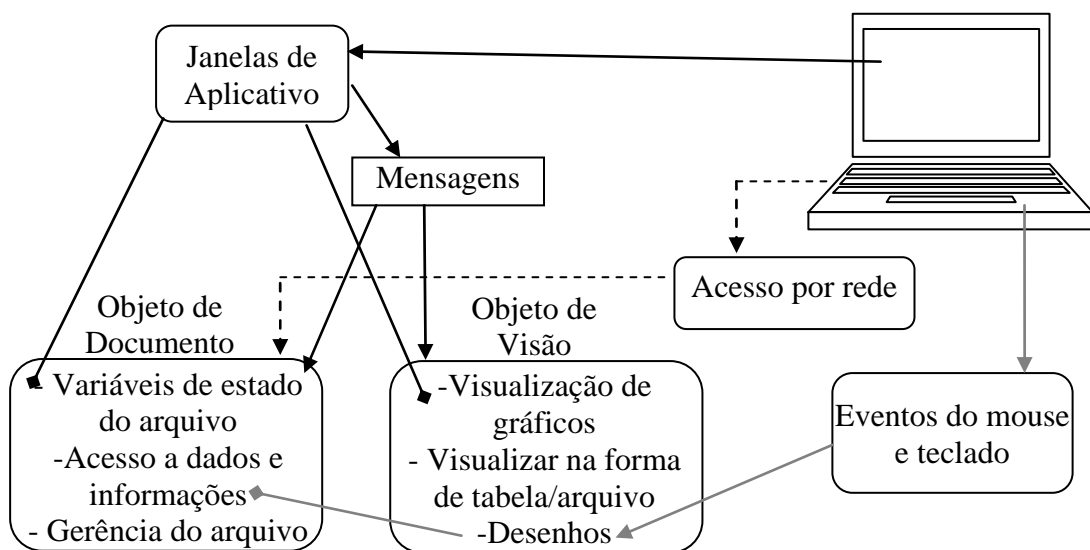


Figura 4.1 - Diagrama da Arquitetura Documento/Visão Adaptada para VCL.

A Arquitetura Documento/Visão apresenta duas classes principais, a Classe de Documento e a Classe de Visão (JONES, 1999). A primeira é responsável pelo armazenamento e controle do arquivo e dados incluindo o gerenciamento das informações e funções referentes ao fluxo de dados. A Classe de Visão fica designada para gerenciar a apresentação dos dados e informações ao usuário em tela, e suas principais rotinas implicam em tratar e apresentar visualmente o conteúdo do documento.

Nesta arquitetura, as janelas de aplicativo e todas as formas de interação do sistema interagem com estas duas classes solicitando suas rotinas no tempo de execução do sistema. Nas próximas seções deste capítulo são descritas algumas políticas da arquitetura utilizada, incluindo o armazenamento, a segurança e a organização das classes.

A partir da arquitetura o próximo passo é definir quais são dados e informações a serem armazenados e suas respectivas visualizações. Para esta etapa foi definida uma hierarquia de informações para sistemas de transmissão, onde cada camada possui certas dependências com os níveis adjacentes. Em paralelo foi definido um Banco de Dados Gerais, onde informações que possuem maior tipicidade são armazenadas na forma de catálogo.

Quanto aos tipos de informações a serem armazenadas, pode-se propor a seguinte gama de informações, em coerência com a estrutura hierárquica de armazenamento e os modelos propostos na seção 3.3.1:

- Localização em coordenadas terrestres de todas as linhas de transmissão e subestações que compõe o sistema de transmissão;
 - Informações estruturais de cada subestação e linha de transmissão, apresentando informações como distribuição física dos condutores, estrutura de sustentação, potencia instalada e utilizada, entre outros;
 - Particularidade de cada torre ou estrutura presente na linha, com o objetivo de identificar pontos críticos e permitir a visualização dos detalhes pertencentes a cada ponto.
-

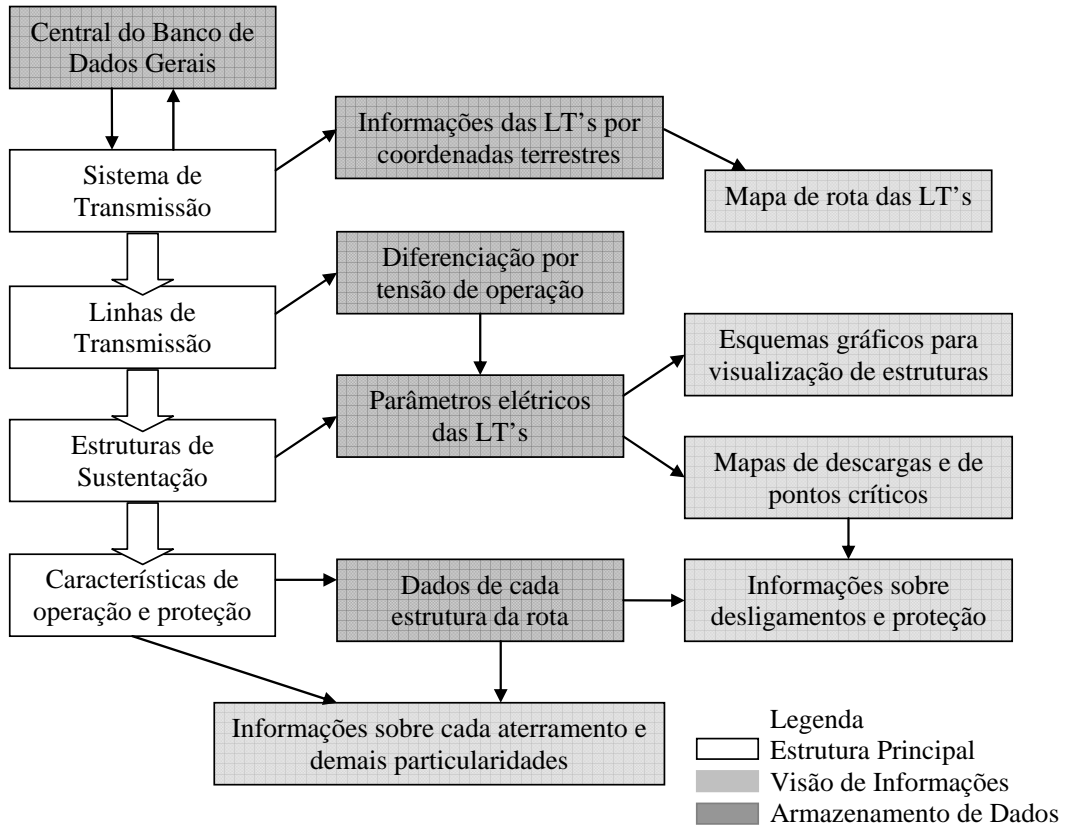


Figura 4.2 – Estrutura organizacional e hierárquica do LT-Info.

4.2.1 Técnicas de Armazenamento de Dados

O LT-Info é baseado em armazenamento referenciado de informações, buscando aumentar a complexidade e reduzir redundância, fato que melhora o desempenho quando é necessário tratar de um volume grande de informações.

A estrutura computacional do LT-Info armazena os dados em dois principais blocos, o Catálogo Geral dos componentes, e o Banco de Dados das Linhas de Transmissão. A Figura 4.3 ajuda a compreender o proposto a seguir:

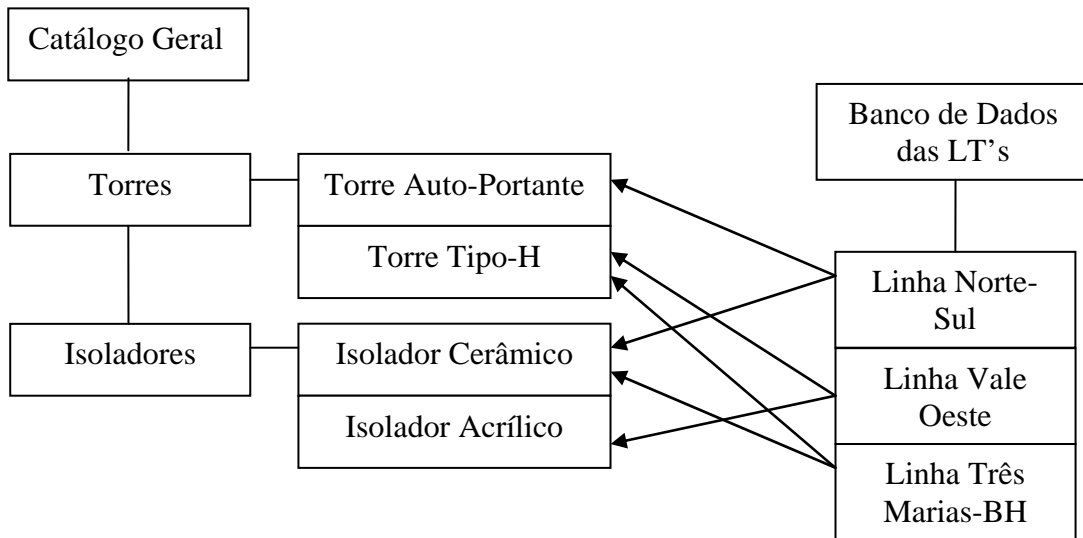


Figura 4.3 - Esquemático de funcionamento dos blocos de armazenamento de dados do LT-Info.

a) Catálogo Geral - Neste bloco, as informações são armazenadas em grande catálogo na forma de listas divididas por categoria. Cada Categoria contém as diferentes informações sobre os componentes físicos das linhas de transmissão e subestações presentes no LT-Info. O Catálogo Geral contém informações detalhadas sobre cada tipo de componente presente nas linhas como, por exemplo, os condutores, torres, isolamentos, transformadores aterramentos, entre outros. Estas informações alimentam o banco de dados de forma mais rápida e interativa.

b) Banco de Dados das Linhas - Neste bloco são definidas as linhas de transmissão presentes no sistema elétrico. Junto com as linhas são definidas as suas características, equipamentos e subestações. O Banco de Dados das Linhas possui muitos de seus dados referenciados no Catálogo Geral, dessa forma algumas informações mais complexas, inseridas para as linhas de transmissão precisam estar previamente definida no catálogo do sistema.

Cada componente do Catálogo Geral será derivado de uma classe base, e possuirá, entre outras propriedades, uma chave única, gerada no momento da criação do objeto. Este número pode ser apenas um número seqüencial que o identifique ou poderá conter várias informações e servir como "chassi" para o objeto.

O número de vínculos, propriedade também de cada componente, é utilizado para controlar as referências do Banco de Dados das LT's. Desta forma quando um objeto do Catálogo Geral for inserido no Banco de Dados das LT's, o objeto recebe um número de referência da Linha de

Transmissão (número identificador desta LT) ao qual esta faz referência. O número identificador da LT é armazenado na tabela do objeto do Catálogo Geral e seu número de vínculos incremento.

Além do Catálogo Geral e do Banco de Dados das LT's um bloco referente às informações geográficas do sistema de transmissão armazena os dados geográficos das linhas de transmissão e mais informações que podem ser geograficamente referenciadas.

4.2.2 Técnicas de Segurança das Informações

A segurança da informação possui o objetivo proteger as informações e viabilizar as aplicações, do ponto de vista estratégico. Um sistema com um bom projeto de segurança tem como argumento evitar a fragilidade e proporcionar confiança aos usuários.

Na interface com o usuário as técnicas de segurança passam despercebidas, e a estratégia de proteção das informações não é nitidamente clara na interface homem-máquina. O desconhecimento das estratégias de segurança também funciona como forma de proteção para as informações.

As principais ameaças contra um sistema complexo de informações computacional é o vazamento das informações, seguido de roubo de senhas, sabotagem eletrônica, roubo de informações e invasões. Para avaliar o risco apresentado pode-se tentar equilibrar em uma balança as ameaças e as defesas, com o intuito de determinar, em linhas gerais, qual o risco apresentado no quesito segurança das informações.

Levando em conta as principais circunstâncias referentes à segurança das informações, este texto apresenta duas formas adotadas para o LT-Info para assegurar robustez e segurança das informações, a interdependência dos dados e criptografia.

A interdependência dos dados aumenta a robustez do sistema, mantendo as informações fortemente presas ao bloco de dados combatendo a fragilidade do ambiente. Por outro lado a criptografia é uma ferramenta poderosa contra vazamento de informações, tanto em transmissão eletrônica quanto em integração entre ambientes.

Outra técnica de segurança, que não está implementada, é o controle de usuários, que permite e restringe privilégios a certos usuários, evitando um acesso ilimitado a qualquer nível de segurança do sistema.

4.2.2.1 Interdependência

A interdependência é uma técnica utilizada em casos que apresentam correspondência de informação em sistemas onde é possível acessar blocos de dados e informações a partir de vários pontos do software. Este tipo de “proteção”, muito utilizada também em ambientes de rede compartilhada, cria uma amarração entre os dados presentes nos diferentes blocos.

A interdependência cria um vínculo de coexistência entre diferentes dados dependentes entre si. No caso do LT-Info, como as informações são armazenadas em blocos diferentes, os dados são interligados por chaves numéricas de controle que só permite exclusão de dados que não possuem dependência. Esta amarração cria um bloco mais homogêneo e robusto, evitando incoerências e perdas indesejadas de informações.

Inicialmente a interdependência foi implementada para controlar o uso dos componentes presentes no catálogo, onde cada componente possui número de vínculos que o objeto possui. Cada vez que o objeto é utilizado na configuração de uma LT o valor do vínculo é acrescido e o número da linha de transmissão é transferido para uma tabela no componente.

4.2.2.2 Criptografia

A criptografia, de forma aplicada a este trabalho, pode ser definida como a técnica reversível de transformação da informação de sua forma original para uma forma ilegível. Os primeiros trabalhos no assunto foram publicados por Shannon (1948), entretanto neste trabalho a técnica de transformação criada foi bem mais simples, pois atende apenas a demanda do programa.

A técnica de criptografia criada foi baseada em uma função bijetora, que utiliza dos valores numéricos dos caracteres (*char*), representados por 8 bits, e condiciona 256 valores entre -128 e 127 incluindo o 0.

Uma propriedade dos valores numéricos representados e ASCII a circulação dos valores, onde em uma operação, caso o resultado ultrapasse os limites, sejam ele máximos ou mínimos, o resultado retorna de forma circular para o intervalo de valores válidos. Por exemplo, se adicionarmos 50 ao caractere que vale 100, o valor obtido será -105, ou seja, $100 + 50 - 255$, isto porque 150 é maior que 128, e o valor do resto é adicionado ao valor mínimo. Tal característica apresenta os múltiplos de 255 como elemento neutro de adição e subtração.

A característica circular permite efetuar deslocamentos inteiros nos valores dos caracteres de forma a obter um novo conjunto, sem significado aparente. Como um deslocamento simples pode ser facilmente descriptografado, foi elaborado um polinômio que produz os deslocamentos baseados na posição do caractere na *string* e em chaves de entrada para cada ordem da posição. Propondo o seguinte polinômio:

$$C_n(i) = C_0 + A_0 + A_1 \cdot i + A_2 \cdot i^2 + \dots + A_k \cdot i^k + \dots + A_n \cdot i^n \quad (4.1)$$

Onde C_0 é o valor original do caractere e n a ordem do polinômio, o valor de i é o índice do caractere no interior da *string* e A_k são os diferentes pesos para cada ordem.

Em um bloco de texto com muitas linhas e colunas, a criptografia somente se torna eficiente se os valores dos pesos A_k também variarem com a linha j . Desta forma, o peso A_k torna-se uma função bijetora de uma variável inteira j que representa o número da linha.

$$A_k = f(j) \quad (4.2)$$

Para o caso deste polinômio de criptografia, a escolha de diferentes pesos e diferentes ordens implica em uma entropia mais elevada.

Um caso especial, que exige um tratamento por parte deste algoritmo é o caractere *'/0'*, que representa a mudança de linha. Se este caractere aparecer, a *string* resultante ficará irre recuperável. A solução para esta singularidade é verificar os valores e tratar o caractere *'/0'*.

4.2.1 Organização de Classes

A organização de classes é um conceito intrínseco da programação orientada a objetos (POO). A modelagem orientada a objetos tem como meta estabelecer o melhor conjunto de objetos que compõe um *software*. O funcionamento deste sistema se dá através dos protocolos e interfaces entre estes objetos. De acordo com a arquitetura, implementa-se um conjunto de classes que definem os objetos, cada classe determina o comportamento (definidos nos métodos) e estados possíveis (atributos) de seus objetos.

Esta seção possui o objetivo de apresentar de forma estruturada os diferentes tipos abstratos de dados presentes na composição do LT-Info. Inicialmente têm-se os tipos de dados definidos em Classes (*class*), Estruturas (*struct*) e Tipos Definidos (*typedef*), sendo eles primários (ou mãe como é utilizado no jargão da programação) ou herdeiros. E para isso surgem duas necessidades de iniciais, primeiro armazenar os dados, e em seguida apresentá-los ao usuário.

Inicialmente são definidas as classes bases, de documento CLTDoc e a classe de visão CLTVis. A classe de documento mantém armazenada os dados referentes ao catálogo geral na classe CCatalogo, o conjunto de mapas na classe CMapas e o conjunto das Linhas de Transmissão na classe CSistema. A classe de visão interage com a classe de documento e mantém armazenadas as variáveis de visualização, interagindo tanto com a classe de mapas quanto com a classe do catálogo geral.

Na estrutura da classe de visão, em relação à organização para apresentação de modelos gráficos e mapas têm-se as estruturas TPONTO2D, TPONTO3D, as classes CLTPonto2D, CLTPonto3D e CCamera e os tipos TRota e TDesenho. Estes conjuntos de dados estão estruturados de forma que as classes CLTPonto2D, CLTPonto3D, que são mais complexas, armazenam coordenadas em duas ou três dimensões respectivamente, e são derivadas das estruturas TPONTO2D, TPONTO3D.

Os tipos TRota e TDesenho são vetores de dados compostos por CLTPonto2D, CLTPonto3D armazenam modelos em duas e três dimensões respectivamente. A classe CCamera armazena a posição do observador nos modelos gráficos que aparecem no sistema, permitindo diferentes ângulos de observação.

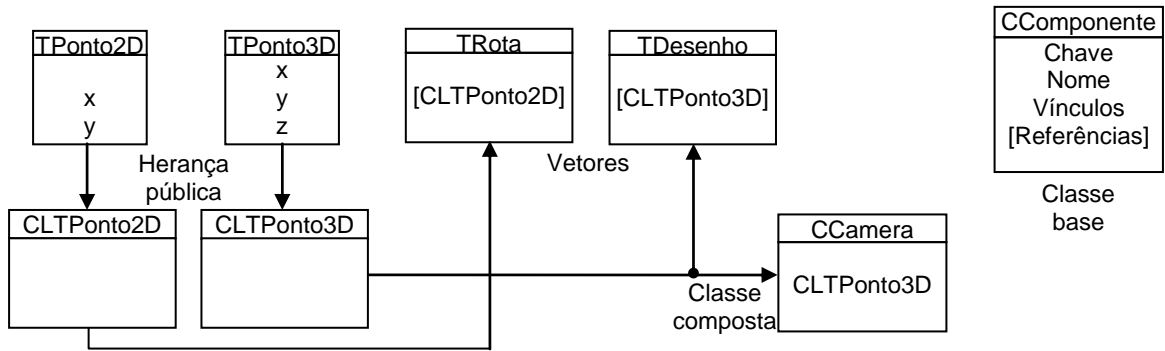


Figura 4.4 – Esquema das principais estruturas de dados utilizadas na classe visão.

Partindo das estruturas de dados supra citadas, tem-se agora a definição classes para abstrair o conjunto de informações referentes ao sistema de transmissão. Devido ao fato dos sistemas elétricos atingirem grandes dimensões, foi definida a visualização na forma de mapa, baseado em coordenadas terrestres, tomando como referência o mapeamento político da região.

Os mapas Eletro-Geográficos apresentam geograficamente a disposição elétrica e estrutural do sistema. Além do mapa Eletro-Geográfico, é possível no LT-Info incluir mapas de densidade de descargas ou de densidade de fluxo de carga. Para tanto, foram criadas três classes de manipulação de mapas, os objetos contorno e ponto, respectivamente abstraídos em CObjetoContorno e CObjetoPonto.

A partir destas classes são definidos os mapas do tipo CMapaVetorial e CMapaMatricial, que armazenam os respectivos mapas. A classe CMapas concatena as informações e as rotinas referentes a manipulação dos diferentes mapas.

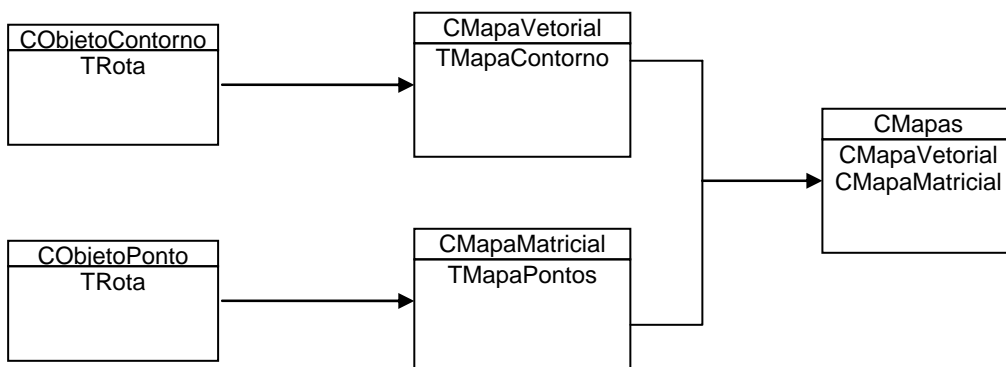


Figura 4.5 – Organização da classe CMapas que trabalha as rotinas de armazenamento de informações geográficas.

No LT-Info a classe CSistema é definido um conjunto das linhas de transmissão associadas, cada linha é representada pela classe CLinha, e detalhada em cada estrutura com conjunto de objetos do tipo CTorre. Devido as suas particularidades, estas classes foram idealizadas sem herança e agregam consigo sua própria complexidade.

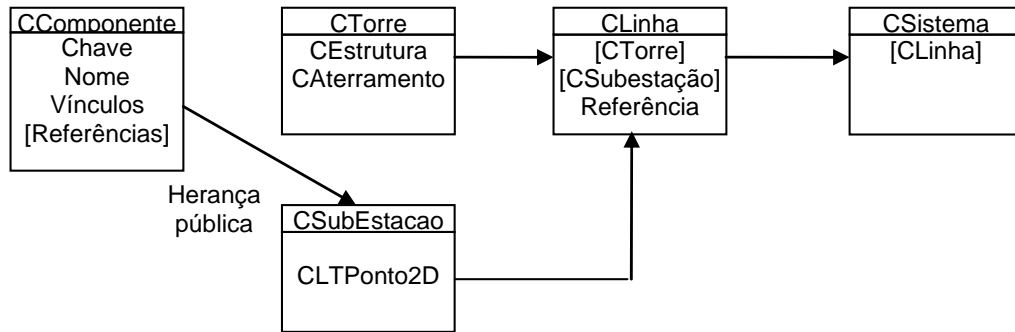


Figura 4.6 – Organograma das classes na composição dos dados das LT's.

A classe base relacionada ao armazenamento de informações para o catalogo geral, denominada como CComponente, trata-se de uma classe simples que armazena uma chave única relacionada ao objeto, o nome pelo qual o objeto é reconhecido no banco de dados, uma tabela de referências que a classe possui.

As informações construtivas referentes às linhas de transmissão, como o valor de tensão nominal de operação, as características do isolamento e o tipo de condutor utilizado na linha de transmissão, são consideradas como únicas ao longo de toda linha de transmissão. Em adição com estas informações têm-se ainda as classes CEstrutura (que armazena os dados referentes à estrutura de sustentação e dos condutores de cada torre), CAterramento (que guarda os dados referentes ao sistema de aterramento adotado por cada torre) e a classe CSubestação (que se refere às subestações presentes no percurso da linha de transmissão).

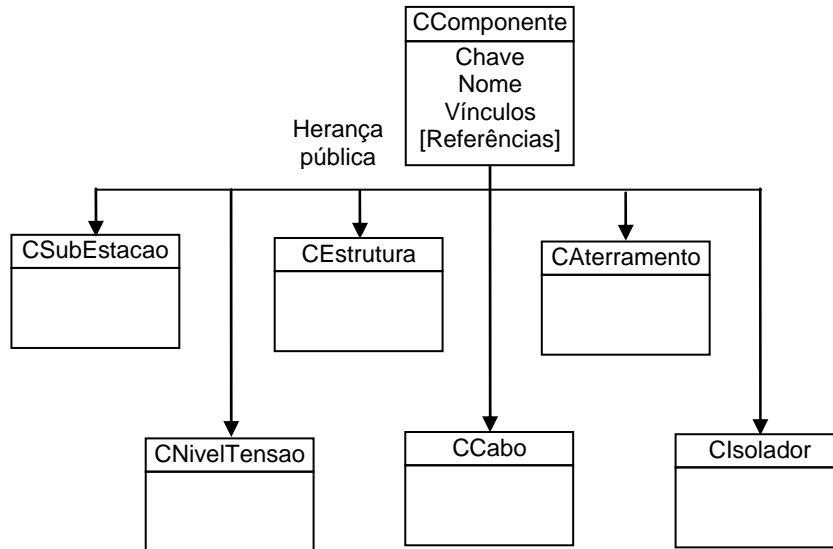


Figura 4.7 – Organograma as classes do Catalogo derivadas de CComponente.

4.3 Organização Funcional do LT-Info

Esta seção do texto se propõe a apresentar sistematicamente o corpo e as funções do LT-Info diretamente na interface do usuário. O Programa busca facilitar o máximo a visualização das informações oferecidas para um sistema de informações e proporcionar uma navegação com pouco esforço.

Em ato contínuo a proposta de um plano de interfaces para uso abrangente da custódia das informações⁴ e das classes anteriormente descritas no texto desta dissertação. O plano para elaboração da interface principal conta com as seguintes propostas:

- Tratamento do arquivo principal. Com funções de criação, carga e salvamento da massa de dados relativos ao sistema elétrico;
- Visualização simplificada para os componentes julgados como principais, sendo eles as Linhas de Transmissão e o Mapa Eletrogeográfico, e suas respectivas funções de custódia;

⁴ Custódia da informação, no contexto de sistemas de informação, consiste em possuir controle sobre as operações básicas de inserção, remoção, visualização e edição das informações.

Além destes requisitos, para uma interface principal, foram relacionadas funcionalidades adicionais para informações elétricas e geográficas, como apresenta a figura 4.8.

A interface principal do LT-Info apresenta uma listagem das linhas de transmissão cadastradas no sistema, e um mapa eletrogeográfico além de outras opções para visualização de mapas.

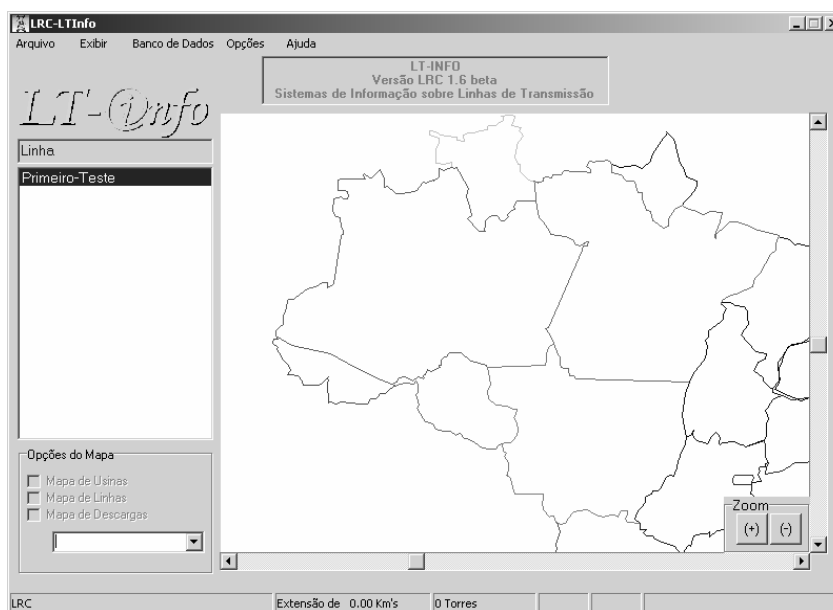


Figura 4.8 - Interface principal do LT-Info.

A partir desta interface é possível acessar o Banco de Dados Gerais (que é o catálogo onde estão registrados todos os componentes do sistema), o banco de Dados das Linhas de Transmissão (onde estão armazenadas as informações pertinentes às Linhas de Transmissão), e a Interface de Edição de Mapas (onde é possível inserir diferentes tipos de informações relacionadas ao espaço geográfico onde estão instaladas as linhas de transmissão).

4.3.1 Processo de Tratamento do Arquivo

O armazenamento mais adequado para grandes quantidades de dados em sistemas computacionais de informação é o armazenamento em um ou mais arquivos em disco rígido. Para o LT-Info, que trabalha com tipos de dados e de tamanhos variados, o armazenamento das informações em disco rígido é uma solução prática para o volume de dados que o sistema pode atingir.

No contexto do LT-Info, um arquivo está sempre associado a um sistema elétrico e a um conjunto de linhas de transmissão com mapas e componentes do sistema. Ao criar um novo arquivo o LT-Info precisa fazer uso de informações pertinentes ao sistema elétrico que o arquivo representa. A Figura 4.9 apresenta a interface de entrada para os dados principais do arquivo.



Figura 4.9 - Entrada das informações principais do arquivo e do Sistema de Energia

Além deste modo de tratamento de um novo arquivo de banco de dados, o LT-Info possui um legado de seu período de desenvolvimento (que por motivos de conveniência para usuários, foi mantido no seu corpo) que é o modo de visualização e modificação direta do arquivo de que armazena o Banco de Dados no modo de texto.

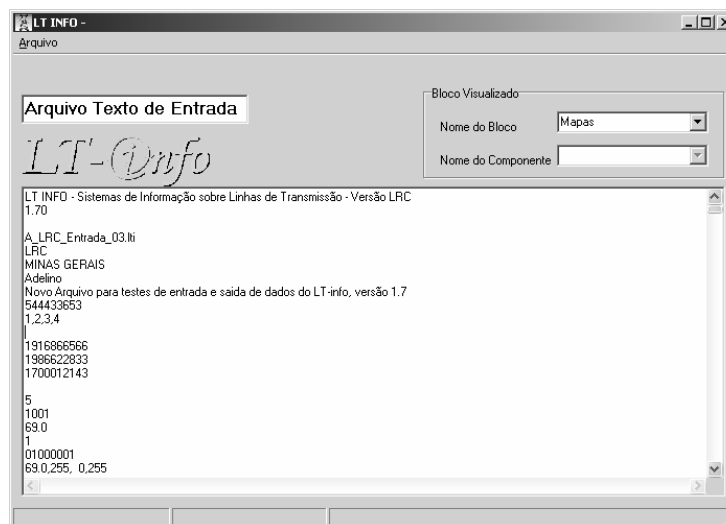


Figura 4.10 - Visualização do Arquivo de Dados do LT-Info em forma de Arquivo Texto.

Inicialmente o recurso fazia sentido para efeitos de depuração, entretanto, tal recurso pode criar uma fragilidade nos dados do sistema, pois qualquer usuário poderia copiá-lo para um arquivo não criptografado.

A solução adotada que permanece para esta versão é a visualização por partes, como mostra a figura 4.10, com informações semi-completas dos blocos de texto, excluído as chaves de parametrização de controle interno do sistema.

4.3.2 Acesso ao Banco de Dados Geral

O banco de dados gerais do LT-Info é acessado por uma interface de multi-telas, permitindo efetuar as operações de custódia para cada tipo de componente do sistema.

Inicialmente o usuário se depara com a inserção de cinco componentes como Tensões de Operação, os Tipos de Circuitos, os Condutores Fase e Pára-Raios, e os Isoladores. Na imagem apresentada na figura 4.11 é possível observar que para cada tipo de componente existe um catálogo dos componentes já registrados e um bloco de inserção para novos componentes.

LT-Info

Dados Gerais | Estrutura | Aterramento | Detalhes dos Componentes

Nível de Tensão

Tensão [KV]: 230.00 Cor:

Adicionar

Catálogo: 500.0 KV Vinculos: 0

Remover Editar Ordenar

Tipos de Circuitos

Tipo de Circuito

Adicionar

Catálogo: Simples Vinculos: 0

Remover Editar Ordenar

Condutores Fase

Tipo: aluminio_230KV

Diâmetro[mm]: 32.00 Adicionar

Catálogo: aluminio_345 Diâmetro[mm]: 35.00 Vinculos: 0

Remover Editar Ordenar

Condutores Para-Raio

Tipo: aço_230KV

Diâmetro[mm]: 19.00 Adicionar

Catálogo: aço_500KV Diâmetro[mm]: 28.00 Vinculos: 0

Remover Editar Ordenar

Isoladores

Nome: acrilico_345kC NBI: 1350.0 KV Ancoragem: 12 Suspensão: 11 Adicionar

Catálogo: acrilico_230kC NBI: 1200.0 KV Ancoragem: 10 Suspensão: 9 Vinculos: 0

Remover Editar Ordenar

OK Salvar Cancelar

Figura 4.11 – Tela de Inserção da Tensão de Operação, Tipo de Circuito, Condutores Fase e Pára-Raio e Isolador.

O tipo de componente seguinte são as torres e estruturas de sustentação. Por se tratarem de elementos com representação de maior complexidade, existem mais opções para o tratamento dos componentes.

A figura 4.12 apresenta a interface destinada a tal tarefa e possui maior grau de dificuldade para inserir um bloco de dados como o modelo de uma torre. No caso da figura 4.12, está inserida uma torre com uma riqueza de detalhes. Os comandos de câmera permitem observar o modelo por diferentes ângulos. O bloco de pontos que compõe o modelo pode ser salvo e carregado em arquivo texto separado.

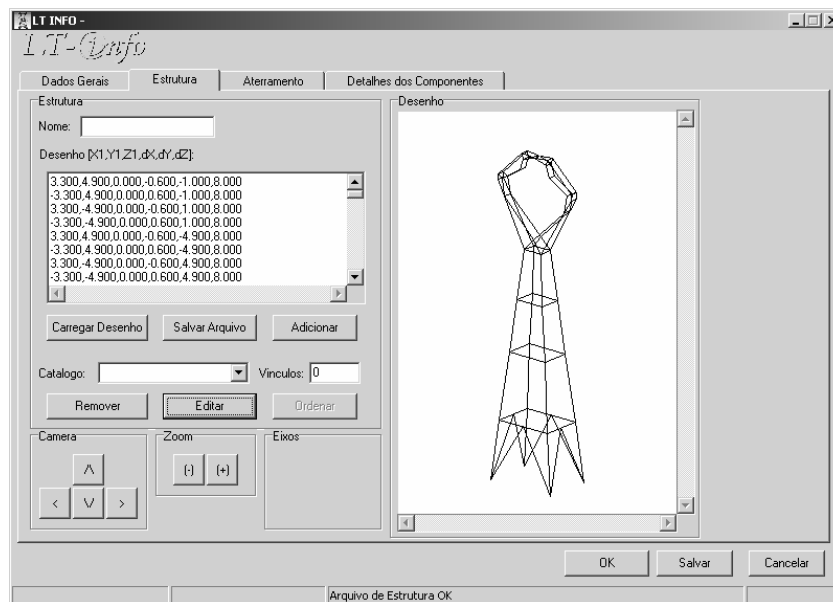


Figura 4.12 – Tela de Inserção de Torres e Estruturas de Sustentação.

A modelagem dos sistemas de aterramento é a mesma das torres e estruturas de sustentação, por se tratarem de componentes com modelos gráficos mais elaborados, suas interfaces são mais complexas e com mais recursos de visualização.

O método de entrada de dados é por coordenadas retangulares espaciais. Cada linha geométrica do modelo deve ser definida por sua coordenada inicial e por sua coordenada relativa final (neste caso entende-se por coordenada relativa o deslocamento em relação à coordenada inicial).

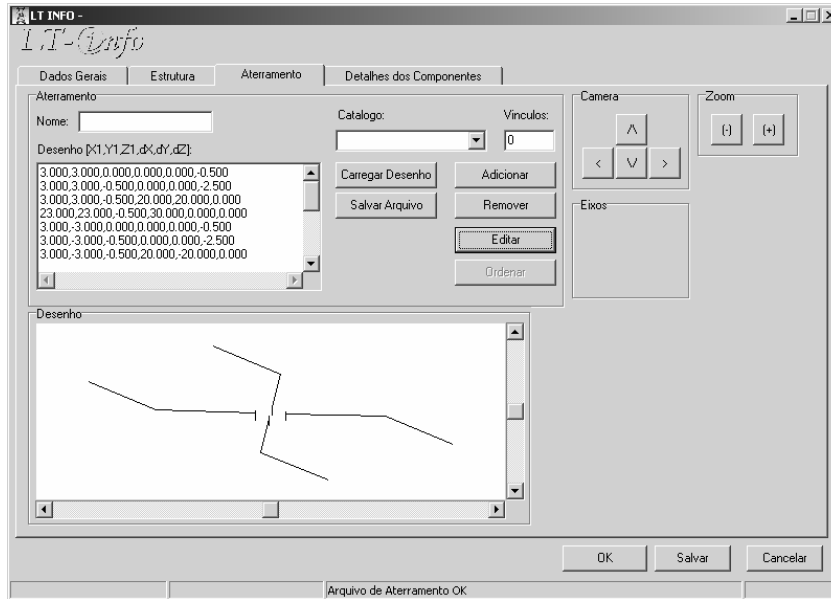


Figura 4.13 – Interface dos modelos de Sistemas de Aterramento para o LT-Info.

Um recurso implementado nesta versão do LT-Info é do desenho por inserção direta dos pontos. À medida que vai recebendo informações sobre um modelo tridimensional, tanto para estruturas de sustentação como para os sistemas de aterramento, a tela de visualização apresenta a visualização do modelo presente na janela de dados.

O LT-Info possui ainda uma interface de visualização das interdependências dos componentes com as Linhas de Transmissão. Tais funcionalidades administrativas podem ser estendias de acordo com a demanda do Sistema de Transmissão.

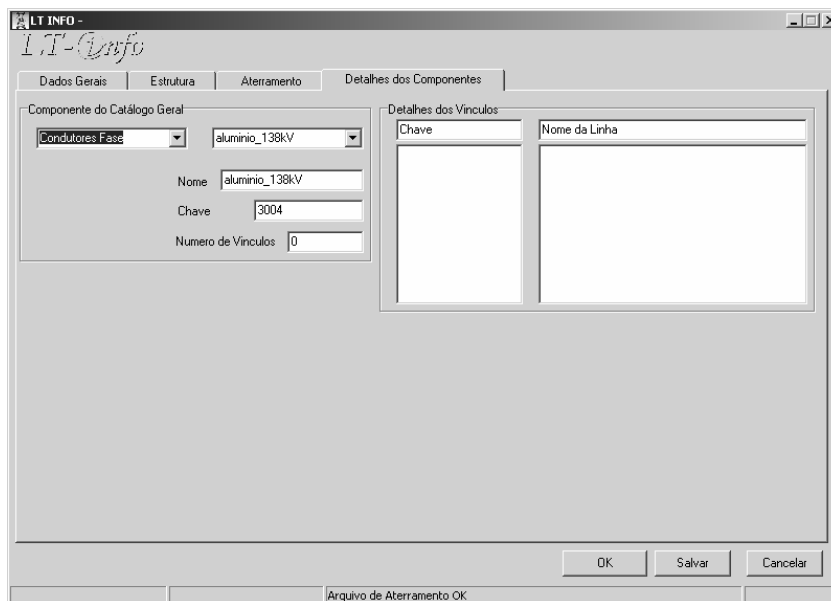


Figura 4.14 – Interface de verificação dos componentes do Catálogo Geral.

4.3.3 Acesso ao Banco de Dados de Linhas de Transmissão

Na proposta realizada, pode-se afirmar que o banco de dados de linhas de transmissão é o sistema nervoso do LT-Info. Devido a este fato, a interface para custódia das informações sobre linhas de transmissão alcançou uma dimensão razoável tornou-se relativamente complexa.

Esta seção do sistema é responsável pela visualização, inserção e edição dos dados presentes no Banco de Dados de Linhas de Transmissão. O ambiente do modo de inserção apresenta interface completa quanto a funcionalidades disponíveis. Nesta seção será apresentada a interface para inserção dos dados referentes à linha de transmissão, sendo eles:

- Detalhes descritivos e construtivos da LT;
- As listas de Torre, Subestações e Sistemas de Aterramento;
- A estrutura típica da linha;
- Os equipamentos;
- Um mapa com a disposição da linha;
- Uma seção de relatório de funcional da linha, que apresenta um histórico de manutenção e desligamentos.

As informações de caráter descritivo (Nome da linha, regional, etc.) e construtivo (tipos de cabos e isoladores, extensão, tensão de operação, etc.) que caracterizam a linha de transmissão são apresentadas na figura 4.15, na tela de entrada que possui também um quadro com referência direta das informações presentes no Catálogo Geral.

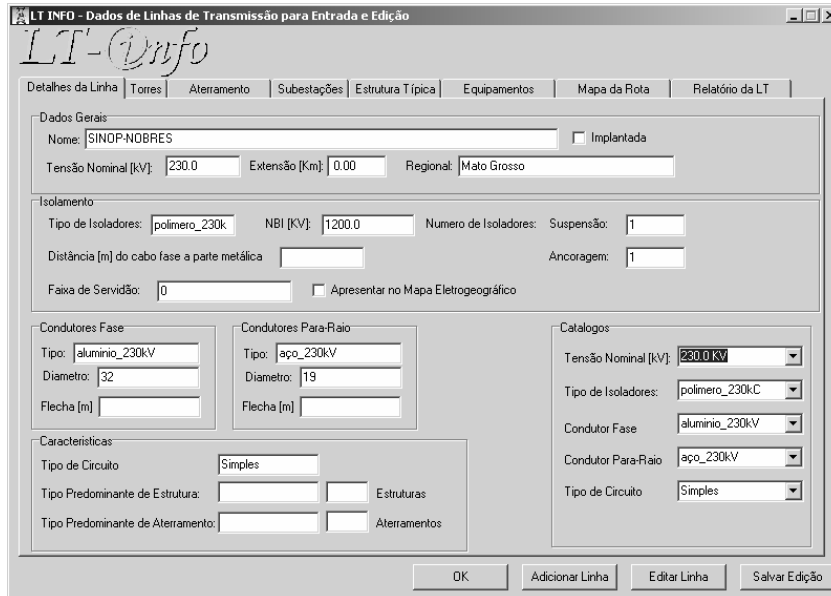


Figura 4.15 - Interface de entrada para detalhes da Linha de Transmissão.

Para a lista de torres presentes na linha são armazenadas as informações construtivas e geográficas, englobando dados como o tipo de estrutura, a altitude, a altura, as coordenadas geográficas, o vão e o tipo de aterramento.

Tais informações forma baseadas no trabalho (VISACRO, 2005b) para obtenção de índices de desempenho para Linhas de Transmissão contra descargas atmosféricas.

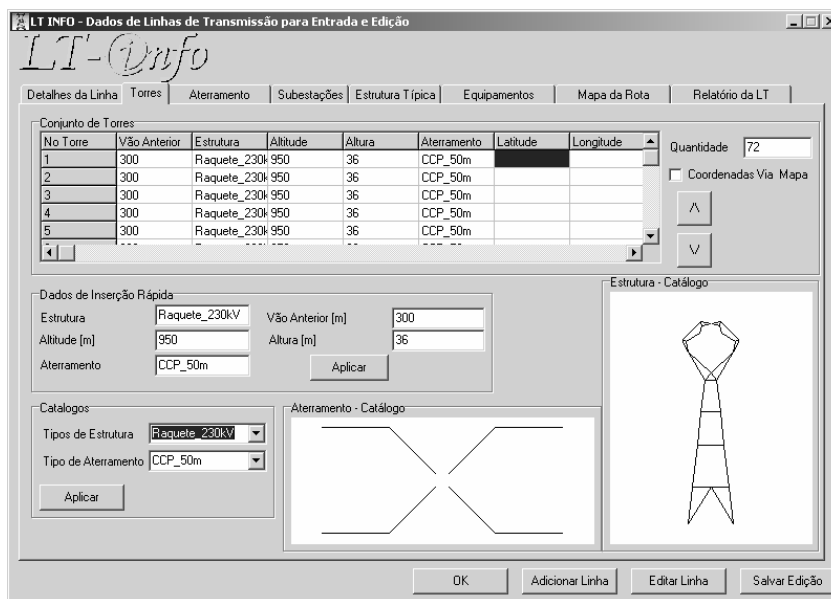


Figura 4.16 - Tela do Sistema para inserção das informações referentes às torres presentes na Linha de Transmissão.

Um fato importante é a capacidade de utilização das coordenadas geográficas das torres que compõe a Linha de Transmissão, pois a partir destes dados é possível calcular a extensão da LT e o tamanho do vão entre as torres.

Na figura 4.17 é apresentada a tela para manipulação da lista de subestações presentes no sistema que são relacionadas à linha. No LT-Info as subestações são representadas pelo nome de identificação, a potência nominal e as coordenadas geográficas.

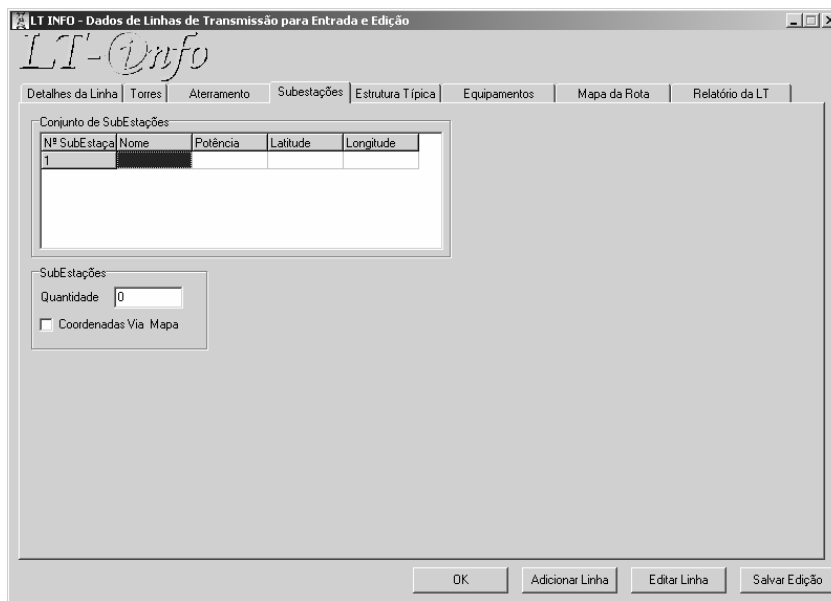


Figura 4.17 - Interface para inserção dos dados referentes às Subestações.

Para a lista de aterramentos, foi implementada uma interface para dados estruturais e de manutenção. A figura 4.18 apresenta a referida tela que permite a inserção de informações referentes às dimensões do sistema de aterramento, os valores de resistência e resistividade do solo e as características referentes á medição efetuada, como a data e as condições de umidade e clima.

Nº Aterramento	Tipo	Estrutura	R Aterramento	Resistividade	Data da Medição	Umidade	Clima
1	CCP_50m	Raquete_230k/22	5000	14/01/2004	42	quente	
2	CCP_50m	Raquete_230k/22	5000	14/01/2004	42	quente	
3	CCP_50m	Raquete_230k/22	5000	14/01/2004	42	quente	
4	CCP_50m	Raquete_230k/22	5000	14/01/2004	42	quente	
5	CCP_50m	Raquete_230k/22	5000	14/01/2004	42	quente	
6	CCP_50m	Raquete_230k/22	5000	14/01/2004	42	quente	

Figura 4.18 – Interface para inserção da Lista de aterramentos

Uma característica presente nesta base de entrada de dados é a ligação que estas possuem com o sistema de entrada de mapas. As informações referentes às coordenadas geográficas das linhas de transmissão passam a compor o conjunto de mapas do LT-Info. A rota das linhas são traçadas sobre o mapa de acordo com suas coordenadas inseridas neste módulo do sistema. No momento da inserção de uma linha de transmissão no Banco de Dados de LT's o sistema cria uma associação entre mapas, baseados nas coordenadas geográficas da LT e das subestações.

A figura 4.19 apresenta a disposição da tela que apresenta o mapa auxiliar. Nesta tela é possível localizar pontos e localidades já cadastradas no Banco de Dados além de permitir a inserção de detalhes referentes à Linha de Transmissão usando como referência o mapa político principal.

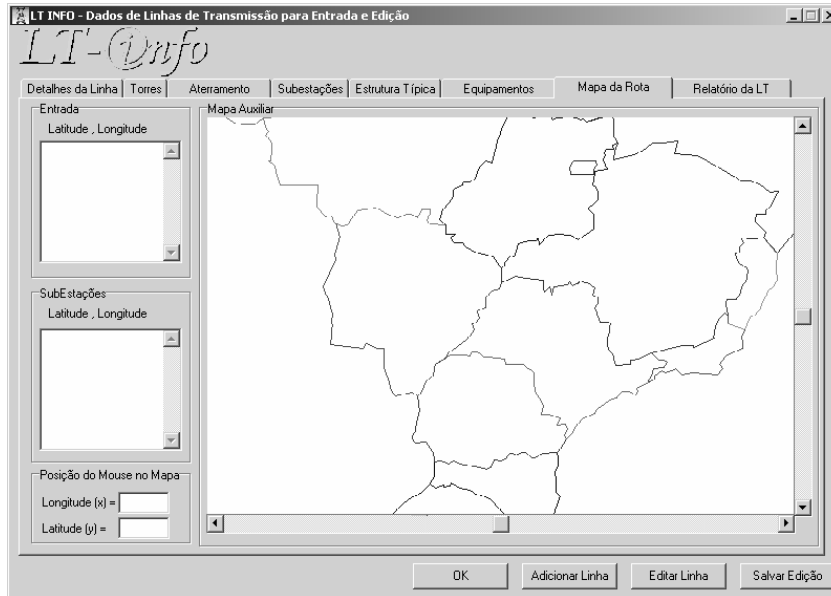


Figura 4.19 – Mapa Auxiliar para orientação na entrada de coordenadas geográfica

Para a parametrização da Linha de Transmissão existe uma interface para tratamento e inserção da estrutura típica. Estrutura esta que é considerada como a característica da linha. Em tal tela é possível dispor os condutores em relação á torre de transmissão utilizada e visualizar a associação da estrutura, condutores e sistema de aterramento.

Apesar do LT-Info não efetuar o cálculo dos parâmetros elétricos para a linha de transmissão, o armazenamento de tais informações já proporciona a abertura para a implementação do cálculo de parâmetros elétricos.

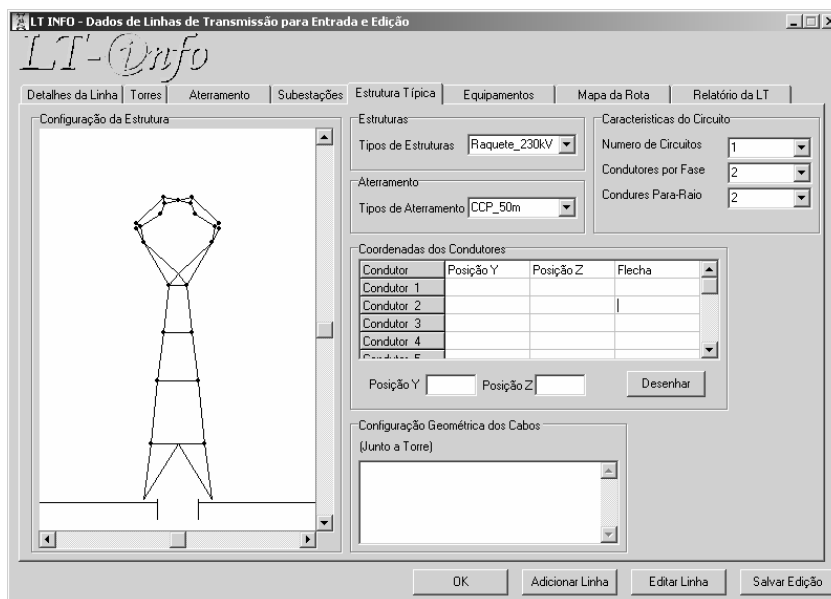


Figura 4.20 – Interface para inserção da estrutura típica da Linha de Transmissão.

Além dos parâmetros da Linha, e do mapeamento de descargas atmosféricas, uma contribuição para o estudo de desligamentos de Linhas de Transmissão é conhecer o histórico de funcionamento. Dados que são relativamente simples de verificar e agrupar, possibilitando extrair informações, é o do nível cerâmico juntamente com as ocorrências de desligamentos e manutenção.

O conhecimento de trabalhos anteriores realizados para melhoria do desempenho de Linhas de Transmissão frente a descargas atmosféricas mostra que, em situação para aplicação de técnicas mais elaboradas de proteção, o histórico de desligamento da linha de transmissão é a primeira ferramenta utilizada em conjunto com os sistemas de detecção e localização de raios.

LT INFO - Dados de Linhas de Transmissão para Entrada e Edição

LT-Info

Detalhes da Linha | Torres | Aterramento | Subestações | Estrutura Típica | Equipamentos | Mapa da Rota | Relatório da LT

Resumo da Linha

Entrada em Operação: [] Nível Cerâmico Médio: []

Numero de Desligamentos: [] Nº Desligamentos p/ Ano: []

Numero de Manutenções: [] Nº Manutenções p/ Ano: []

Buscar Evento

Desligamento

Manutenção

Data Aproximada: []

Nº do Evento: []

Torre: []

Inserir Evento

Desligamento

Manutenção

Data: []

Torre Nº: []

Nº do Evento: []

Providência: []

Eventos Relacionados

Nº do Evento	Data	Nº da Torre	Providência
1			

OK Adicionar Linha Editar Linha Salvar Edição

Figura 4.21 – Interface para o tratamento do Histórico da Linha de Transmissão

Todo o processo de inserção dos dados das Linhas de Transmissão, sob a ótica proposta, procura cobrir todas as fendas na aplicação do estudo de desligamentos frente a descargas atmosféricas.

4.3.4 Acesso a Inserção e Edição de Mapas

O ambiente de edição de mapas tem o objetivo de permitir ao usuário a entrada de informações referentes ao sistema de energia elétrica utilizando o espaço geográfico como referência.

O LT-Info utiliza o sistema de coordenadas geográficas da terra, com os valores numéricos referenciados com o eixo leste nas abscissas e o eixo norte nas ordenadas com a origem no encontro do paralelo do equador com o meridiano de Greenwich.

Para efeito de cálculo de escala, é adotada a convenção de que o planeta Terra é uma esfera com perímetro de 40.000 km e intervalo de 90° entre o pólo e o equador. Partindo desta premissa, cada minuto de grau corresponde a uma milha náutica 1851,85 m e cada centésimo de grau a 1111,11 m.

Como o Brasil está localizado a oeste de Greenwich e com a grande maioria ao sul do equador, o LT-Info vai registrar as maiorias das coordenadas como negativas. A figura 4.22 a seguir apresenta os mapas armazenados no sistema e as suas formas de representação.

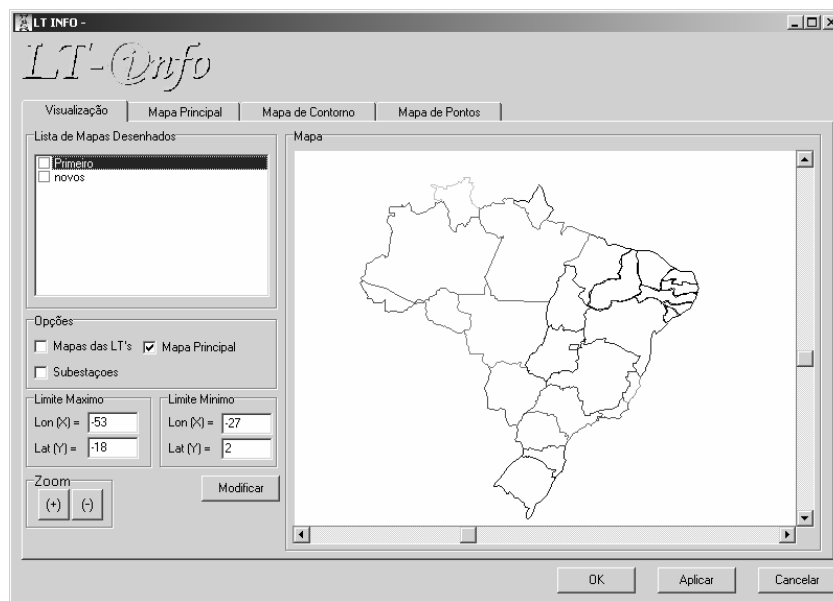


Figura 4.22 – interface para edição e entrada de mapas

Observe que os modelos de objetos presentes são a amostragem de pontos e os contornos. O método de inserção de cada um dos objetos é baseado na sua topologia, e os contornos necessitam apenas das coordenadas para entrar em um Mapa do tipo vetorial, enquanto a amostragem de pontos necessita além de uma coordenada um valor associado.

O processo de entrada das coordenadas pode ser bem interativo, com utilização direta do toque sobre a tela ou com carga direta de arquivos com coordenadas na tela de texto.

4.4 Funcionalidades que Podem Ser Aplicadas

Este tópico do capítulo possui o objetivo apresentar algumas propostas de continuidade para o LT-Info. Tais propostas não partiram apenas da percepção e observação do autor, mas também da contribuição de pesquisadores, usuários e da literatura não referenciada. Várias idéias surgiram durante o desenvolvimento do programa e por motivo de força maior, principalmente tempo, não foram implementadas.

Outro esclarecimento necessário é a motivação para tais propostas, pois por mais sofisticado que o software se encontre este nunca possui sua versão final, e melhorias devem existir para superar o limite máximo de funcionabilidade e robustez.

- Aplicação em modo cliente-servidor, separando o programa em um módulo de armazenamento, no servidor, e um módulo de acesso, no cliente com funcionalidades de rede e ser possível com leitura de relatórios por internet.
 - Processo de reconhecimento de usuário com restrições de uso de acessibilidade. Neste caso a acessibilidade ao Catálogo Geral do LT-Info pode diferir da acessibilidade ao Banco de Dados das Linhas.
 - Criação de um módulo para cálculo de parâmetros de linhas de transmissão baseado na estrutura típica de cada linha e nos parâmetros do circuito.
 - Interface direta com softwares de Sistemas de Detecção e Localização de Raios (LLS) para leitura e importação de dados, pois a partir do modelo geográfico e das informações dos bancos de dados dos LLS's é possível aplicar técnicas como as sugeridas em (VISACRO, 2005b) de forma automatizada.
 - Sistema de geração de relatórios com informações sobre atividades atmosféricas, faltas não programadas e falhas de equipamentos, tal funcionalidade é baseada na pesquisa em (XIE, 2002), e pode prevenir desligamentos provocados por estes eventos.
 - Sistemas de alertas de manutenção baseado em dados de manutenção e medições em várias linhas e subestações do sistema de transmissão.
-

5 Técnicas de Melhorias de Desempenho de Linhas de Transmissão Frente a Descargas Atmosféricas

5.1 Introdução

Melhorar o desempenho de uma linha de transmissão frente a descargas atmosféricas consiste em adotar ações para conferir maior robustez à linha, de forma a minimizar seus desligamentos decorrentes dos diversos tipos de solicitações por descarga atmosférica. Muitas vezes é difícil alcançar tal objetivo.

Considerando linhas de transmissão providas de cabos de blindagem, e considerando o *Backflashover* como mecanismo predominante de desligamento, existem na literatura técnicas de melhoria de desempenho denominadas tradicionais. As ações correspondentes se resumem basicamente à redução da impedância de pé de torre e à aplicação de dispositivos pára-raios. Para redução da impedância de pé de torre existem diferentes metodologias que, dependendo da resistividade do solo, são capazes de melhorar o desempenho da linha de transmissão. A aplicação de dispositivos pára-raios pode prevenir a ocorrência de arcos elétricos de contornamento sobre a cadeia de isoladores da linha.

Adicionalmente existe um arsenal de técnicas não-convencionais, que complementa as ações tradicionais. Essas técnicas procuram explorar os efeitos dos parâmetros capazes de influenciar direta ou indiretamente na amplitude da sobretensão resultante na cadeia de isoladores devido à incidência de descargas na linha de transmissão.

Parâmetros, como a impedância de surto da estrutura de sustentação e o acoplamento eletromagnético entre os condutores energizados e os cabos e estruturas aterrados da linha, podem influenciar na amplitude da sobretensão resultante sobre a cadeia de isoladores.

Naturalmente, essas alternativas, por se tratarem de técnicas mais sofisticadas, exigem uma análise qualitativa e só se justificam na impossibilidade do emprego das soluções tradicionais ou em situações singulares. Vale comentar que, além da análise elétrica, faz-se necessário um estudo dos impactos gerais da intervenção na linha, incluindo os efeitos mecânicos dentre outros.

5.2 *Técnicas Tradicionais de Melhoria*

5.2.1 *Uso de Pára-Raios*

Dentre as técnicas tradicionais, a mais imediata é a aplicação de dispositivos pára-raios. O funcionamento dos pára-raios é baseado em um efeito de não-linearidade entre a tensão aplicada aos seus terminais e a corrente que circula pelo dispositivo. O pára-raios é composto basicamente de um resistor não linear com a inclusão ou não de *gaps* dependendo do material utilizado no elemento não linear. A figura 5.1 a seguir apresenta um gráfico do comportamento típico deste tipo de componente elétrico.

Em modo de operação normal, submetido a uma tensão inferior a sua tensão nominal, o pára-raios apresenta uma impedância muito elevada, que apresenta baixíssimas correntes de fuga, na ordem de micro a miliampères. Quando a tensão em seus terminais atinge um valor superior à tensão de disparo o dispositivo apresenta uma redução enorme da sua impedância, dissipando a corrente de impulso e recuperando seu alto valor de impedância após o término da solicitação da tensão. Tradicionalmente, os dispositivos pára-raios são fabricados de Carboneto de Silício (SiC) ou de Óxido de Zinco (ZnO).

Em geral os dispositivos pára-raios, quando instalados em linhas de transmissão de alta tensão, são aplicados em paralelo com os isoladores. Em caso de uma solicitação por descarga atmosférica, o pára-raios entra na sua região de atuação “grampeando” o valor da sobretensão resultante sobre a cadeia de isoladores, como mostra a figura 5.2, que ilustra a onda de tensão resultante na presença ou ausência do dispositivo pára-raios em paralelo com o isolador.

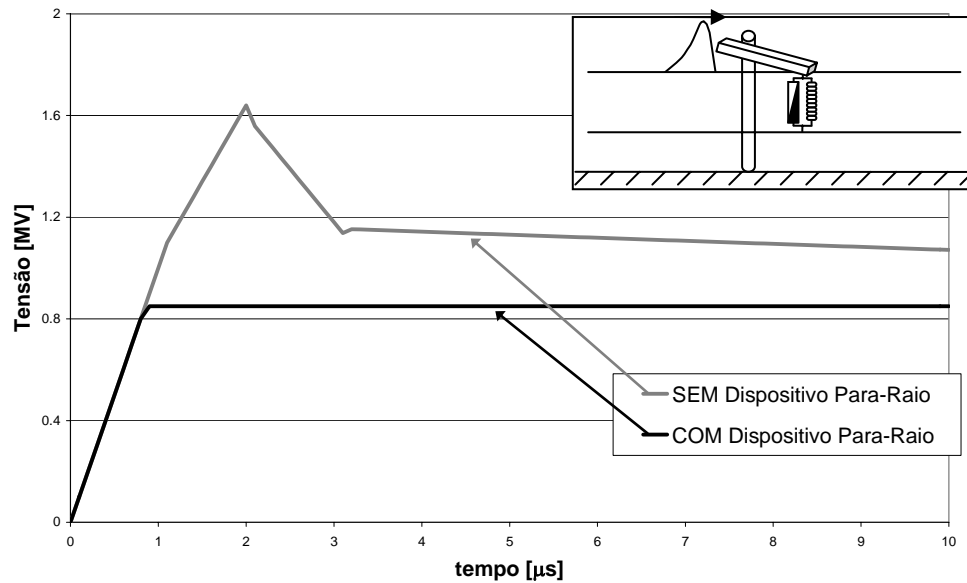


Figura 5.2 – Comparação entre a curva de sobretensão com e sem a utilização do dispositivo para-raio.

A grande vantagem presente nesta técnica é a garantia da continuidade absoluta do fornecimento de energia, reduzindo drasticamente o número de desligamento. Países como o Japão adotam o uso dos dispositivos pára-raios, utilizando-os preventivamente em toda extensão da linha de transmissão.

Apesar da efetividade desta técnica de melhoria de desempenho, a aplicação destes dispositivos pode ser onerosa, pois o preço de instalação e manutenção em uma linha de transmissão é alto para condições brasileiras. Em muitos casos recomenda-se a utilização de forma seletiva em pontos críticos com uma relação de compromisso entre custo e benefícios.

5.2.2 Aumento do Número de Isoladores

Existem situações em que é aplicável o simples aumento do número de elementos da cadeia de isoladores, para casos onde os isoladores são compostos de discos. Aumentando-se o percurso na superfície da cadeia entre os condutores energizados e as estruturas aterradas, atua-se nas distâncias elétricas, e conseqüentemente amplia-se o Nível Básico de Isolamento (NBI) da linha de transmissão.

Por outro lado, o aumento da cadeia de isoladores tem que ser considerado com critério, sobretudo no caso de linhas já projetadas. Em condições de tempestade a amplitude do balanço provocado por

ventos é ampliada pelos elementos adicionais. Isto pode provocar efeito contrário, ou seja, aproximar os condutores energizados das partes da estrutura aterrada e reduzir o nível de suportabilidade do isolamento da linha (VISACRO, 2006).

5.2.3 *Melhoria do Aterramento de Pé de Torre*

A prática de proteção mais comumente adotada pelas empresas concessionárias de energia elétrica consiste na redução da resistência de pé de torre. Esta ação busca reduzir a amplitude da sobretensão ocorrida na cadeia de isoladores das torres para fins e minimização da frequência de ocorrência da Descarga Disruptiva de Retorno, através do *Backflashover*, que é o mecanismo de desligamento de linhas de transmissão mais freqüente em linhas blindadas com condutores pára-raios.

Para adoção desta metodologia é preciso conhecer o valor apropriado de impedância de aterramento, capaz de assegurar um bom desempenho da linha de transmissão em análise. Conhecendo tal valor de impedância é possível definir uma configuração e as dimensões do aterramento para alcançá-lo.

Na prática, existem diferentes procedimentos para se obter os valores desejados de impedância de aterramento para cada valor de resistividade do solo. Muitas empresas concessionárias de energia adotam critérios de limites superiores de valores de resistência de aterramento (por volta de 20 a 30 Ω).

A configuração de eletrodos de aterramento mais adotada pelas concessionárias de energia elétrica com sistema instalado em solos de resistividade elevada (como é típico no Brasil), consiste nos cabos contrapeso, como ilustrado na figura 5.3.

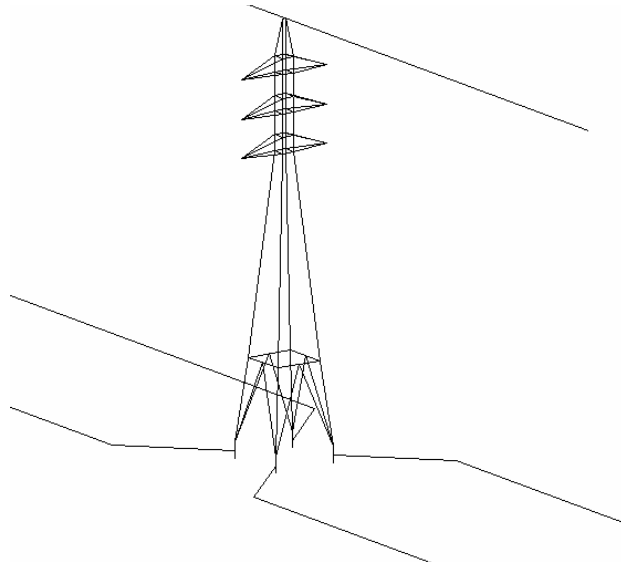


Figura 5.3 – Estilização do Condutor de Blindagem e dos Cabos Contrapeso presentes no aterramento para uma torre de transmissão

Para avaliar o desempenho do sistema de aterramento pode-se recorrer à impedância impulsiva Z_p , que é definida pela razão entre os valores de pico da tensão desenvolvida no aterramento (elevação de potencial em relação ao terra remoto) pelo da corrente injetada no aterramento.

$$Z_p = \frac{V_p}{I_p} \quad (5.1)$$

Com o aumento do comprimento dos cabos contrapeso, o valor da impedância impulsiva tende a diminuir até próximo de um valor limite, onde o aumento do comprimento deixa de promover a redução no valor da impedância impulsiva. Este comprimento é denominado como comprimento efetivo do aterramento.

O conceito de comprimento efetivo pode ser entendido ao se adotar para o cabo contrapeso uma abordagem do tipo linha de transmissão onde se consideram os parâmetros R , L , G e C por unidade de comprimento do cabo. A constante de propagação da onda que se propaga no solo guiada pelo cabo contrapeso vale:

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (5.2)$$

Onde α é o coeficiente de atenuação, β o coeficiente de fase, j a unidade complexa e ω a frequência angular. Sendo o comprimento efetivo um reflexo empírico deste coeficiente de atenuação, para a

faixa dos componentes de frequência envolvidos na frente de onda da descarga atmosférica.

Para uma frente de onda de corrente e uma resistividade do solo definidas, quando o comprimento do cabo contrapeso é aumentado, inicialmente ocorre redução da impedância impulsiva. A partir de certo comprimento, embora a resistência continue a decrescer, o valor da impedância impulsiva passa a ser constante.

Concluindo, tem-se como definição conceitual de comprimento efetivo a extensão do eletrodo a partir da qual o alongamento adicional do eletrodo não é mais capaz de reduzir sua impedância impulsiva. Naturalmente tal comprimento depende do conteúdo de frequências da onda de corrente e da resistividade do solo. A equação 5.2 mostra que a frequência angular (ω), e a condutividade paralela (G) do condutor contrapeso são diretamente proporcionais ao valor do coeficiente de atenuação.

A figura 5.4 ilustra o comportamento do valor da impedância impulsiva em função do comprimento do cabo contrapeso em diferentes valores de resistividade do solo para injeção de uma onda de 1.2/50 μ s.

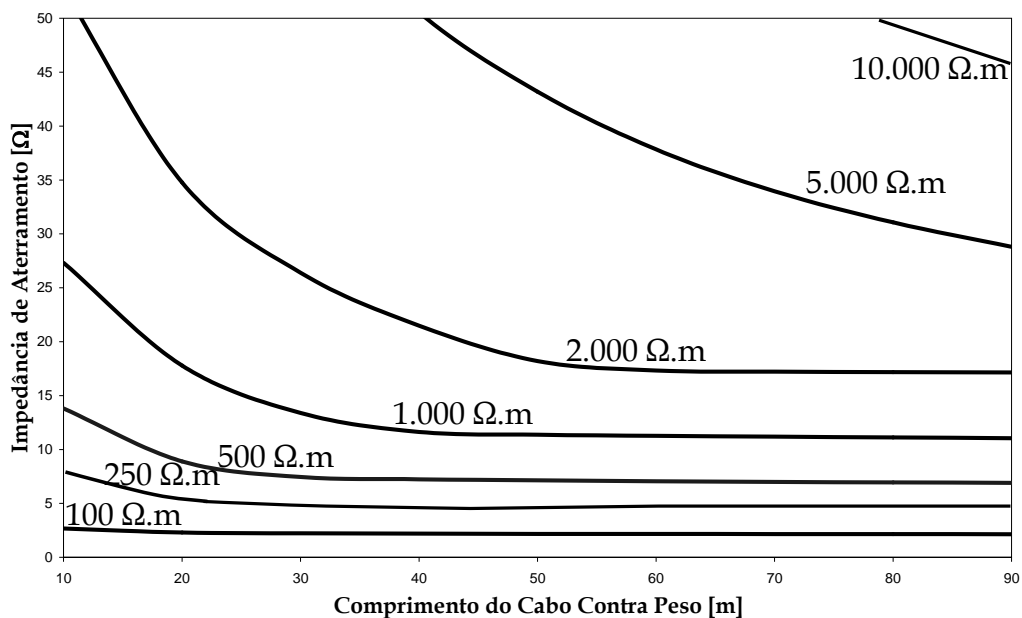


Figura 5.4 – Comportamento da Impedância de Aterramento de acordo com o comprimento dos eletrodos (Adaptado de (SOARES Jr, 1996)).

5.2.4 Valores Recomendáveis de Impedância

Como foi comentado, para cada amplitude de onda de corrente é possível definir um valor limite de impedância de aterramento, capaz de assegurar que a sobretensão na cadeia de isoladores seja inferior ao NBI da linha, para uma dada corrente de descarga considerada representativa, minimizando a possibilidade de ocorrência de *backflashover*.

Estudos desenvolvidos por Visacro (2002c, 2006a, 2006c) sobre desligamentos de devido à ocorrência de *backflashover* em linhas de transmissão de alta tensão típicas do sistema brasileiro mostrou uma gama de conclusões referentes à influência da resistência de aterramento na sobretensão resultante na cadeia de isoladores.

Os estudos avaliaram linhas de transmissão com valores de tensão de operação de 69 kV, 138 kV, 230 kV, 345 kV e 500 kV, e seus respectivos valores de TSI e de desligamentos máximos por ano (Seção 2.2 deste texto). Considerando os valores característicos dos parâmetros de descargas atmosféricas para a realidade brasileira, Visacro (2006b) sugere valores limites de valor da impedância de aterramento que devem ser observados nos diferentes níveis de tensão. A tabela 5.1 apresenta tais valores recomendáveis de impedância em função da tensão de operação da linha e seu Nível Básico de Isolamento (NBI).

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

Tabela 5.1 - Valores recomendados de impedância para pé de torre (adaptado de (VISACRO, 2006c)).

Naturalmente, um bom desempenho de uma linha de transmissão, excluindo a utilização de dispositivos pára-raios, acontece quando são obtidos os menores valores possíveis para a impedância de aterramento, dentro da faixa do comprimento efetivo. Para efeitos práticos, muitas vezes é difícil obter tais valores inclusive para condições críticas de resistividade do solo. Entretanto variações em torno dos valores apresentados na tabela 5.1 já apresentam resultados satisfatórios, considerando que mesmo operando na mesma tensão, cada linha apresenta suas particularidades.

5.3 Técnicas de Melhoria Não Convencionais

As técnicas não convencionais de melhoria do desempenho de linhas frente a descargas atmosféricas exploram o efeito dos parâmetros que influenciam na amplitude da sobretensão resultante na cadeia de isoladores. Tais parâmetros incluem sobretudo da impedância de surto da estrutura de sustentação da linha de transmissão e do acoplamento eletromagnético entre os condutores energizados e as estruturas aterradas, além da combinação destes elementos com configurações espaciais dos eletrodos de aterramento.

Em um estudo apresentado em (VISACRO, 2004d, 2006a), aplicado para uma torre do tipo auto-portante, além da técnica de falsos estais, o autor utiliza cabos aterrados posicionados sob os condutores fase. Efeito este que aumenta o acoplamento entre os condutores fase e os de blindagem.

O referido estudo avaliou o desempenho de uma linha de transmissão de 230 kV (TSI = 1.200 kV), altura de 30m e impedância impulsiva de pé de torre (Z_P) variando de 100 a 500 Ω . A onda de corrente utilizada foi do tipo rampa com amplitude de 50 kA, tempo de frente de 2 μ s e tempo de meia onda de 70 μ s, simulada computacionalmente por um modelo HEM (VISACRO, 2005a) assumindo a impedância impulsiva da torre no valor de 100 Ω .

Os valores de sobretensão apresentados são os estabelecidos entre os terminais dos isoladores para as quatro condições abordadas, listadas a seguir:

- (I). Configuração original, apenas com a utilização dos condutores contra peso;
- (II). Utilização de dois condutores aterrados, conectados a torre logo abaixo dos condutores energizados, mantendo uma distância superior ao tamanho dos isoladores.
- (III). Presença de quatro falsos estais, conectados na torre abaixo dos condutores energizados, ancorados e estendidos sobre o solo.
- (IV). Presença de quatro falsos estais, conectados à torre abaixo dos condutores energizados, e ancorados e estendidos sobre o solo e conectados a terminação do cabo contrapeso por eletrodos horizontais aterrados (apresentando impedância variando de 50 a 200 Ω para cada eletrodo).

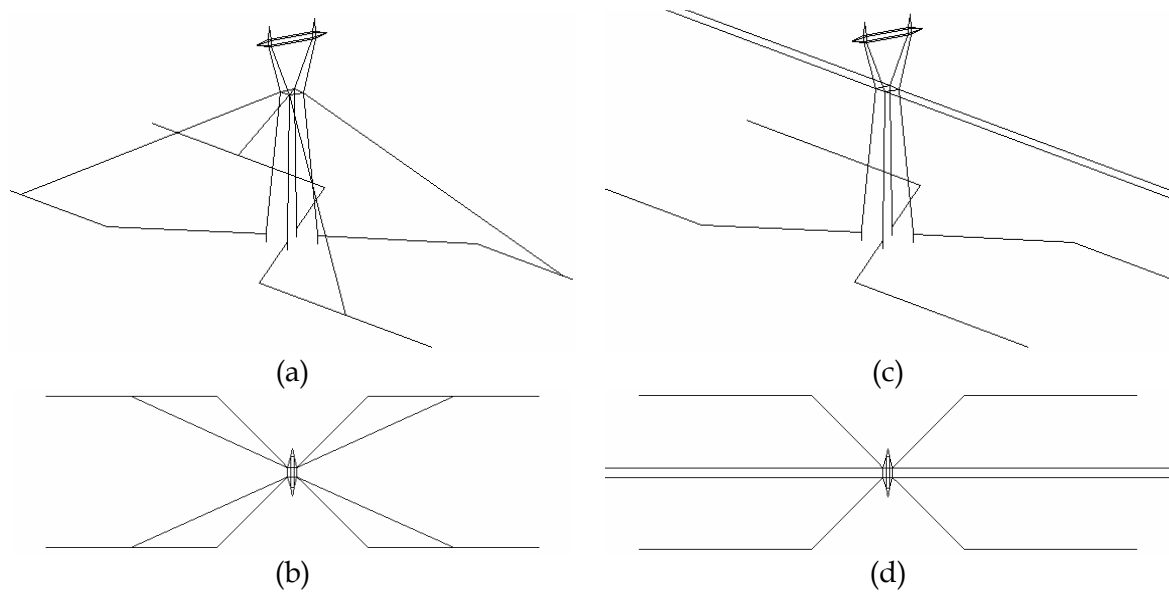


Figura 5.8 - Torre autoportante com cabos contrapeso e falsos estais (a) Perspectiva; (b) Vista Superior. Torre autoportante com cabos aterrados sob as fases (c) Perspectiva; (d) Vista Superior.

Como anteriormente apresentado na seção 2.1 deste texto o valor mediano, para primeira descarga negativa, de pico de corrente é de 45 kA e o tempo de frente varia de 2,9 a 5,6 μ s. Assim os resultados obtidos no referido estudo foram desenvolvidos assumindo valores críticos para pico de corrente e tempo de frente.

A tabela 5.3 a seguir apresenta os resultados de redução de sobretensão obtidos nas abordagens supra citadas, onde Z_P é a impedância impulsiva de pé de torre, e Z_T a impedância paralela dos condutores horizontais enterrados.

Condição abordada	Valores de Sobretensão Máxima [kV] (%)
(I) $Z_P = 500 \Omega$	2.225 (100)
(II)	1.357 (61)
(III)	1.201 (54)
(IV) $Z_T = 50 \Omega$	1.280 (58)
(IV) $Z_T = 37.5 \Omega$	1.180 (53)
(IV) $Z_T = 25 \Omega$	960 (43)
(IV) $Z_T = 12.5 \Omega$	870 (39)

Tabela 5.3 - Tabela com os valores de Sobretensão nos terminais dos isoladores (adaptada de (VISACRO, 2006a)).

A utilização destas técnicas não convencionais apresentou redução na amplitude da sobretensão de 39% para utilização de cabos aterrados sob as fases e de até 61 % para utilização de falsos estais combinados com eletrodos horizontais enterrados na terminação

do contrapeso. As práticas adotadas para a linha de transmissão de 230 kV reduziram, nos dois anos seguintes, o número de desligamento de 7 para 0 desligamentos por 100 km por ano em outra.

O mesmo autor em (VISACRO, 2006d), apresenta uma investigação baseada no estudo da estratificação do solo, e propõe uma solução com a aplicação de hastes profundas com o objetivo de encontrar camadas de menor resistividade, e outra solução não convencional é a utilização de cabos contrapesos contínuos, com uma configuração adicional, de condutores no sentido longitudinal e transversal ao sentido da linha para complementar o sistema de aterramento.

6 Aplicações: Resultados de Estudo de Desligamentos em LT's

6.1 Modelo Computacional Utilizado

O estudo de casos envolvendo desligamento de linhas de transmissão por descargas atmosféricas foi realizado por simulação computacional, utilizando o modelo HEM (Hybrid Eletromagnetic Model), desenvolvido pela equipe do LRC (VISACRO, 2005a) e consolidado em muitos outros projetos e estudos de casos.

O modelo é baseado nas equações de Maxwell, derivando-se do cálculo dos potenciais escalar e vetor. Para aplicação do modelo o sistema físico é discretizado em segmento cilíndricos, sendo que cada segmento possui o comprimento muito maior que o respectivo raio, podendo este segmento ser aproximado por um elemento filamental de corrente.

Para cada segmento, o modelo considera que flui uma corrente longitudinal I_L ao longo do seu comprimento e é dispersa uma corrente transversal I_T para o meio que envolve o segmento em direção ao infinito. As interações com os demais segmentos são calculadas a partir dos potenciais escalar e vetor gerados por estas correntes. Para cada frequência, é obtido o resultado e, logo em seguida, este é calculado no domínio do tempo a partir da transformada de inversa Fourier.

A corrente longitudinal (I_L) provoca uma queda de tensão ao longo do segmento e, da mesma maneira, é fonte de potencial vetor que, através do acoplamento magnético, provoca uma diferença de potencial ao longo dos demais segmentos do sistema.

A corrente transversal (I_T) gera uma elevação do potencial do segmento em relação ao infinito e ainda contribui para a elevação de potencial nos demais segmentos do sistema.

A partir das expressões indicadas na tabela 6.1, o modelo calcula o acoplamento mútuo entre cada dois elementos, em termos da tensão induzida e do potencial escalar desenvolvido, e determina as impedâncias mútuas e próprias, transversais (Z_T) e longitudinais (Z_L).

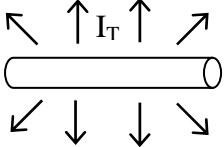
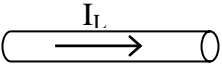
Corrente Transversal	Corrente Longitudinal
	
$V = \frac{1}{4\pi(\sigma + j\omega\epsilon)} \int_L \frac{I_T}{r} e^{-Kr} d\vec{l}$	$\vec{A} = \frac{\mu}{4\pi} \int_L \frac{I_L}{r} e^{-Kr} d\vec{l}$
$V_i = \frac{I_{Tj}}{4\pi(\sigma + j\omega\epsilon)L_j L_i} \iint_{L_j L_i} \frac{e^{-Kr}}{r} dl_j dl_i$	$\Delta V_i = -j \frac{\omega\mu L_{Lj}}{4\pi} \iint_{L_j L_i} \frac{e^{-Kr}}{r} d\vec{l}_j \cdot d\vec{l}_i$
$V_i = Z_T I_{Tj}$	$\Delta V_i = Z_L I_{Lj}$

Tabela 6.1 - Resumo das equações aplicadas para solução do modelo HEM (adaptado de (VISACRO, 1995)).

Nas expressões acima, o segmento j é a unidade fonte e o segmento i é o receptor, sendo r a distância entre os segmentos i e j , dl o elemento diferencial de comprimento e o vetor $d\vec{l}$ o elemento diferencial na direção do segmento L .

Dos parâmetros σ , ϵ e μ (respectivamente a condutividade elétrica, a permissividade elétrica e a permeabilidade magnética do meio), ω (frequência angular), j (unidade complexa) e L (comprimento do segmento), calcula-se a constante de propagação K no meio, dada por:

$$K = \sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)} \tag{6.1}$$

A abordagem no domínio da frequência permite ter em conta a variação dos parâmetros do meio com a frequência, caso esta variação seja conhecida.

Escrevendo o problema na forma matricial tem-se:

Corrente Transversal	Corrente Longitudinal
$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{T11} & Z_{T12} & \cdots & Z_{T1N} \\ Z_{T21} & Z_{T22} & \cdots & Z_{T2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{TN1} & Z_{TN2} & \cdots & Z_{TNN} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{T1} \\ I_{T2} \\ \vdots \\ I_{TN} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \vdots \\ \Delta V_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{L11} & Z_{L12} & \cdots & Z_{L1N} \\ Z_{L21} & Z_{L22} & \cdots & Z_{L2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{LN1} & Z_{LN2} & \cdots & Z_{LNN} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{L1} \\ I_{L2} \\ \vdots \\ I_{LN} \end{bmatrix}$
$V_i = Z_T I_{Tj}$	$\Delta V_i = Z_L I_{Lj}$
$I_{Tj} = Y_T V_i$	$I_{Lj} = Y_L \Delta V_i$
$Y_T = Z_T^{-1}$	$Y_L = Z_L^{-1}$

Tabela 6.2 - Equações do modelo HEM no formato matricial (adaptado de (SOARES Jr, 2001)).

Onde Y_L e Y_T correspondem as matrizes de admitância longitudinal e transversal respectivamente.

Apesar da representação independente do sistema longitudinal e do transversal, o sistema físico a que se refere é único. Logo é possível estabelecer a relação e solucionar o sistema da forma matricial $Ax = B$. Considerando-se que cada nó do sistema é ponto de conexão entre dois segmentos do sistema, torna-se possível calcular as tensões nodais V_N e as correntes de cada segmento considerando que metade da corrente transversal deixa o segmento em cada nó.

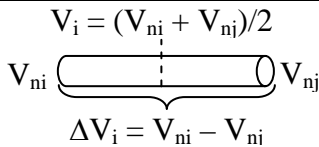
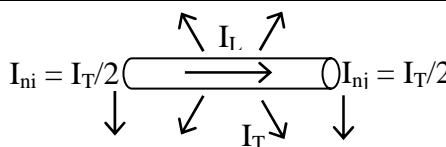
Tensões Nodais	Correntes de Segmento
$V_i = (V_{ni} + V_{nj})/2$  $\Delta V_i = V_{ni} - V_{nj}$	
$V_i = \frac{(V_{ni} + V_{nj})}{2}$	$I_{ni} = \frac{I_T}{2}$
$\Delta V_i = V_{ni} - V_{nj}$	$I_{nj} = \frac{I_T}{2}$

Tabela 6.3 - Resumo das equações de acoplamento do modelo HEM (adaptado de (VISACRO, 2005a)).

Pode-se relacionar assim a tensão média em cada segmento como a média das tensões em cada nó e assumir a diferença de potencial em seus terminais como a diferença da tensão em cada nó. Com base nestas considerações, pode-se calcular as matrizes de admitâncias modificadas, Y_{LM} e Y_{TM} e, em

seguida, compor a matriz única, que representa as características do sistema, para a solução do sistema linear.

A tensão de cada nó V_N pode ser escrita em função das correntes transversais e longitudinais com relação às matrizes de admitâncias transversais e longitudinais modificadas. A partir do ponto de injeção de corrente, podem ser calculadas as correntes longitudinais, transversais e as tensões nodais em cada frequência com relação à corrente injetada e, em seguida, passar o resultado para o domínio do tempo por Transformada de Fourier. Um fluxograma básico com os passos da solução do modelo pode ser observado a seguir.

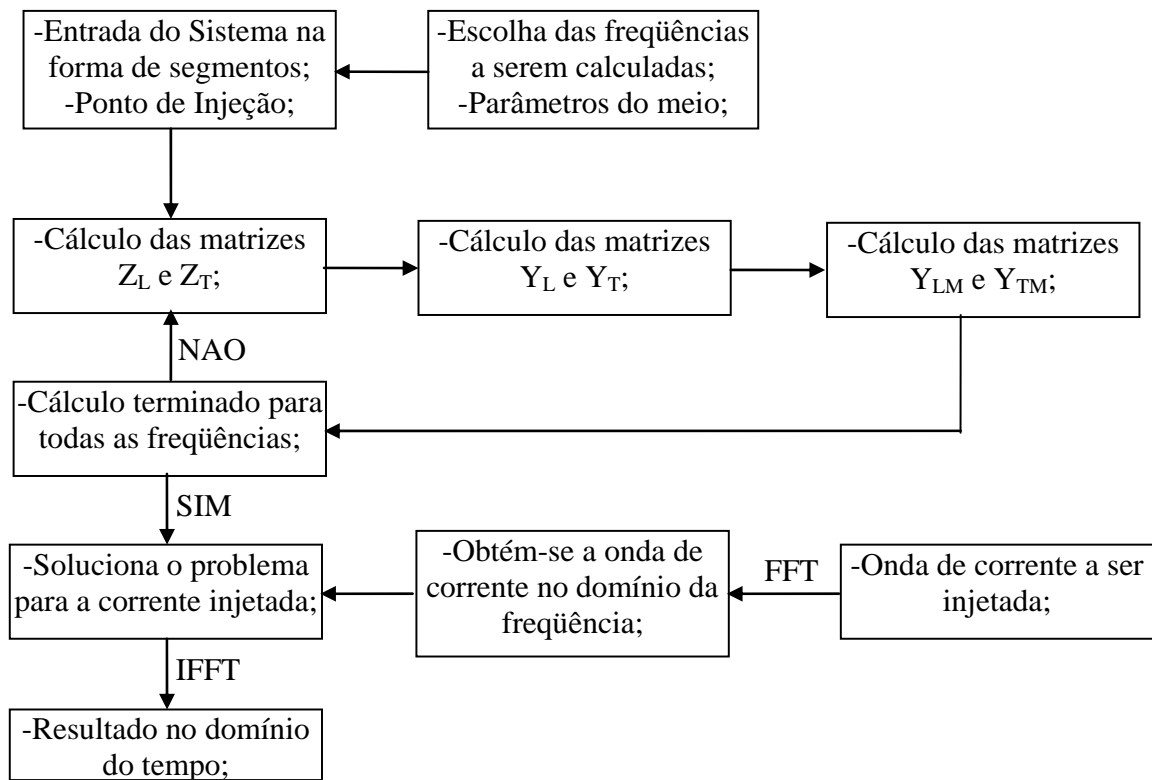


Figura 6.1 - Esquema de solução do algoritmo do modelo HEM.

A partir do princípio de funcionamento do modelo, a rotina computacional foi aplicada a diferentes testes com resultados muito satisfatórios (VISACRO, 2005a), e esta rotina foi utilizada para o estudo dos casos apresentados a seguir. Os detalhamentos do modelo podem ser encontrados nos trabalhos de Visacro (1995, 2005a).

6.2 Primeiro Caso Estudado: Linha de 230 kV

6.2.1 Introdução ao Caso

Esta seção mostra o resultado de avaliações relativas à tensão resultante, nas cadeias de isoladores, devido à incidência direta de descarga atmosférica em torres tipicamente empregadas em linhas de transmissão de 230 kV. A configuração simulada inclui a torre em questão que é equipada com condutores pára-raios e condutores energizados. No estudo presente nesta etapa foi variada a configuração do aterramento da torre, a resistividade do solo e o ponto de incidência da descarga atmosférica na torre.

6.2.2 Configuração Analisada

Foi analisada a resposta de uma torre metálica, auto-portante, com aproximadamente 43 (quarenta e três) metros de altura, que sustenta 02 (dois) condutores pára-raios e 06 (seis) condutores energizados, sendo 02 (dois) condutores por fase. Esta estrutura é tipicamente utilizada no sistema de transmissão do norte brasileiro em 230 kV de tensão nominal e suas principais dimensões são apresentadas a seguir.

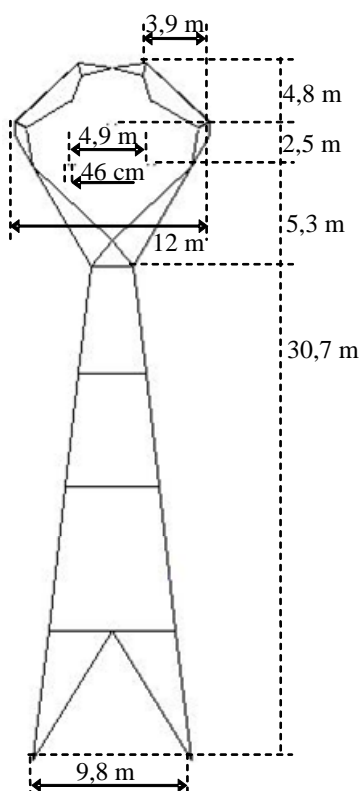


Figura 6.2 - Diagrama esquemático com as dimensões da torre de 230 kV.

A torre é representada por um conjunto de condutores (segmentos) que formam o corpo básico de toda estrutura da torre, representando as principais barras metálicas de sustentação. Os segmentos possuem comprimento variado e diâmetro de 3,5 cm.

A configuração de aterramento adotada nesta estrutura foi representada através de 4 segmentos verticais de 2 m e raio diâmetro de 14 cm, que representou as pernas metálicas enterradas da torre, e 4 cabos horizontais paralelos, de 0,6 cm de diâmetro, enterrados a meio metro de profundidade e que partem dos condutores verticais alcançando um comprimento L.

A figura 6.3 a seguir apresenta uma visão superior da configuração do sistema de aterramento onde L é o tamanho do cabo contrapeso e D a faixa de passagem.

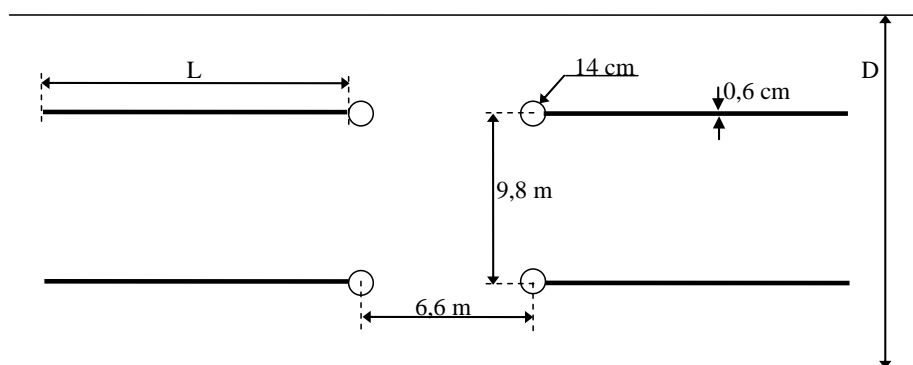


Figura 6.3 – Visão superior da configuração de aterramento da torre de 230 kV.

Na configuração analisada representou-se ainda os cabos pára-raios, com diâmetro de 0,8 centímetros e os condutores fase com diâmetro de 2,26 centímetros. O efeito das torres adjacentes não é contemplado, promovido pelo casamento de impedância dos cabos aéreos a uma distância de 40 metros da torre. A injeção de corrente foi escolhida como sendo no alto da torre, no ponto de sustentação do condutor pára-raios (vide (A) na Figura 6.4 (b)) e no ponto mais ao extremo da lateral da estrutura (vide (B) na Figura 6.4 (b)), as análises concentram-se nos pontos de injeção de corrente, nas cadeias de isoladores, nos pontos próximos aos condutores energizados e nos aterramentos.

Para análise de desempenho foram consideradas as sobretensões nas cadeias de isoladores como referência, sendo a nomenclatura utilizada, referente aos pontos marcados na Figura 6.4 (b):

- Isolador Central – Tensão entre os pontos (1) e (4);
- Isolador lateral – Tensão entre os pontos (2) e (5);
- Fase-Estrutura – Tensão entre os Pontos (3) e (5).

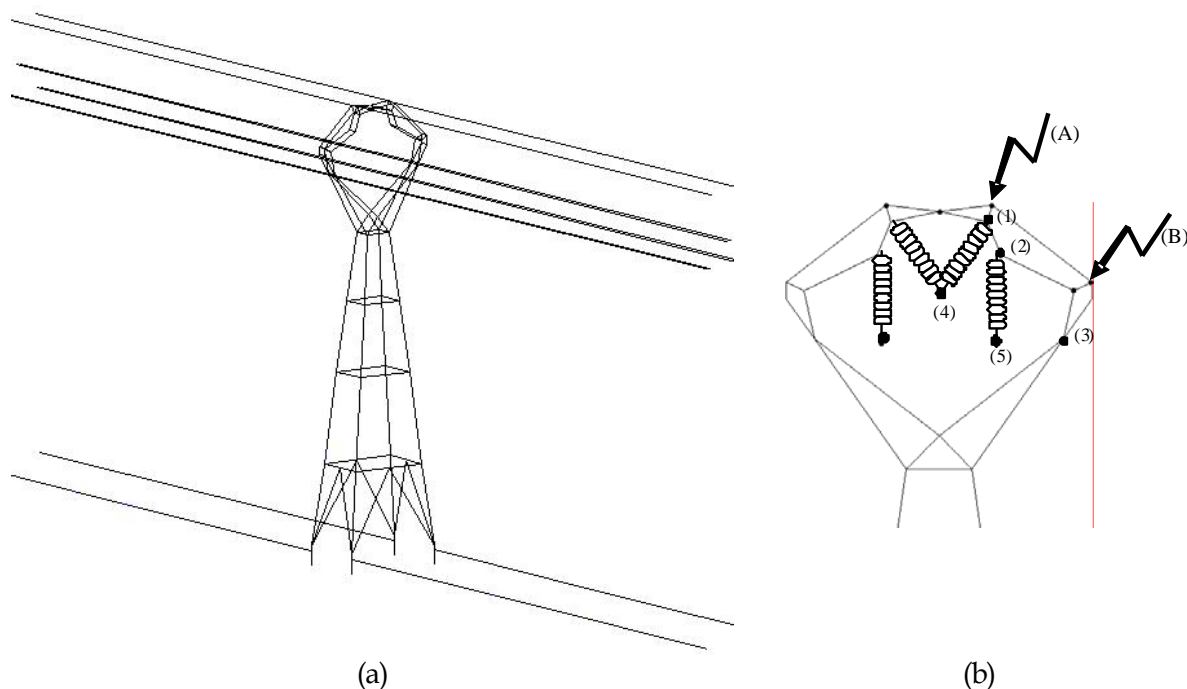


Figura 6.4 – (a) Configuração completa do sistema simulado; (b) Diagrama apresentando os pontos de injeção de corrente e de medição.

6.2.3 Parâmetros Analisados no Aterramento

Realizou-se análise de sensibilidade, analisando-se a elevação de potencial no aterramento com variação da impedância de aterramento (aterramento suposto concentrado), da resistividade do solo (admitindo-se configuração fixa do aterramento), e do comprimento dos cabos horizontais:

Valores de impedância concentrada: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 Ω ;

Valores de resistividade do solo: 100, 500, 1000, 2000, 5000 $\Omega.m$;

Valores de comprimento dos cabos horizontais: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 m.

6.2.4 Forma de Onda de Corrente Utilizada

No caso da corrente, foi utilizada uma onda do tipo rampa com valor de pico de 1 kA, valor de tempo de frente 2 μs e valor de tempo de meia onda de 50 μs , valores considerados muito conservativos para uma primeira descarga, em termos da avaliação de sobretensões geradas por *backflashover*.

Apesar do consenso que a forma de onda côncava é mais representativa para análise de descargas diretas (SOARES Jr, 2005) foi utilizada a forma de onda em rampa, que apresenta ótimos resultados para análise física da dinâmica do fenômeno.

6.2.5 Análise dos Resultados

Para este estudo de caso, foi gerada uma gama muito grande de resultados, e devido a este fato, optou-se por dividir os casos em subgrupos com o critério de semelhança e apresenta-los distribuídos nas seguintes seções do texto desta dissertação:

Seção 6.2.6 - A impedância de aterramento é tratada como concentrada na base da torre, com a finalidade de conhecer a dinâmica do estabelecimento da sobretensão na cadeia de isoladores;

Seção 6.2.7 - Estudam-se as variações do sistema de aterramento, analisando o efeito dos diferentes valores de resistividade do solo e do comprimento dos cabos contrapeso e suas influências na solicitação dos isoladores;

Seção 6.2.8 - São determinadas e analisadas as tensões e correntes presentes no pé-de-torre, buscando relacionar a influência do sistema de aterramento composto de eletrodos horizontais paralelos com os valores obtidos considerando-se impedância concentrada;

Seção 6.2.9 - Apresenta uma breve comparação dos resultados obtidos para impedância concentrada e para configuração de aterramento por condutores horizontais baseados nas formas de onda das sobretensões nos isoladores.

6.2.6 Comportamento da Torre Frente à Descarga Atmosférica com Sistema de Aterramento Concentrado

O parâmetro de avaliação nesta seção é a amplitude da sobretensão resultante na cadeia de isoladores em função do valor da impedância de aterramento, considerada como concentrada e representada por um número real.

A figura 6.5 mostra a onda de sobretensão na cadeia de isoladores central devido à injeção de

corrente na torre para cada valor de impedância concentrada assumido.

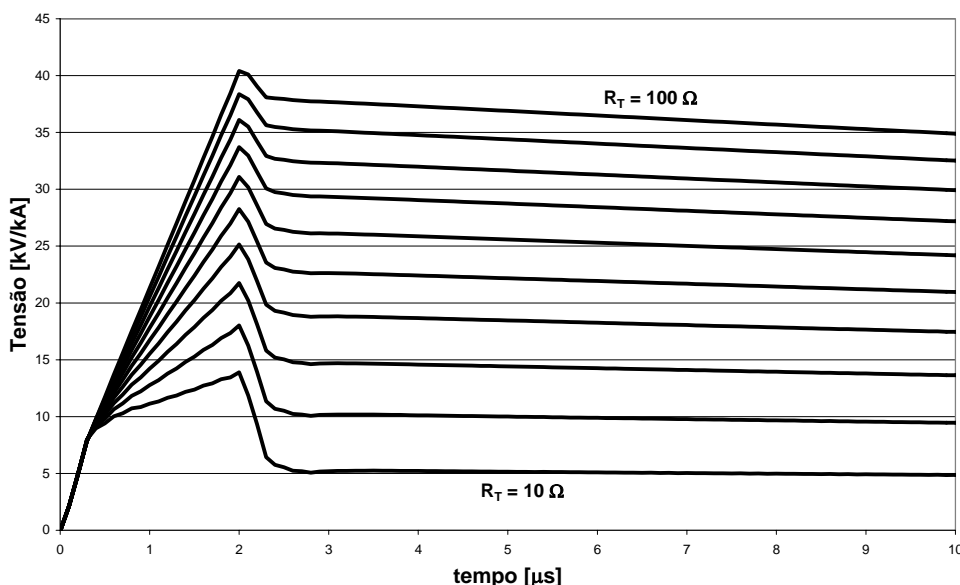


Figura 6.5 – Sobretensão desenvolvida na cadeia de isoladores central devido a injeção de corrente no topo da estrutura (rampa, 1 kA, t_f 2 μ s, t_m 50 μ s).

A tabela 6.4 constitui quadro comparativo entre os resultados para a variação do ponto de injeção de corrente. Na coluna da esquerda a corrente foi injetada no topo da torre (ponto A na figura 6.4 (b)) e na coluna da direita na lateral da torre (ponto B na figura 6.4 (b)).

Valor da Impedância de Aterramento[Ω]	Sobretensão Máxima na Cadeia de isoladores Central [kV/kA]	
	Injeção no topo	Injeção lateral
10	14	13
20	18	17
30	22	21
40	25	25
50	28	28
60	31	31
70	34	33
80	36	36
90	38	38
100	40	40

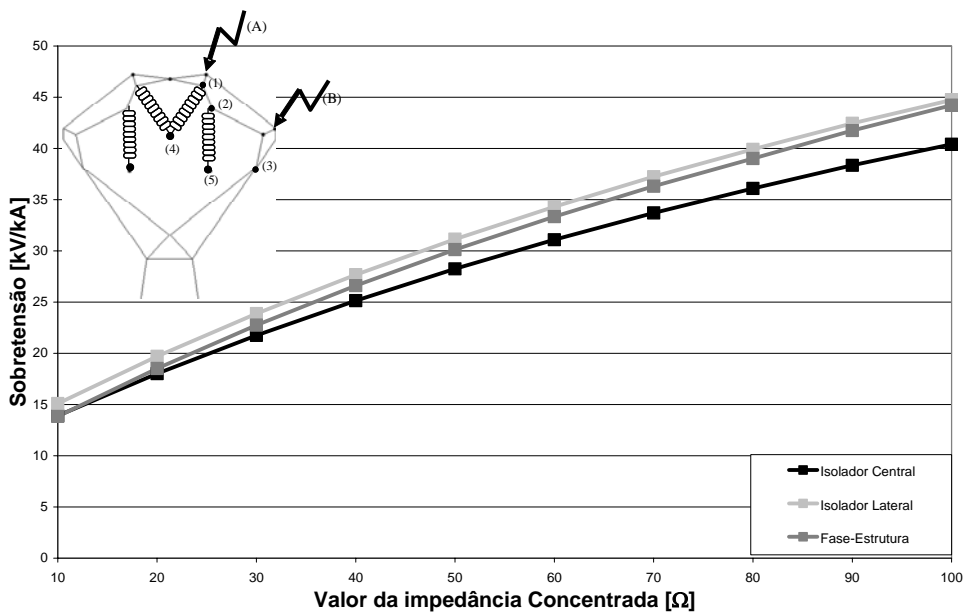
Tabela 6.4 – Valores máximos de sobre-tensão estabelecidos na cadeia de isoladores central para injeção no topo e na lateral.

A sobre-tensão desenvolvida para o aterramento com impedância concentrada segue um

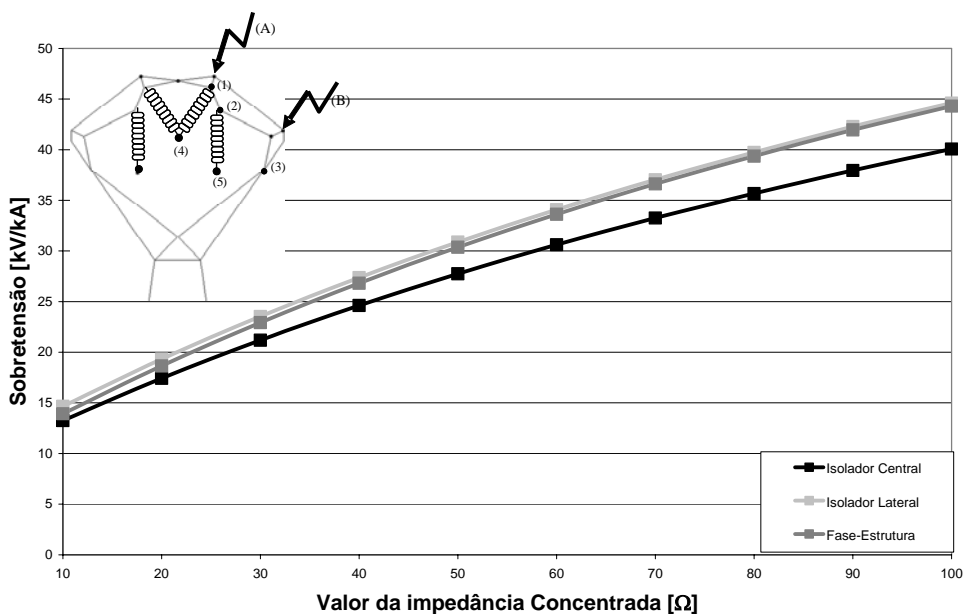
comportamento semelhante ao discutido na seção 2.2.2.2, como mostra a comparação do gráfico da figura 6.5 com a figura 2.6 apresentada na referida seção.

Observa-se que durante o período de tempo inferior ao tempo de trânsito da onda na torre o valor da sobretensão para todas as ondas é o mesmo nestes momentos iniciais. A partir do tempo de trânsito, a onda refletida, cuja amplitude depende dos valores da impedância, passa a influenciar na definição do valor máximo da sobretensão resultante, determinando diferentes amplitudes.

A figura 6.6 mostra a variação da amplitude máxima das sobretensões desenvolvidas para injeção no topo e na lateral da estrutura considerando-se as sobretensões nas cadeias de isoladores central, lateral e a tensão entre a fase lateral e a parte metálica da estrutura mais próxima (vide figura 6.4 (b)).



(a) Injeção no Topo



(b) Injeção Lateral

Figura 6.6 - Valores máximos de sobretensão em cada região de análise de acordo com a resistência de pé de torre (a) injeção no topo; (b) injeção lateral.

Para facilitar a comparação dos resultados os valores de sobretensão nos diversos casos são quantificados na tabela 6.5.

Valor da Impedância Concentrada [Ω]	Valor da Sobretensão nos Isoladores [kV/kA]					
	Injeção no Topo			Injeção Lateral		
	Isolador Central	Isolador Lateral	Fase-Estrutura	Isolador Central	Isolador Lateral	Fase-Estrutura
10	13,9	15,1	13,8	13,3	14,7	13,9
20	18,0	19,7	18,5	17,4	19,3	18,7
30	21,8	23,9	22,8	21,2	23,5	22,9
40	25,1	27,7	26,6	24,6	27,4	26,8
50	28,3	31,1	30,1	27,8	30,9	30,4
60	31,1	34,3	33,3	30,6	34,1	33,6
70	33,7	37,2	36,3	33,3	37,0	36,6
80	36,1	39,9	39,0	35,7	39,7	39,4
90	38,4	42,5	41,8	38,0	42,3	42,0
100	40,4	44,7	44,2	40,1	44,6	44,3

Tabela 6.5 - Valores de sobretensão máxima para cada caso de impedância de pé de torre.

De acordo com os resultados, a cadeia de isoladores lateral apresenta sempre um maior valor de sobretensão para injeção de corrente, tanto no topo como na lateral. Para ser mais conservador, a análise dos resultados é baseada na sobretensão desenvolvida sobre o isolador lateral.

A semelhança nos resultados, tanto para injeção lateral quanto no topo mostra que o local de incidência de uma descarga na torre apresenta pouca influência no valor final da sobretensão nos pontos de interesse.

6.2.7 Comportamento da Torre Frente à Descarga Atmosférica com Sistema de Aterramento com Cabos Paralelos Horizontais

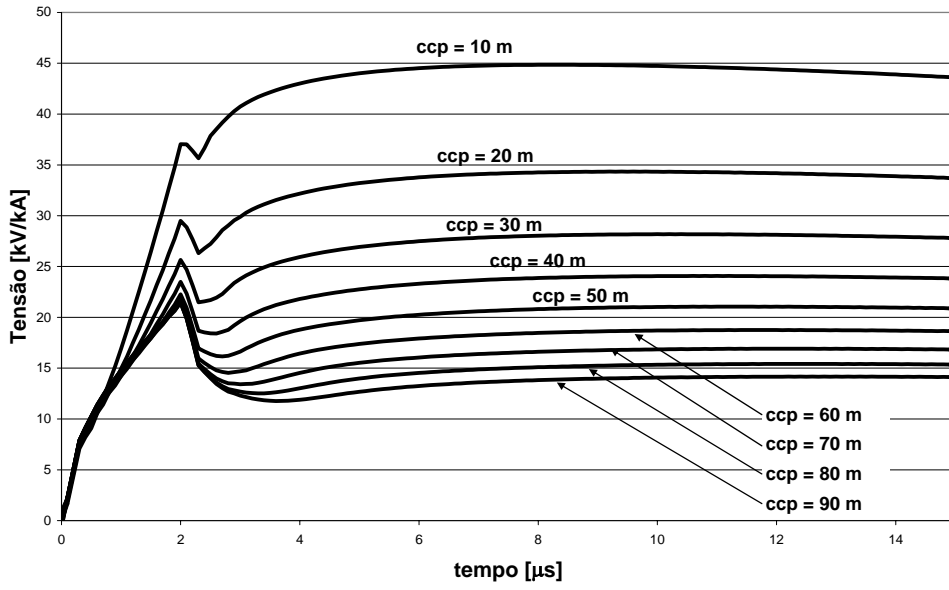
Nesta seção é investigado o comportamento da torre para solicitação de descarga atmosférica com sistema de aterramento composto por eletrodo (raio = 7 cm) e 4 condutores horizontais paralelos, colocados a 0,5 m de profundidade, com diferentes comprimentos.

Para exemplificar podemos observar a influência do comprimento do cabo horizontal na sobretensão na cadeia de isoladores central para um solo de resistividade fixa e $\epsilon_R = 30$, como apresentado na figura 6.7 (a), (b) e (c) a seguir.

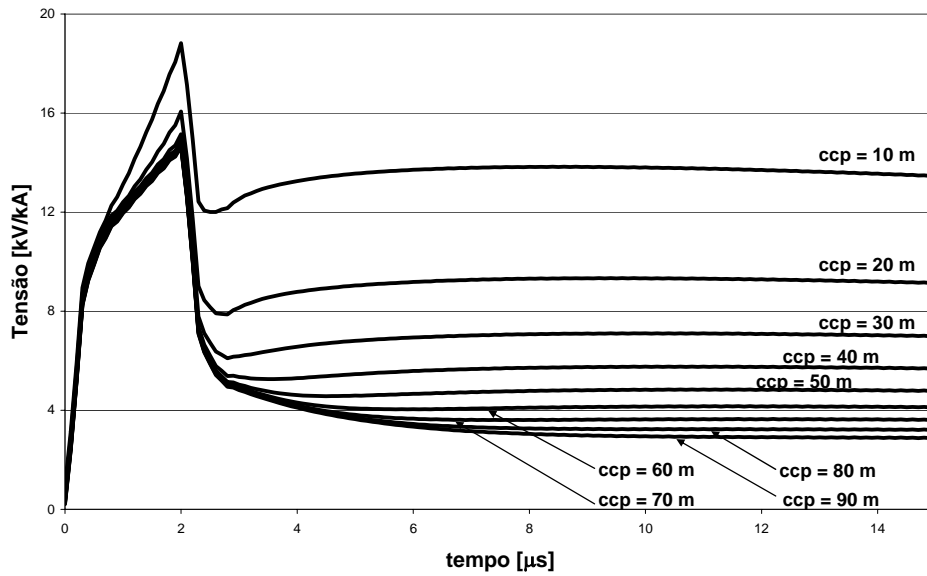
É evidente o fato que para 5000 $\Omega.m$ quanto maior for o comprimento do cabo paralelo⁵ maior será a reflexão negativa no sistema de aterramento e menor será a impedância impulsiva. Para os casos de resistividade menor, como 1000 e 100 $\Omega.m$, o aumento do condutor horizontal diminui o valor da impedância impulsiva até um limite, que corresponde ao comprimento efetivo do aterramento.

Para resistividade de 100 $\Omega.m$ (Fig. 6.7 c), as curvas de sobretensão praticamente se sobrepõem no período de tempo de interesse, para diferentes valores de comprimento do cabo paralelo. Isto denota que o comprimento efetivo é inferior (ou igual) a 10 m, para a onda de corrente considerada.

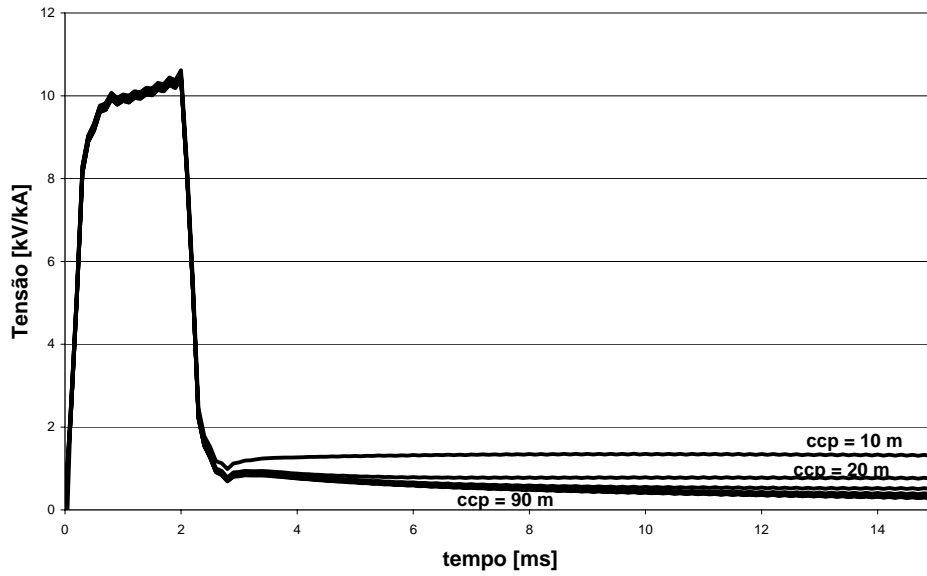
⁵ ccp nas figuras com as curvas, nesta e na próxima seção, significa Comprimento do Cabo Paralelo.



(a) Resistividade do solo de 5000 Ω.m.



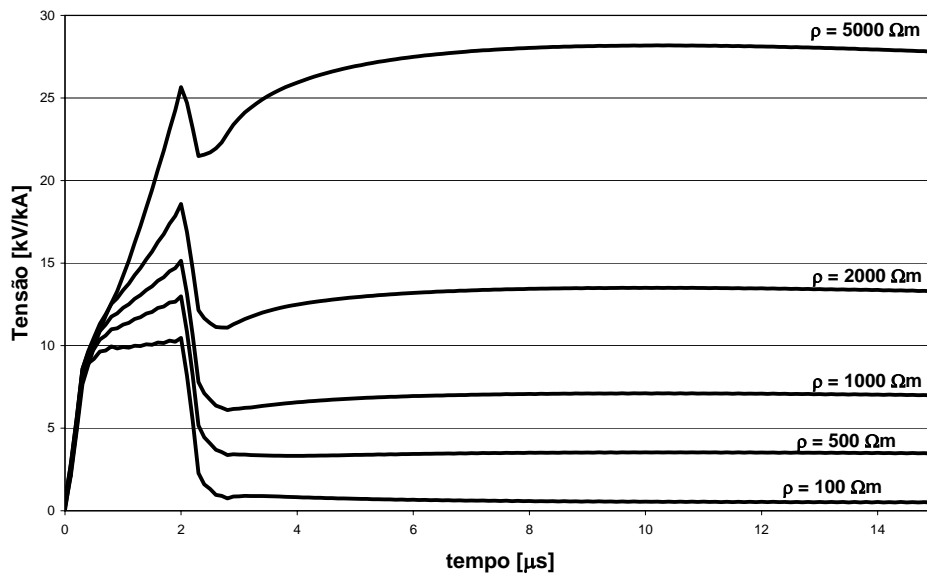
(b) Resistividade do solo de 1000 Ω.m.



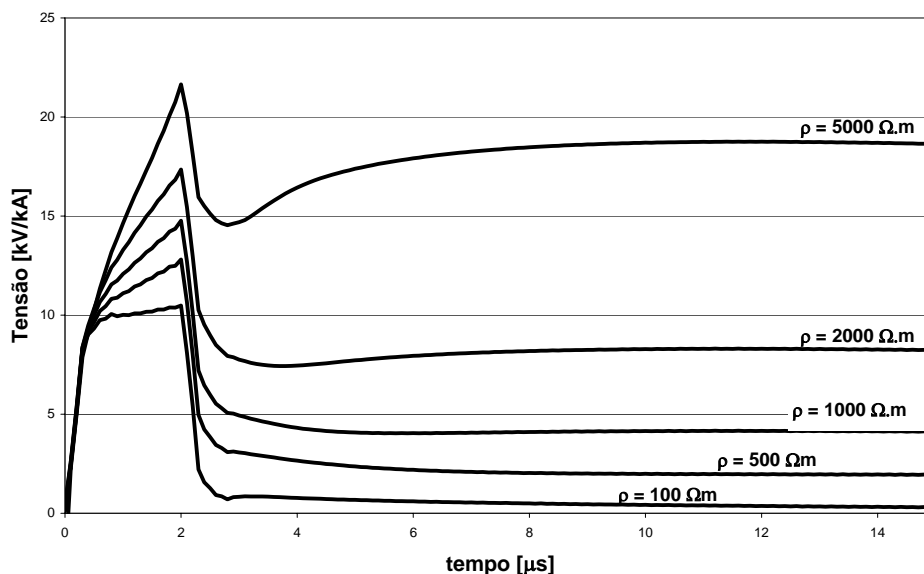
(c) Resistividade do solo de 100 Ω.m.

Figura 6.7 – Ondas de sobretensão na cadeia de isoladores central para diferentes comprimentos do cabo paralelo horizontal. (rampa, 1 kA, t_r 2 μ s, t_m 50 μ s).

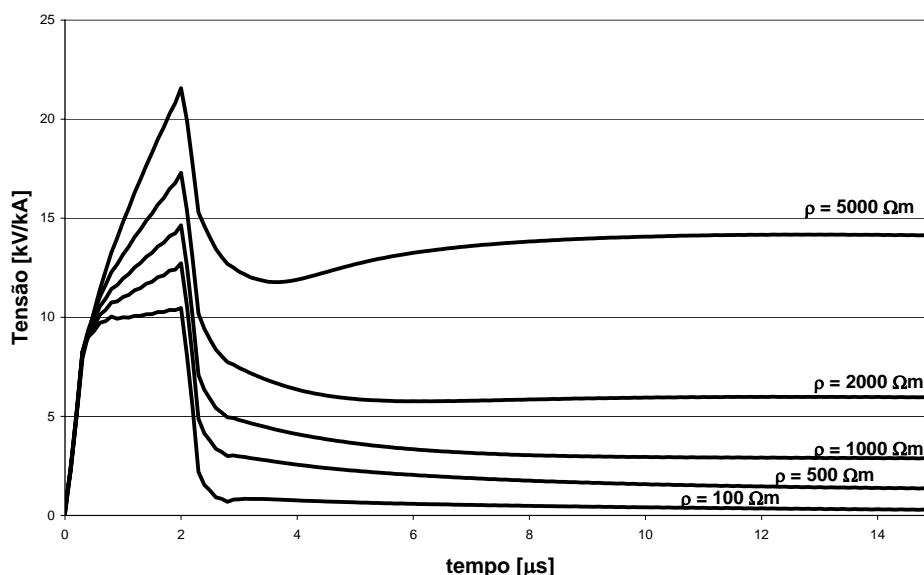
Também é possível analisar a influência da resistividade do solo, para a mesma cadeia de isoladores, com um valor fixo de comprimento do cabo paralelo. A figura 6.8 apresenta a variação da resistividade do solo, com $\epsilon_R = 30$ para um cabo contrapeso de 30 m de comprimento.



(a) Cabo horizontal de 30 m



(b) Cabo horizontal de 60 m



(c) Cabo horizontal de 90 m

Figura 6.8 - Ondas de tensão resultantes na cadeia de isoladores central para diferentes valores de resistividade do solo (rampa, 1 kA, t_r 2 μ s, t_m 50 μ s).

Pode-se observar, analisando-se as figuras apresentadas, que o comprimento do cabo paralelo e a resistividade do solo apresentam influência diferente na sobretensão resultante nas cadeias de isoladores. Colocando em um mesmo gráfico os valores da sobretensão máxima de acordo com a resistividade do solo e com o comprimento do cabo contrapeso é possível encontrar as regiões de melhor desempenho para cada caso como apresentado nas figuras 6.9 e 6.10 a seguir.

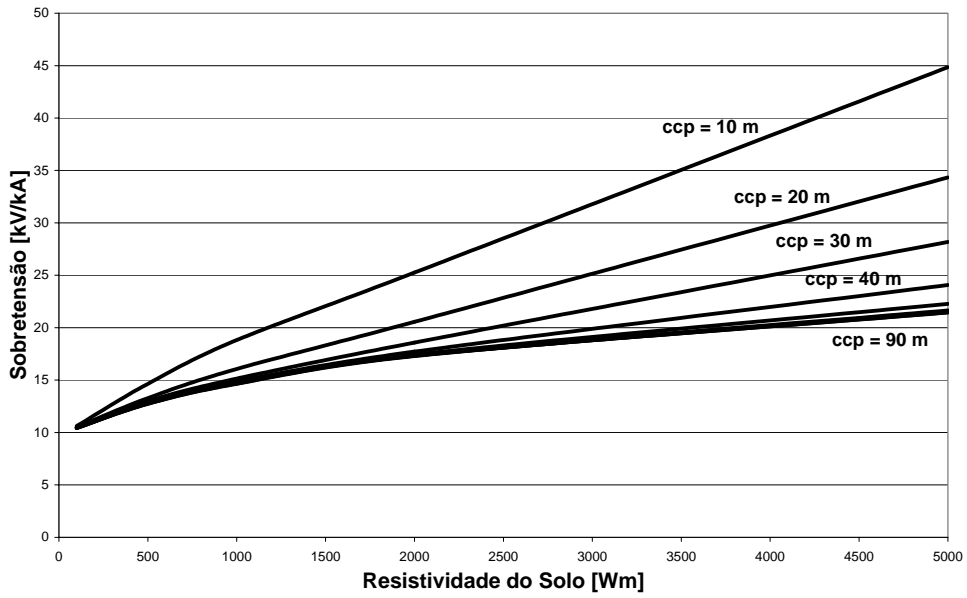
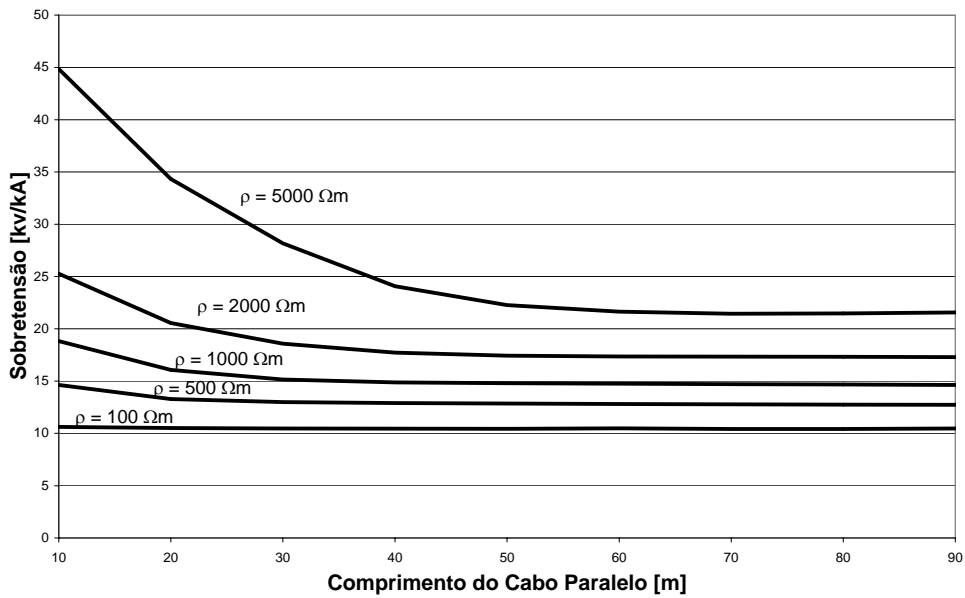
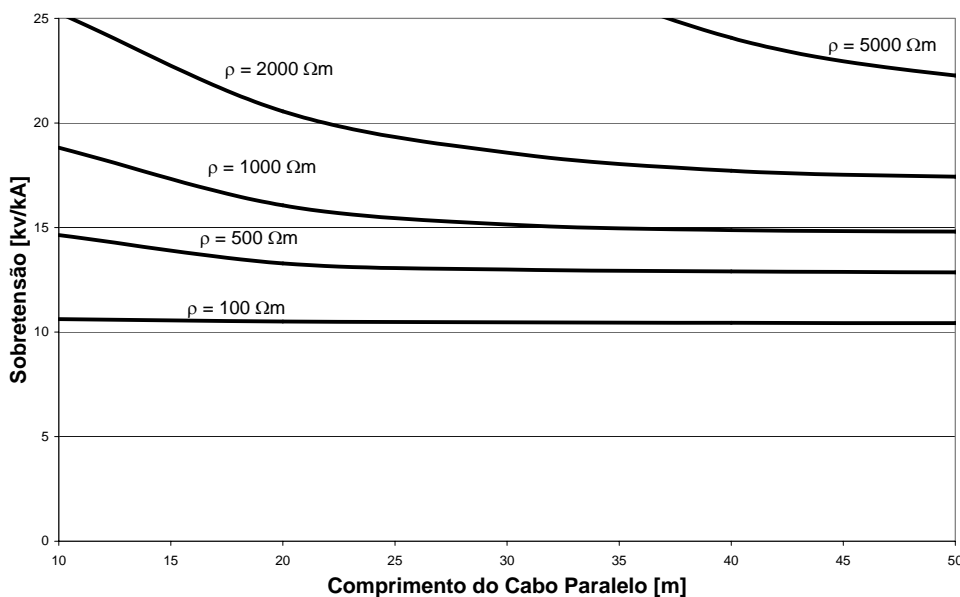


Figura 6.9 – Sobretensão resultante na cadeia de isoladores lateral em função do valor da resistividade o solo (rampa, 1 kA, t_f 2 μs , t_m 50 μs).

No caso da figura 6.9 anteriormente apresentada as curvas para os comprimentos de cabo horizontal de 60, 70, 80 e 90 m estão muito próximas.



(a)



(b)

Figura 6.10 – (a) Sobretensão resultante na cadeia de isoladores lateral em função do comprimento do cabo paralelo horizontal (b) Zoom dos resultados (rampa, 1 kA, t_f 2 μ s, t_m 50 μ s).

Para cada valor de resistividade do solo existe uma faixa de valores de comprimento do condutor contrapeso que apresenta maior influência na sobretensão resultante na cadeia de isoladores em dependência da resistividade do solo. Todavia, para certos valores de resistividade do solo, o aumento do comprimento do cabo contrapeso pouco influencia no valor da impedância impulsiva.

Para quantificar os resultados, a tabela anterior apresenta os valores de sobretensão máxima para a cadeia de isoladores lateral de acordo com a resistividade do solo e o comprimento do cabo contrapeso.

Comprimento do Cabo Paralelo [m]	Sobretensão na Cadeia de Isoladores Lateral [kV/kA]				
	Resistividade do Solo [Ω .m] ($\epsilon_R = 30$)				
	100	500	1000	2000	5000
10	11,4	15,9	20,6	27,7	50,1
20	11,3	14,4	17,5	22,5	38,3
30	11,2	14,1	16,5	20,3	31,5
40	11,2	14,0	16,2	19,4	26,9
50	11,2	13,9	16,1	18,8	24,5
60	11,1	13,9	16,0	18,9	23,8
70	11,2	13,8	16,0	18,9	23,5
80	11,2	13,8	16,0	18,9	23,6
90	11,1	13,8	15,9	18,9	23,7

Tabela 6.6 – Valores de sobretensão máxima na cadeia de isoladores lateral para os valores de resistividade do solo e comprimento do cabo paralelo horizontal.

6.2.8 Análise das Sobretensões no Pé de Torre com Sistema de Aterramento com Cabos Paralelos Horizontais

Conhecida a influência do sistema de aterramento no valor da sobretensão resultante na cadeia de isoladores, o próximo passo é o estudo específico do comportamento do sistema de aterramento com a análise das tensões e corrente que circulam no pé de torre.

Inspecionando o caso, tem-se que, quanto maior o valor da impedância de aterramento do pé da torre, menor será o valor da corrente transmitida ao solo e maior será o valor da sobretensão estabelecida entre o pé da torre e o terra remoto. As figuras 6.11 e 6.12, na seqüência, ilustram o comportamento das correntes e tensões de um sistema de aterramento com resistividade do solo de 5000 Ω.m e diferentes valores de cabo horizontal.

Na figura 6.12 as curvas para os valores de comprimento do cabo paralelo de 40, 50, 60, 70 e 80 m estão muito próximas e não foram rotuladas.

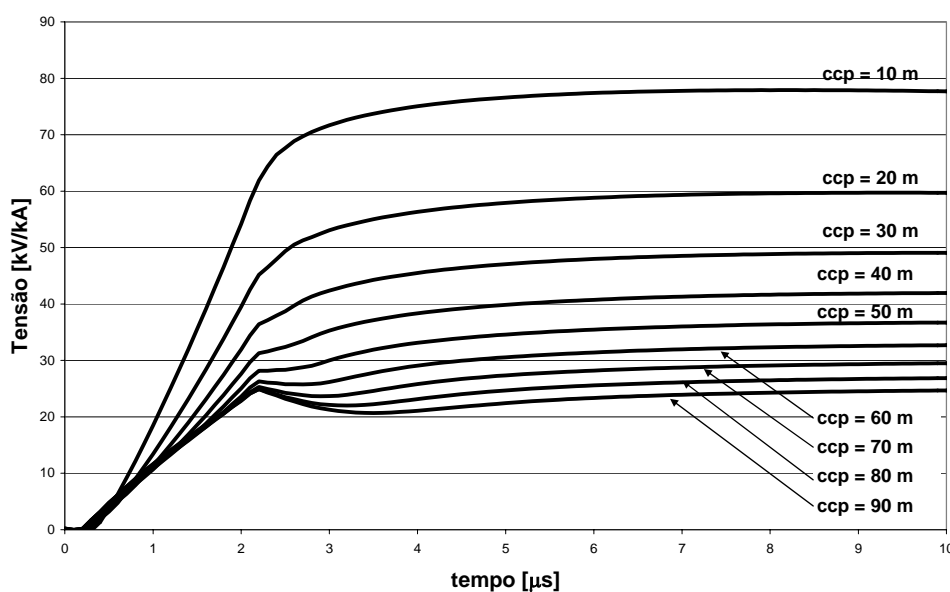


Figura 6.11 – Onda de tensão no pé de torre para resistividade do solo de 5000 Ω.m e diferentes comprimentos de cabo paralelo horizontal (rampa, 1 kA, t_r 2 μs, t_m 50 μs).

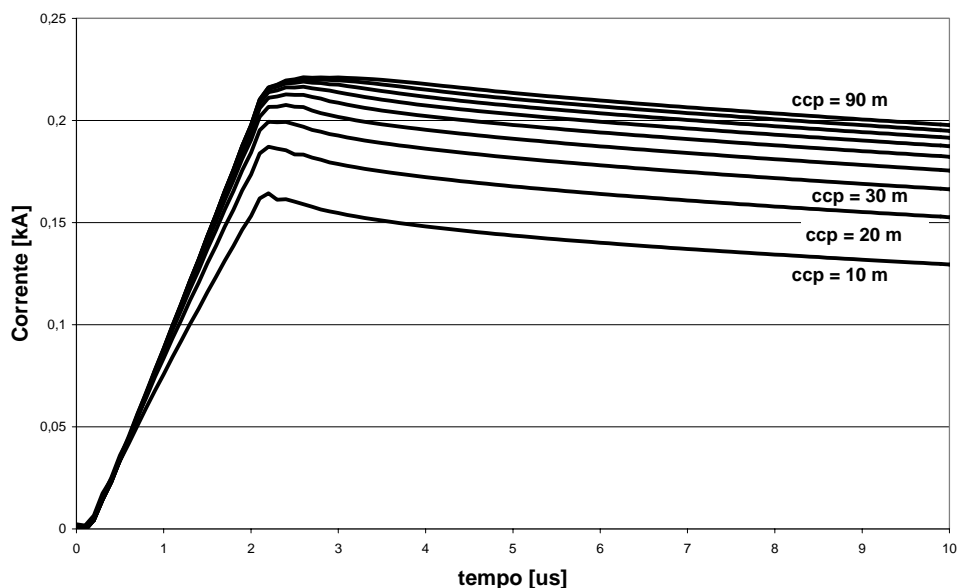


Figura 6.12 - Onda de corrente que flui pelo pé de torre para resistividade do solo de 5000 Ω.m e diferentes comprimentos de cabo paralelo horizontal (rampa, 1 kA, t_f 2 μs, t_m 50 μs).

Para tal estudo pode ser obtido o valor da impedância impulsiva de aterramento para as configurações de eletrodos, definida como a razão entre o valor máximo de sobretensão e o valor de pico da corrente. Os gráficos das duas figuras seguintes ilustram o comportamento da impedância impulsiva para a configuração de aterramento já descrita. Na figura 6.13 as curvas para comprimento do cabo paralelo de 50, 60, 70 e 80 m não foram rotuladas por estarem muito próximas.

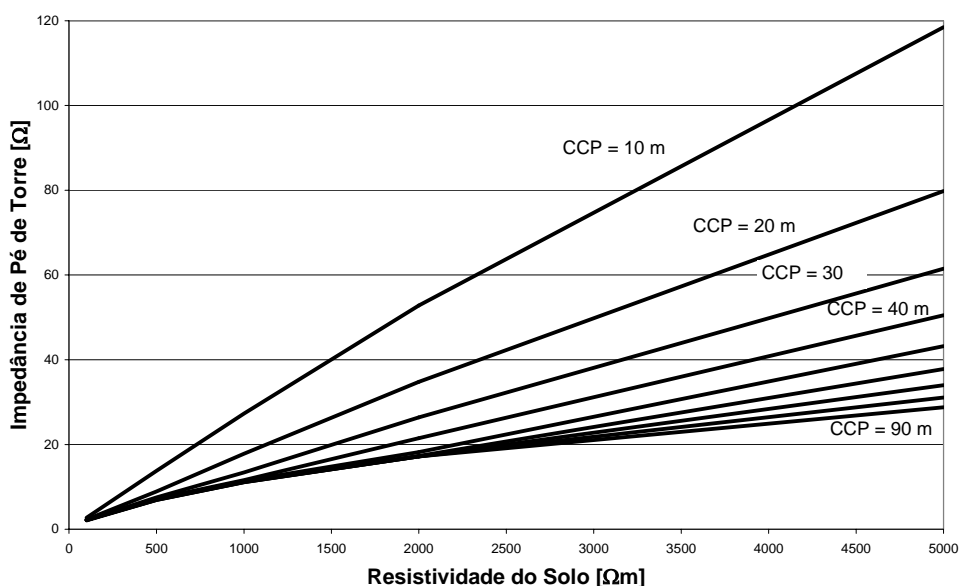


Figura 6.13 - Gráfico apresentando o valor da impedância impulsiva em função da resistividade do solo.

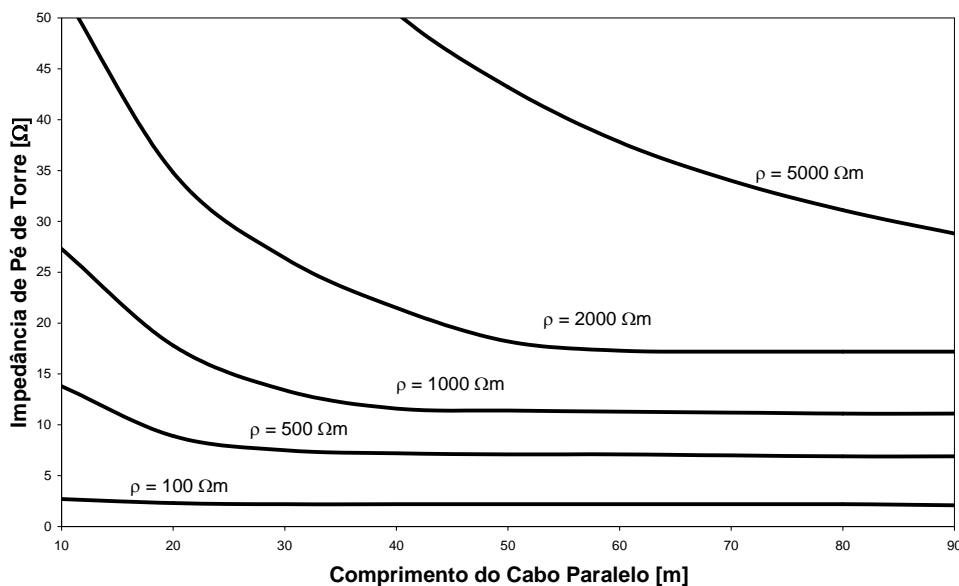


Figura 6.14 – Gráfico apresentando o valor da impedância impulsiva em função do comprimento do cabo paralelo horizontal.

Examinando os resultados, pode-se observar um comportamento semelhante ao da sobretensão na cadeia de isoladores, o que confirma a forte influência do sistema de aterramento nos valores da referida sobretensão.

Comprimento do cabo Paralelo [m]	Impedância Impulsiva de Aterramento [Ω]				
	Resistividade do Solo (Ω.m)				
	100	500	1000	2000	5000
10	2,7	13,8	27,3	52,8	118,5
20	2,3	8,9	17,8	34,8	79,8
30	2,2	7,5	13,4	26,4	61,5
40	2,2	7,2	11,6	21,5	50,5
50	2,2	7,1	11,4	18,2	43,2
60	2,2	7,1	11,3	17,3	37,8
70	2,2	7,0	11,2	17,2	34,0
80	2,2	6,9	11,1	17,2	31,1
90	2,1	6,9	11,1	17,2	28,8

Tabela 6.7 – Valores de impedância impulsiva para os valores de resistividade do solo e comprimento do cabo paralelo horizontal.

A tabela 6.7 apresenta os valores de impedância impulsiva obtidos para os casos analisados. Dependendo do valor da resistividade do solo, o acréscimo de comprimento nos cabos paralelos horizontais pouco influencia na redução da impedância impulsiva a partir de certo valor.

6.2.9 – Análise Geral dos Resultados Obtidos

Uma comparação importante realizada sobre os resultados obtidos da análise por impedância concentrada e por impedância impulsiva no pé-de-torre é a comparação das formas de onda resultantes de sobretensão na cadeia de isoladores.

Para o caso de resistência concentrada de 70Ω , e resistividade do solo de $5000 \Omega.m$ com comprimento do contrapeso de $20 m$ (vide tabelas 6.4 e 6.7) pode-se analisar as formas de onda de sobretensão (figura 6.15), onde é perceptível a diferença na dinâmica referente ao estabelecimento das sobretensões nos isoladores. O tempo de exposição à sobretensão para o caso de resistividade de $5000 \Omega.m$ e cabo paralelo de $20 m$ será maior que para uma impedância concentrada de 70Ω , isto devido a diferença no instante de tempo que a onda atinge o seu valor máximo, mesmo para diferença do valor máximo de $0,6 kV$ (aproximadamente 2%).

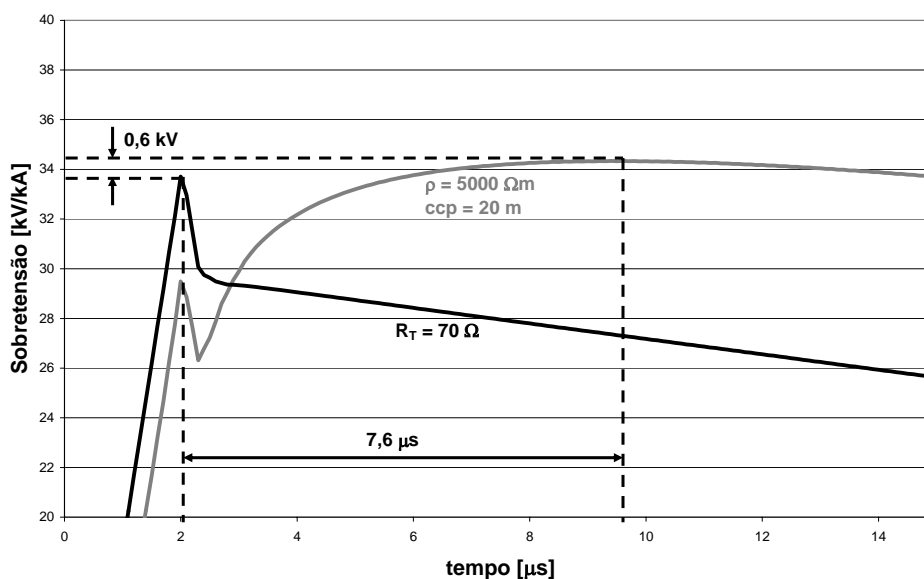


Figura 6.15 – Comparação entre as formas de onda na cadeia de isoladores lateral para aterramento de impedância concentrada e para aterramento de cabo paralelo horizontal.

Entretanto, existem também casos em que a resistência concentrada pode representar bem o sistema de aterramento, como no exemplo com resistência de aterramento de 20Ω , e resistividade do solo de $2000 \Omega.m$ com comprimento do paralelo de $60 m$ (vide tabelas 6.4 e 6.7).

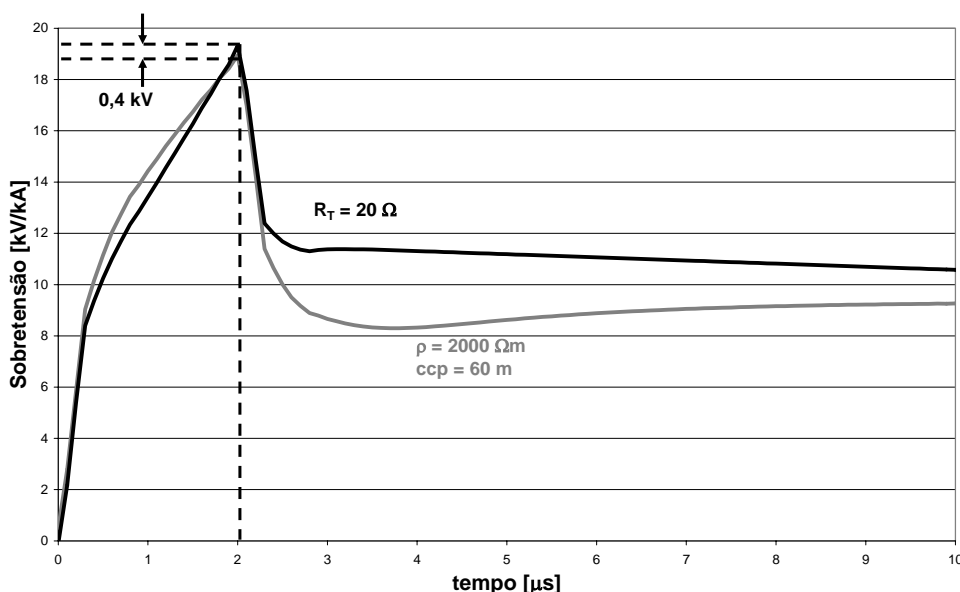


Figura 6.16 – Comparação entre as formas de onda na cadeia de isoladores lateral para aterramento de impedância concentrada e para aterramento de cabo paralelo horizontal.

Para este caso, com faixas de valores de sobretensão menores, as formas de onda representada pelos modelos apresentam o mesmo tempo de pico (2 μs) diferenciando-se apenas por 0,4 kV (aproximadamente 2%), sendo o intervalo de tempo em que as formas de onda diferem é posterior ao pico.

6.3 Segundo Caso Estudado: Linha de 69 kV

6.3.1 Introdução ao Caso

Considera-se uma configuração de linha de transmissão típica para nível de 69 kV com objetivo de avaliar a sobretensão resultante nas cadeias de isoladores devido à incidência de descarga atmosférica. Na avaliação deste caso foi analisado o efeito da aplicação de uma técnica não convencional de instalação de condutores aterrados posicionados abaixo dos condutores energizados⁶ (*underbuilt cables*).

⁶ Por não existir uma tradução literal para o termo *underbuilt cables* estes serão denominados os como “cabos inferiores aterrados”, em referência à posição so a fase e à sua sua conexão à torre metálica em contato com o solo.

6.3.2 Configuração Analisada

A estrutura analisada é comum em sistemas de transmissão do norte brasileiro em linhas de 69 kV, que usualmente apresentam número elevado de desligamentos. A configuração consiste em uma torre metálica, auto-portante, com aproximadamente 25 (vinte cinco) metros de altura, que sustenta 01 (um) condutor pára-raios e 06 (seis) condutores energizados, sendo 01 (um) condutor por fase em circuito duplo. As principais dimensões da configuração são apresentadas na figura 6.17.

A torre foi representada pelas suas principais barras metálicas de sustentação através de segmentos que possuem comprimento variado, de acordo com o tamanho da barra, e diâmetro de 3,5 cm.

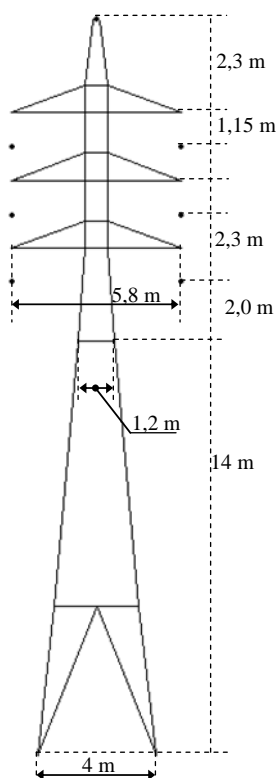


Figura 6.17 – Diagrama esquemático com as dimensões da torre de 69 kV.

A configuração de aterramento adotada é a de cabos contrapeso. Nas simulações considerou-se que tais cabos partem de eletrodos verticais de 2 m, que representam as pernas metálicas enterradas da torre, como indicado na figura 6.18.

O eletrodo vertical foi modelado como um cilindro de 10 centímetros de diâmetro. O cabo contrapeso de aço tem meio centímetro de diâmetro, e está enterrado a meio metro de profundidade, sendo paralelos ao solo. Na figura 6.18 L é o tamanho do cabo contrapeso e D a faixa

de passagem.

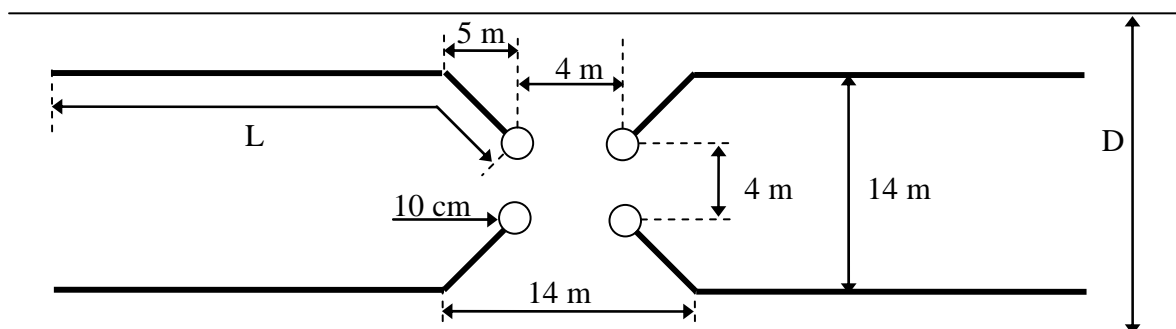


Figura 6.18 – Visão superior da configuração de aterramento da torre de 69 kV.

Os cabos pára-raios têm diâmetro de 0,6 centímetros e os condutores fase possuem diâmetro de 2,26 centímetros. Para efeito de simulação, considerou-se que estes cabos aéreos possuem, comprimento de 30 metros em cada sentido da linha a partir da torre e têm suas impedâncias casadas nas suas extremidades. A injeção de corrente foi escolhida como sendo no topo da torre, no ponto de sustentação do condutor pára-raios, e as análises concentram-se nas sobretensões resultantes nas cadeias de isoladores.

De acordo com a simetria do problema, para uma incidência no topo, as sobretensões nas cadeias de isoladores posicionadas a uma mesma altura possuem o mesmo valor. Logo, o referido estudo leva em consideração apenas altura da cadeia de isoladores, com a seguinte nomenclatura de acordo com a Figura 6.19 (b):

- Isolador Superior - Tensão entre os pontos (1) e (4);
- Isolador Central - Tensão entre os pontos (2) e (5);
- Isolador inferior - Tensão entre os pontos (3) e (6).

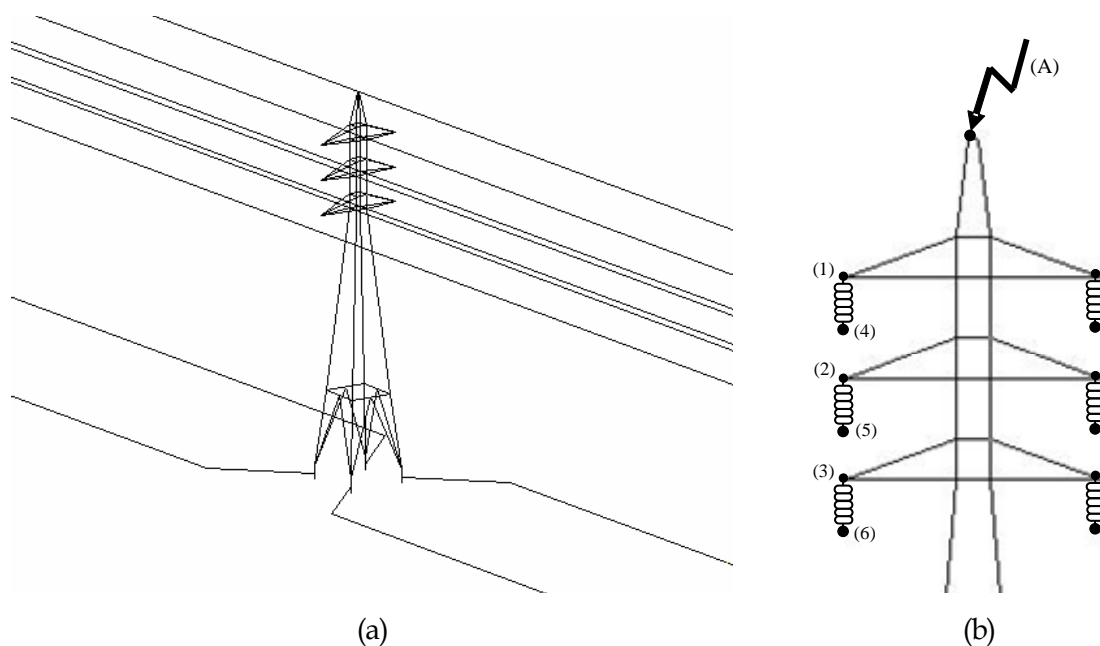


Figura 6.19 – (a) Configuração completa do sistema simulado; (b) Diagrama apresentando o ponto de injeção de corrente e os pontos de medição.

6.3.3 Parâmetros e Forma de onda Utilizada

A análise de sensibilidade desenvolvida a partir das simulações considerou apenas a variação das impedâncias concentradas, correspondentes aos aterramentos das torres. Em seguida, para os diferentes valores de impedância foi simulada a existência de condutores aterrados posicionados abaixo das fases (*underbuilt cables*). As condições analisadas são elencadas:

Impedância concentrada: 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100 Ω ;

Cabos inferiores aterrados: 1 único condutor, 2 condutores paralelos.

Os condutores inferiores foram posicionados à altura de 14 m da superfície do solo, sendo que, no caso de um único condutor, este foi posicionado no eixo de simetria da torre e, no caso de dois condutores, os mesmos foram posicionados a 1,2 m de distância horizontal, como apresenta a figura 6.20 a seguir.

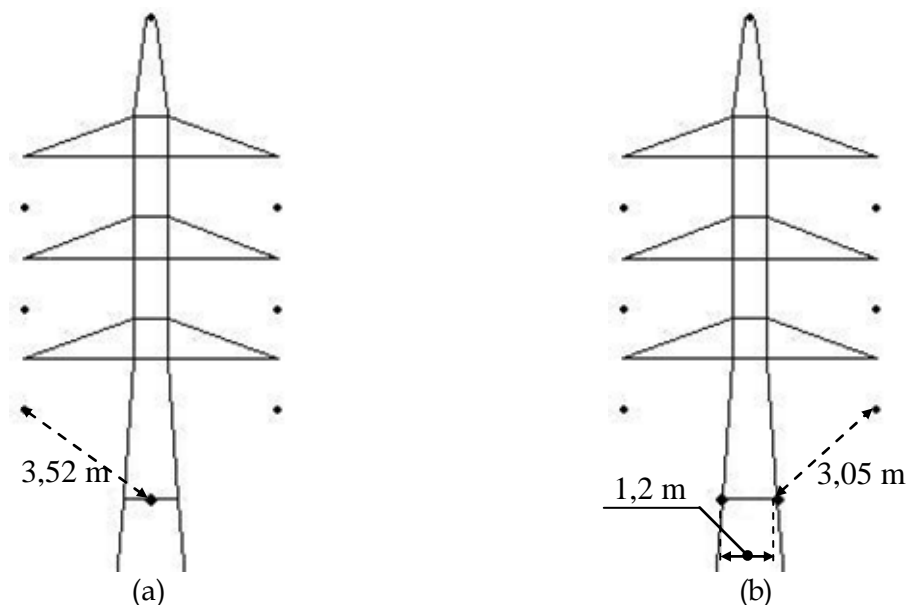


Figura 6.20 – Disposição dos condutores inferiores aterrados na configuração da torre (a) cabo único e (b) dois cabos paralelos.

Nesta análise foi também utilizada a forma de onda do tipo rampa com amplitude de 1 kA, tempo de frente 2 μ s e tempo de meia onda de 50 μ s.

6.3.4 Análise dos Resultados

Em termos das sobretensões resultantes, na cadeia de isoladores, as avaliações estão organizadas nas seções indicadas:

Seção 6.3.5 – Análise do caso base, onde a impedância de aterramento é tratada como concentrada, na base da torre, com a finalidade de conhecer a dinâmica do estabelecimento da sobretensão na cadeia de isoladores;

Seção 6.3.6 – Estuda-se o estabelecimento da sobretensão nas cadeias de isoladores da linha de transmissão para o caso onde a impedância de aterramento é tratada como concentrada, na base da torre, com a inclusão de um condutor inferior aterrado conectado à torre;

Seção 6.3.7 – Estuda-se o estabelecimento da sobretensão nas cadeias de isoladores da linha de transmissão para o caso onde a impedância de aterramento é tratada como concentrada, na base da torre, com a inclusão de dois cabos inferiores aterrados;

Seção 6.3.8 - Apresenta uma breve comparação dos resultados das análises anteriormente efetuadas, com base nos valores e nas formas de onda e das sobretensões nos isoladores.

6.3.5 - Comportamento da Torre Frente à Descarga Atmosférica com Sistema de Aterramento Representado por Impedância Concentrada

Considerando-se as sobretensões resultantes nas cadeias de isoladores, que poderia eventualmente levar à falha através do mecanismo de *backflashover* para a configuração básica da linha (figura 6.19).

Para ilustrar os resultados, a figura 6.21 mostra as ondas de sobretensão resultantes no isolador central da estrutura de 69 kV para os diferentes valores de impedância concentrada.

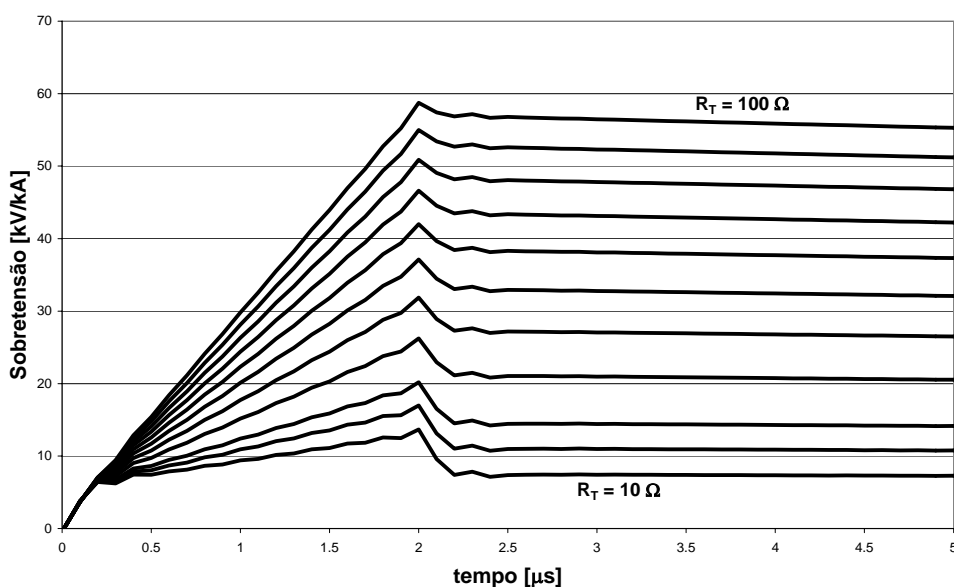


Figura 6.21 - Sobretensão estabelecida no isolador central devido a uma incidência no topo da estrutura.

É possível agrupar os resultados de acordo com o valor máximo de sobretensão para cada valor de impedância nos três tipos de isoladores, figura 6.22 e tabela 6.8, apresentando a forma como cresce a sobretensão para cada caso.

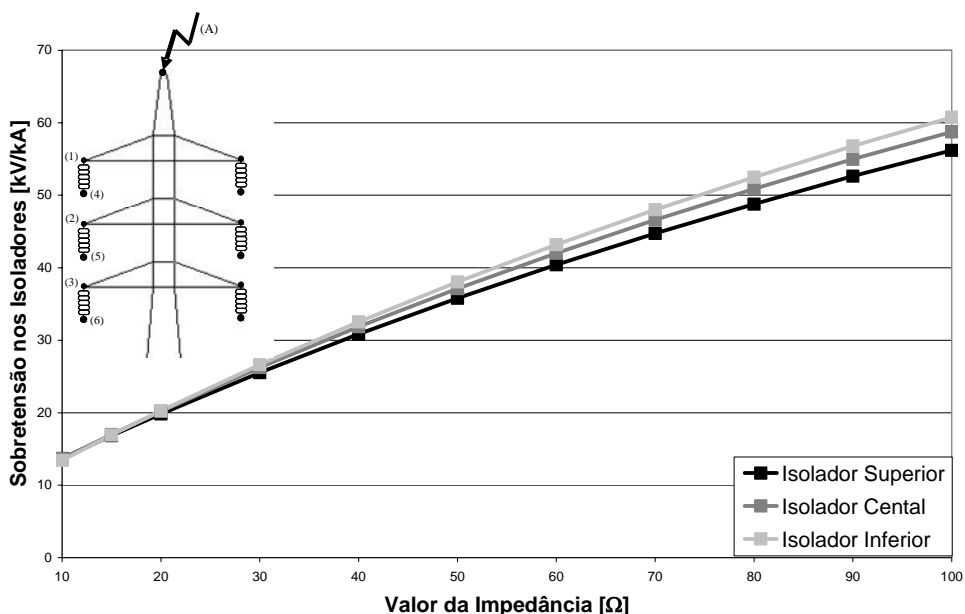


Figura 6.22 - Valores máximos de sobretensão em cada região de análise de acordo com a impedância de pé de torre.

É notório que, para a maioria dos casos, o isolador superior apresenta menores níveis de sobretensão. Isto se deve à proximidade do cabo pára-raios, em relação à fase superior, o que aumenta o acoplamento eletromagnético entre os mesmos e reduz a sobretensão diferencial sobre o isolador superior.

Sem cabo inferior aterrado	Valor da Sobretensão nos Isoladores [kV/kA]		
Valor da Impedância Concentrada [Ω]	Isolador Superior	Isolador Central	Isolador Inferior
10	13,68	13,66	13,42
15	16,81	16,98	16,91
20	19,83	20,19	20,27
30	25,54	26,23	26,62
40	30,84	31,86	32,53
50	35,80	37,11	38,05
60	40,42	42,01	43,19
70	44,75	46,60	48,01
80	48,77	50,87	52,49
90	52,64	54,97	56,79
100	56,20	58,74	60,75

Tabela 6.8 - Tabela apresentando os valores de sobretensão máxima para cada caso de impedância de pé de torre concentrada.

Considerando-se uma corrente de 45 kA (valor mediano da Estação Morro do Cachimbo), verifica-se que uma impedância de aterramento de 10 Ω resultaria em sobretensão da ordem de 610 kV nos

isoladores, resultado superior ao NBI típico da linha de 69 kV da ordem de 450 kV (valor aproximadamente igual nos três isoladores).

Para uma corrente de 30 kA (valor mediano de Berguer) e impedância de 10 Ω a sobretensão resultante na cadeia de isoladores seria da ordem de 410 kV, neste caso inferior ao NBI típico da linha.

Complementando-se a simulação, verificou-se que para onda de corrente de 45 kA considerada, seria requerido um valor de impedância de aterramento da ordem de 8 Ω para que a sobretensão não ultrapasse o NBI da linha.

6.3.6 – Comportamento da Torre Frente à Descarga Atmosférica com Utilização de um Cabo Inferior Aterrado

Neste estágio avalia-se a influência da colocação de um cabo inferior aterrado posicionado a 2 m de distância vertical dos condutores energizados inferiores, como mostra a figura 6.23.

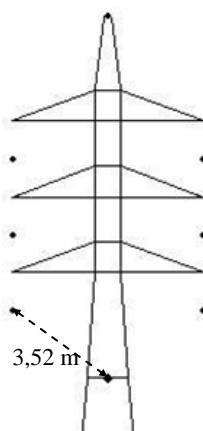


Figura 6.23 – Configuração da torre de 69 kV com a instalação de um cabo inferior aterrado.

Para ilustrar o comportamento das sobretensões nos isoladores, a figura 6.23 apresenta as formas de ondas de sobretensão nos isoladores centrais para injeção de corrente no topo da torre, com presença de um cabo inferior aterrado.

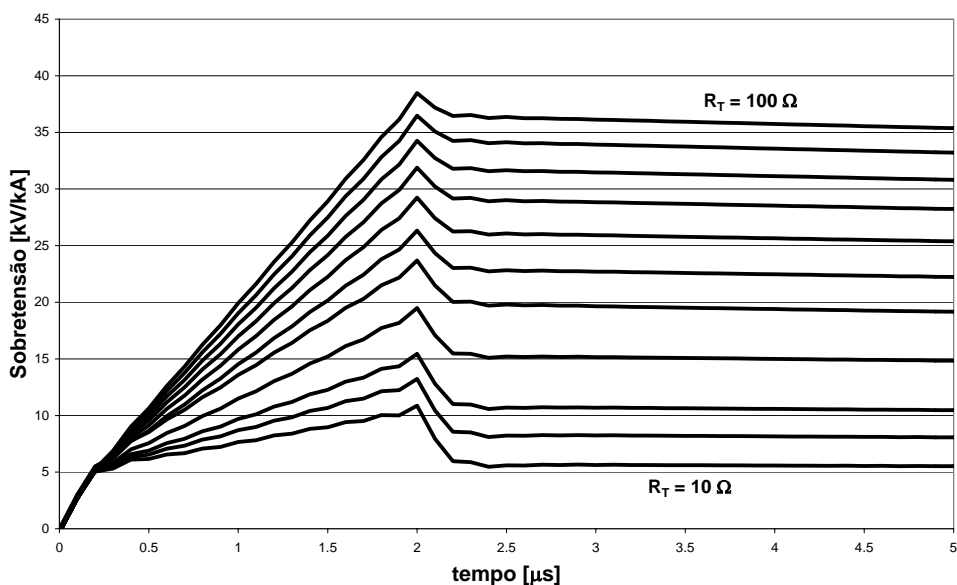


Figura 6.24 – Ondas de tensão resultantes na cadeia de isoladores central, com instalação de um cabo inferior aterrado, para diferentes valores de resistência de pé de torre.

Como no caso anterior o valor da sobretensão de pico diminui com o aumento da impedância de aterramento, entretanto os valores máximos atingidos são menores, especialmente para o caso dos isoladores inferiores como apresenta a figura 6.24.

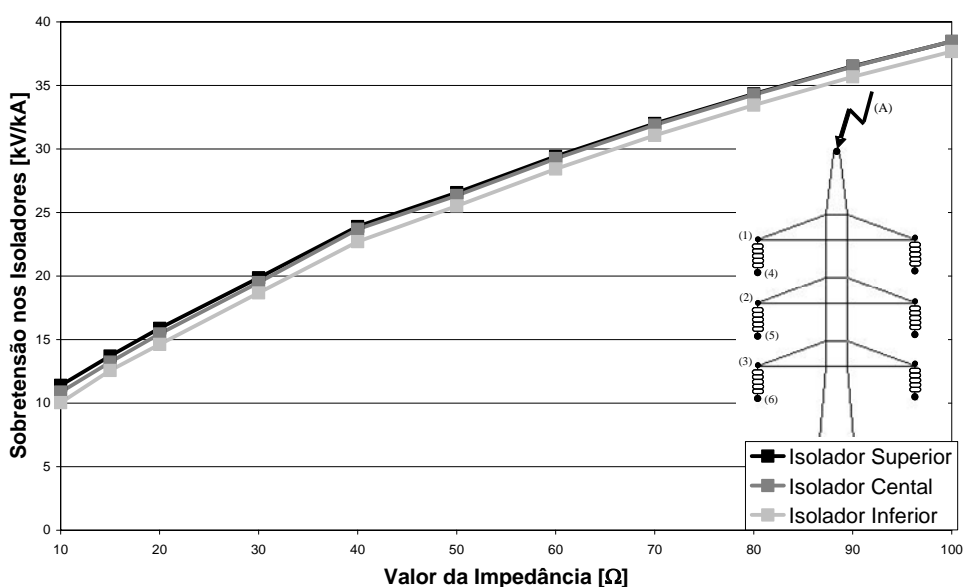


Figura 6.25 – Valores máximos de sobretensão em função da resistência de pé de torre com a instalação de um cabo inferior aterrado.

Para quantificar os resultados, a tabela a seguir apresenta os valores máximos de sobretensão para cada caso com um cabo inferior aterrado.

Um cabo inferior aterrado	Valor da Sobretensão nos Isoladores [kV/kA]		
Valor da Impedância Concentrada [Ω]	Isolador Superior	Isolador Central	Isolador Inferior
10	11,40	10,87	10,03
15	13,71	13,23	12,57
20	15,89	15,45	14,62
30	19,86	19,49	18,67
40	23,90	23,68	22,70
50	26,56	26,33	25,52
60	29,41	29,24	28,43
70	32,00	31,88	31,07
80	34,33	34,26	33,45
90	36,51	36,48	35,68
100	38,46	38,47	37,67

Tabela 6.9 - Tabela apresentando os valores de sobretensão máxima para cada caso de impedância de pé de torre concentrada com um cabo inferior aterrado.

6.3.7 – Comportamento da Torre Frente à Descarga Atmosférica com Utilização de dois Cabos Inferiores Conectados a Torre

Nesta seção avaliou-se o efeito da inclusão de dois cabos inferiores aterrados, paralelos, posicionados a 2 m de distância vertical dos condutores energizados inferiores, e distanciados entre si de 1,2 m como mostra a figura 6.26.

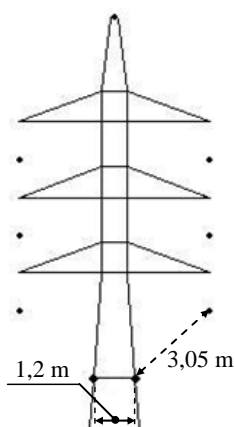


Figura 6.26 – Configuração da torre de 69 kV com a instalação de dois cabos inferiores aterrados.

A figura 6.25 ilustra os resultados, mostrando as sobretensões resultantes na cadeia de isoladores central. Observa-se que os valores de pico sofrem maior redução que no caso anterior. Percentualmente, a maior redução ocorre no isolador inferior.

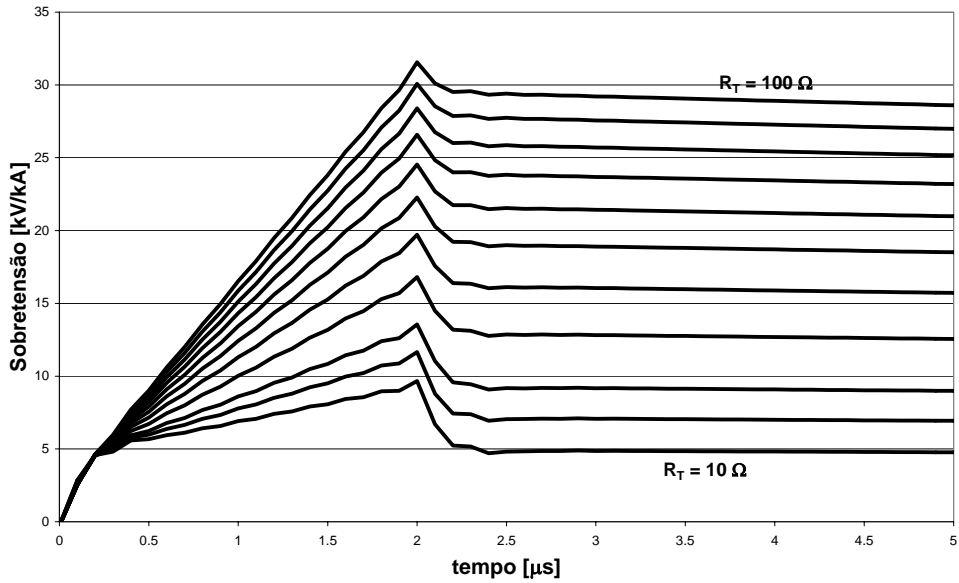


Figura 6.27 – Ondas de tensão resultantes na cadeia de isoladores central, com instalação de dois cabos inferiores aterrados, para diferentes valores de resistência de pé de torre.

O comportamento para os valores máximo está ilustrado na figura 6.26 abaixo, apresentando grande redução da solicitação, sobretudo na cadeia de isoladores inferior.

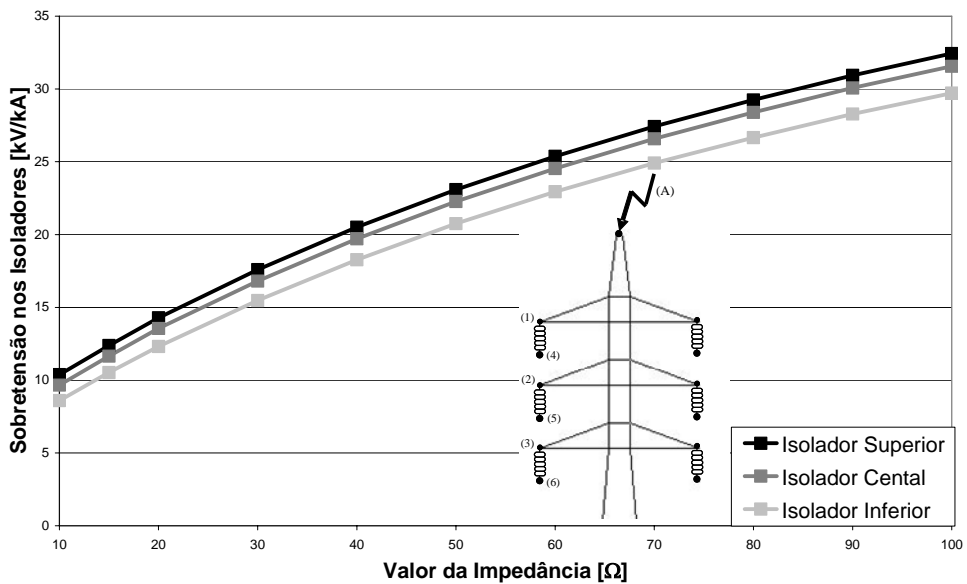


Figura 6.28 – Valores máximos de sobretensão em função da resistência de pé de torre com a instalação de dois cabos inferiores aterrados.

Os valores máximos para cada caso apresentado anteriormente são mostrados na tabela 6.10 a seguir.

Dois cabos inferiores aterrados	Valor da Sobretensão nos Isoladores [kV/kA]		
	Isolador Superior	Isolador Central	Isolador Inferior
Valor da Impedância Concentrada [Ω]			
10	10,38	9,66	8,60
15	12,38	11,65	10,53
20	14,28	13,55	12,32
30	17,59	16,81	15,47
40	20,51	19,71	18,27
50	23,09	22,27	20,75
60	25,37	24,54	22,94
70	27,42	26,58	24,91
80	29,25	28,39	26,66
90	30,93	30,07	28,28
100	32,43	31,56	29,72

Tabela 6.10 - Valores de sobretensão máxima para cada caso de impedância de pé de torre concentrada dois cabos inferiores aterrados.

A figura 6.29 sintetiza os resultados dos itens 6.3.5 a 6.3.7 para fins de comparação e indicação da influência nas práticas nos níveis de sobretensão.

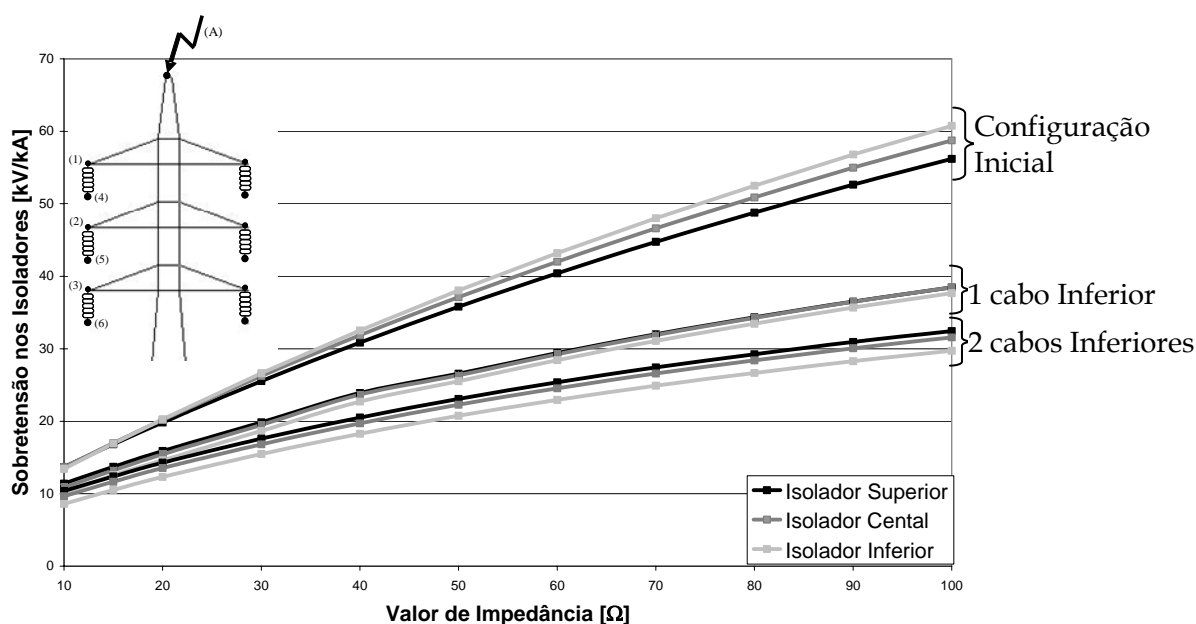


Figura 6.29 – Comparação dos valores máximos de sobretensão em função da resistência de pé de torre para os casos analisados.

6.3.8 – Análise Geral dos Resultados Obtidos

No emprego da técnica convencional de redução da impedância de pé de torre, para se assegurar que a sobretensão nas cadeias de isoladores não ultrapasse o NBI da linha, é requerido valor de

impedância inferior a 8Ω (para valor de corrente de 45 kA).

Por outro lado, quando não é possível alcançar tal valor de impedância (por condições de valor elevado de resistividade do solo ou restrição de área para instalação de aterramento), mas atinge-se valores da ordem ou pouco superior a 10Ω , pode-se recorrer à técnica não convencional de instalação de cabos inferiores aterrados para se conseguir uma redução adicional.

Uma análise comparativa é apresentada na figura 6.30, mostrando a redução de sobretensão na cadeia de isoladores superior, a partir da instalação destes cabos, no caso de uma impedância de pé de torre de 10Ω .

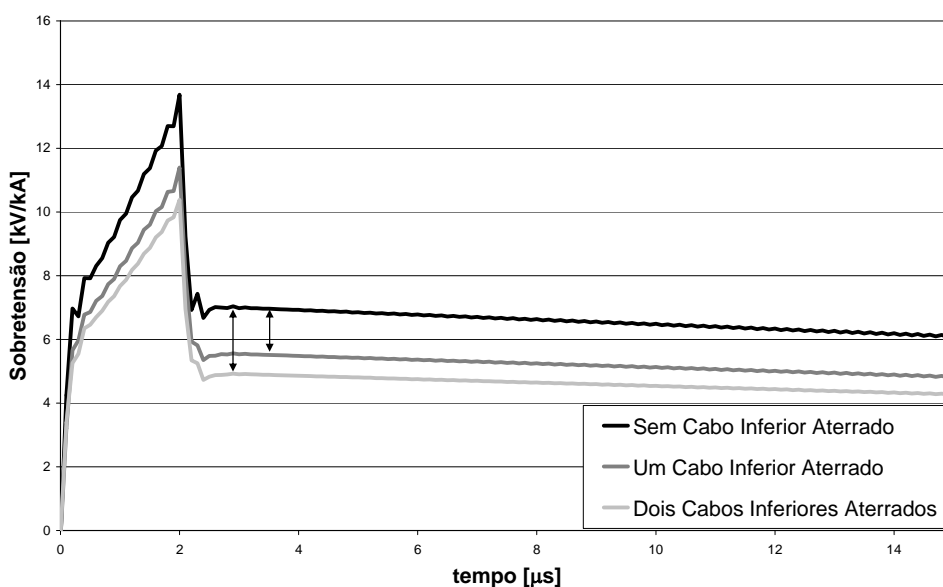


Figura 6.30 – Gráfico comparativo apresentando as sobretensões na cadeia de isoladores superior com resistência de pé de torre de 10Ω .

Na tabela 6.11 são apresentados os resultados até o valor de impedância de 30Ω , com os valores em kV/kA e em redução percentual comparada com o caso sem o condutor inferior aterrado.

Como esperado, já acontece redução substancial com a inclusão de um único condutor, sendo apenas incremental para o caso de um segundo condutor instalado. Outro fato é o aumento da redução percentual com o crescimento da impedância de pé de torre. Tal fato pode ser caracterizado pelo aumento da corrente que circula nos condutores de guarda para o aumento da impedância de pé de torre, pois uma quantidade maior de corrente é refletida para a torre com o aumento da impedância de pé de torre.

Isolador / Caso	Valor da Sobretensão máxima nos isoladores [kV/kA] (%)			
	Impedância de Pé de Torre			
	10 Ω	15 Ω	20 Ω	30 Ω
Superior				
Configuração original	13,7 (100)	16,8 (100)	19,8 (100)	25,5 (100)
1 Cabo Inferior Aterrado	11,4 (83,2)	13,7 (81,5)	15,9 (80,3)	19,9 (78,0)
2 Cabos Inferiores Aterrados	10,4 (75,9)	12,4 (73,8)	14,3 (72,2)	17,6 (69,0)
Central				
Configuração original	13,7 (100)	17,0 (100)	20,2 (100)	26,2 (100)
1 Cabo Inferior Aterrado	10,9 (79,6)	13,2 (77,6)	15,4 (76,2)	19,5 (74,4)
2 Cabos Inferiores Aterrados	9,7 (70,8)	11,7 (68,8)	13,5 (66,8)	16,8 (64,1)
Inferior				
Configuração original	13,4 (100)	16,9 (100)	20,3 (100)	26,6 (100)
1 Cabo Inferior Aterrado	10,0 (74,6)	12,6 (74,6)	14,6 (71,9)	18,7 (70,3)
2 Cabos Inferiores Aterrados	8,6 (64,2)	10,5 (62,1)	12,3 (60,6)	15,5 (58,3)

Tabela 6.11 - Comparação entre os valores de sobretensão máxima nas cadeias de isoladores para baixos valores de resistência de pé de torre.

A consideração anterior, de maior redução percentual para casos de maiores impedância de pé de torre, mostra que esta técnica de utilização de condutores inferiores aterrados pode ser aplicada a linhas de transmissão de maior tensão de operação e apresentar boas reduções dos níveis de sobretensão nos isoladores.

Para que o NBI fosse ultrapassado seria necessário que a corrente da descarga incidente excedesse os valores indicados na tabela 6.12 para impedância de 10 Ω e 15 Ω nas condições:

Configuração	Valor máximo de Corrente de Descarga	
	10 Ω	15 Ω
Configuração original	32,8 kA	26,8 kA
1 Cabo Inferior Aterrado	39,5 kA	32,8 kA
2 Cabos Inferiores Aterrados	43,3 kA	36,3 kA

Tabela 6.12 - Valores máximos de corrente de pico para as configurações de aterramento da torre de 69 kV.

Percebe-se que a condição desejada é se alcançar 8 Ω de impedância ou alternativamente 10 ou 15 Ω com uso de cabos aterrados localizados abaixo das fases.

Vale ressaltar que a idéia de implementar esta prática não requer que os cabos inferiores sigam ao longo de toda linha. Basta a sua instalação em dois ou quatro vãos adjacentes à torre em que se deseja minimizar a sobretensão.

7 Conclusões e Contribuições

7.1 - Introdução

Basicamente o trabalho se desenvolveu segundo duas vertentes: (1) a constituição de um sistema de informações com a base de dados relativos às linhas de transmissão, necessários às avaliações de desempenho destas frente a descargas atmosféricas; (2) investigação das sobretensões desenvolvidas nos isoladores de linhas de transmissão de 230 kV e 69 kV, a partir de simulação computacional, envolvendo a avaliação de fenômenos de influência e algumas técnicas alternativas de melhoria de desempenho.

7.2 – Resultados Desenvolvidos

O resultado objetivo da primeira etapa do trabalho foi o desenvolvimento de um aplicativo computacional, o LT-Info, sistema para tratamento de informações referentes a linhas de transmissão. O aplicativo é de alto nível, capaz de constituir uma estrutura de dados sólida. O seu desenvolvimento levou as seguintes contribuições consideradas de relevo:

- Estabelecimento dos principais atributos para serem tratados no sistema com objetivo de promover melhorias no estudo do desempenho de linhas contra descargas atmosféricas;
 - Organização básica para o tratamento das informações com as formas de
-

visualização e armazenamento de cada estrutura de dados dos atributos relevantes da linha;

- Estabelecimento dos principais padrões de tratamento de dados para a representação abstrata dentro do sistema, com desenvolvimento das principais classes (definições dos objetos e suas respectivas operações e serviços) dentro do código da programação;
- Implementação das medidas de segurança e tratamento de arquivo dentro do sistema de informação;
- Abertura para execução de propostas futuras com objetivo de aprimorar de acordo com a necessidade de cada sistema de transmissão de energia.

No que concerne à investigação dos desligamentos de linhas de transmissão, para cada caso estudado foram obtidas conclusões relevantes. Considera-se que vale destacar algumas destas conclusões:

- Sugere-se a adoção de uma impedância de aterramento da torre não superior a 40 Ω para o bom desempenho da linha de 230 kV (assegura sobretensão na cadeia de isoladores inferior ao NBI da linha para uma corrente de descarga de 45 kA - TSI da linha: 1200 kV).
- Para a linha de 69 kV sugere-se a adoção de uma impedância não superior a 8 Ω (para uma corrente de descarga de 45 kA e TSI da linha de 450 kV).
- Verificou-se que é razoável substituir nas simulações a representação da configuração real de aterramento (consideração dos eletrodos e resistividade do solo) por uma impedância equivalente concentrada, na faixa de valores da impedância impulsiva de aterramento de interesse nas aplicações. Quando tal impedância é muito elevada, correspondendo à condição de resistividade do solo muito alta, observa-se que a sobretensão máxima não ocorre na frente de onda e os resultados das duas representações ficam significativamente diferentes.
- O estudo da técnica não-convencional de utilização de cabos inferiores aterrados (*underbuilt cables*), aplicados em uma linha de 69 kV, apresentou sensível melhoria de desempenho. Houve redução significativa de sobretensão na cadeia de isoladores por incidência de descarga atmosférica. Para impedâncias de aterramento em torno de 10 Ω esta redução alcançou a ordem de 15% a 25% no caso de uso de um condutor e de 24% a 35% no caso de uso de dois condutores. A redução percentual

aumenta quando se consideram valores maiores de impedância de aterramento.

7.3 – Proposta de Continuidade

As propostas e evolução decorrentes do presente trabalho são organizadas seguindo suas duas vertentes:

7.3.1 – Propostas Referentes ao LT-Info

O sistema LT-Info apresenta grande potencial de evolução, sobretudo em decorrência da sua estrutura separada em diferentes módulos, com os blocos principais já organizados. Desta forma, sem reescrever as propostas já citadas na seção 4.4 do texto desta dissertação que trata de funcionalidades que podem ser adicionadas, podem ser ressaltadas as seguintes propostas:

- Configuração para trabalho do sistema em modo cliente-servidor, gerando a separação do módulo de armazenamento para funcionar em um computador do tipo servidor. Tal proposta implica o controle de acesso de dados, que também é um requisito de segurança, e evidentemente implica a criação de um módulo de acesso, no cliente, através de rede.
- Geração do módulo de identificação de pontos críticos a partir de informações referentes à linha de transmissão. Tais informações podem ser de parâmetros de descargas incidentes na região, identificação e contagem dos desligamentos e descrição funcional da linha de transmissão.

7.3.2 – Propostas Referentes ao Estudo de Desligamentos

As análises desenvolvidas foram baseadas na ocorrência do mecanismo de *backflashover*. Para linhas acima de 230 kV e abaixo de 69 kV, o mecanismo de *flashover* decorrente da incidência direta na fase (por falha de blindagem ou ausência de cabo pára-raios) passa a ser relevante.

A exploração deste campo seria uma decorrência natural deste trabalho, para complementar os desenvolvimentos relativos à minimização dos desligamentos de linhas de transmissão devido a descargas atmosféricas.

8 Referências Bibliográficas

ABREU, S.S., "Localização de Falhas em Linhas de Transmissão Aéreas pelo Método das Ondas Viajantes Utilizando Filtros Digitais e Transformada Wavelet", Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Orientador: Clever Sebastião Pereira Filho, Belo Horizonte, 2005.

BATES, J.F., "Transmission Line Computer-Aided Design and Drafting", IEEE - Computer Applications in Power, July 1989.

BERGUER, K., ANDERSON, R.B., KRÖNINGER, H., "Parameters of Lightning Flashes", Electra nº 41, June 1975.

BURROUGH, P.A., "Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment", Oxford: Clarendon Press, 1986.

CEMIG, Relatório 02.111-EG/PA1-3015. "Proteção de Surtos em Linhas de Distribuição - Quinze Anos de Experiência de Campo e Estudos de Laboratório", 1993.

DE CONTI, A.R. "Modelo para Definição de Ondas de Corrente e Tensão Representativa das Solicitações de Sistemas de Distribuição por Descargas Atmosféricas", Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Orientador: Silvério Visacro Filho, Belo Horizonte, 2006.

DOMEL, H.W., "Digital Computer Solution of Eletromagnetic Transient in Single na Multiphase Networks", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systens, PAS 88, No. 4, p. 388-398, 1969.

FONSECA, V.I.P.S., "Modelagem de um Banco de Dados para Implantação de um SIG para Suporte ao Plano de Desenvolvimento Institucional da USFCar", Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Universidade Federal de São Carlos, Orientador: Sérgio Antônio Röhm, São Carlos, 2004.

FURNAS, "Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento: Aplicação em Sistemas de Potência e Alta Tensão", Rio de Janeiro, Niterói, UFF, 1987.

GOODCHILD, M.F., "Geographical Data Modeling", *Computer & Geosciences*, London, v. 18, n. 4, p.401-408, 1992.

GREENWOOD, A., "Electrical Transients in Power Systems", Ed. John Wiley & Sons Inc., 1991.

IEEE, "IEEE Guide for the Application of Insulation Coordination", IEEE-SA Standards Board, 1999.

JONES, R.M., "Introduction to MFC Programming with Visual C++", Patience Hall PTR, 1999.

KUFFEL, E., ZAENGL, W.S., "High-Voltage Engineering", Ed. Pergamon Press Inc., 1984.

LISBOA, F., J., IOCHPE, C., "Introdução a Sistemas de Informação Geográficas com Ênfase em Banco de Dados", Apostila Apresentada na Jornada de Atualização em Informática, JAI do Simpósio Brasileiro em Computação SBC, Recife 1996.

MASTER, M., UMAN, M.A. "Eletric and Magnetic Field Associated with Establishing a Finite Electrostatic Dipole: Na Exercise in the Solution of Maxwell's Equation", *Am. J. Phys.*, 51, 118-126, 1983.

PORTELA, C.M., "Sobretensões e Coordenação de Isolamento", Editora COPPE/UFRJ, 1982.

PORTELA, C.M., "Regimes Transitórios", Editora COPPE/UFRJ, 1983.

SCHOROEDER, M.A.O., "Modelo Eletromagnético para Descontaminação de Ondas de Corrente de Descargas Atmosféricas", Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Orientador: Silvério Visacro Filho, Belo Horizonte, 2001.

SEIXAS, C.F., SZUSTER, M., "Programação Concorrente em Ambiente Windows - uma Visão de Automação", Editora UFMG, 2003.

SHAH, J.J., SHAH, J.J., MÄNTYLÄ, M. "Parametric and Feature Based CAD/Cam: Concepts, Techniques, and Applications", John Wiley & Sons, 1995.

SHANNON, C. E. , "A Mathematical Theory of Communication", *Bell System Technical Journal*, 1948.

SILVEIRA, F.H., "Aplicação de um Novo Modelo para Cálculo de Tensão Induzida por Descarga Atmosférica", Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Orientador: Silvério Visacro Filho, Belo Horizonte, 2001.

SILVA, B.A.C., "Compensação Reativa e Controle de Tensão - Desenvolvimento de Ferramenta Computacional Aplicada à Expansão de Sistemas Elétricos", Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Orientador: Maria Helena Murta Vale, Belo Horizonte, 2005.

SOARES Jr, A., "Investigação do Comportamento dos Aterramentos Típicos de Linhas de Transmissão Frente a Descargas Atmosféricas", Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Orientador: Silvério Visacro Filho, Belo Horizonte, 1996.

SOARES Jr, A., "Modelagem de linhas de Transmissão para Avaliação de Desempenho frente a Descargas Atmosféricas", Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Orientador: Silvério Visacro Filho, Belo Horizonte, 2001.

SOARES Jr, A., SCHOROEDER, M.A.O., VISACRO, S.F., "Transient Voltages in Transmission Lines Caused by Direct lightning Strikes" IEEE - Transaction on Power Delivery, April 2005a.

SOARES Jr, VISACRO, S.F., A., SILVA, A.P., "Fórmulas Simplificadas para o Cálculo da Impedância de Surto de Torres de Transmissão Autoportantes", XVIII SNTPEE, Curitiba - Paraná - Brazil, outubro, 2005b.

STROUSTRUP, B., "A Linguagem de Programação C++", Bookman, 2002.

TAIT, T.F.C., "Um Modelo de Arquitetura de Sistemas de Informação para o Setor Público: estudo em empresas estatais prestadoras de serviço em informática", Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGEP), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Orientador: Roberto C. S. Pacheco, Florianópolis, 2000.

UMAN, M.A., "The Lightning Discharge", Academic Press Inc., Harcourt Brace Javanovich Publishies 1987.

VALADAO, R.L., "Desenvolvimento de um Sistema Computacional Destinado à Localização de Falhas em Redes e Linhas de Transmissão de Energia Elétrica", Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Orientador: Clever Sebastião Pereira Filho, Belo Horizonte, 2005.

VISACRO, S.F., PORTELA, C., "Modelagem de Aterramentos Elétricos para Fenômenos Rápidos", Revista Eletroevolução: Sistemas de Potência, Ed. CIGRE-BRASIL nº 3, pp. 47-54, 1995.

VISACRO, S.F., "Aterramentos Elétricos: Conceitos Básicos; técnicas de Medição e Instrumentação; Filosofias de Aterramentos", Editora Artliber, São Paulo, 2002a.

VISACRO, S.F., "Descargas Atmosféricas: Uma Abordagem de Engenharia", Editora Artliber, São Paulo, 2002b.

VISACRO, S.F., FELIPE, M.A., OLIVEIRA, R.Z., "Non-Conventional Methodology to Improve Lightning Performance of Transmission Lines", pp. 267-270, Proceedings of GROUND'2002 & 3rd WAE, Rio de Janeiro, Brazil, Nov. 2002c.

VISACRO, S.F., SOARES Jr, A., OLIVEIRA, R.Z., FELIPE, M.A., SILVA, A.P., VALE, M.H.M., "Non-conventional Measures for Improvement of Lightning Performance of Transmission Lines" - International Conference on Lightning Protection, Avignon/France, November 2004a.

VISACRO, S.F., SCHOROEDER, M.A.O., SOARES Jr, A., CHERCHIGLIA L. C. L., SOUSA V. J., "Statistical Analysis of Lightning Current Parameters: Measurements at Morro do Cachimbo Station", *Journal on Geophysical Research*, v. 109, Nº. D01105, 1-11, 2004b.

VISACRO, S.F., "A Representative Curve for Lightning Current Waveshape of First Negative Stroke", *Geophysics Research Letters*, Vol. 31, doi: 10.1029/2004GL019642, 2004c.

VISACRO, S.F., SOARES Jr, A., SPALENZA, A., GUEDES, V.T., "Enhancement of Lightning Performance of Transmission Lines Through Non-Conventional Grounding Practices", pp. 257-261, *Proceedings of GROUND'2004 & 1st LPE*, Belo Horizonte, Brazil, Nov. 2004d.

VISACRO, S. F., SOARES Jr, A., "HEM: A Model for Simulation of lightning-Related Engineering Problems", *IEEE - Transaction on Power Delivery*, April 2005a

VISACRO, S., DIAS, R.N., MESQUITA C.R., "Novel Approach for Determining Spots of Critical Lightning Performance Along Transmission Lines", *IEEE - Transactions on Power Delivery*, April 2005b.

VISACRO, S.F., SOARES Jr, A., SILVA, A.P., PACCELLI, E.A., GUEDES, V.T., "Investigation of the Transient Response of Transmission Line Towers to Lightning Strikes", *VIII International Symposium on Lightning Protection*, São Paulo, November 2005c.

VISACRO, S.F., SOARES Jr, A., GUEDES, V.T., ANTUNES, E.P., SPALENZA, A., "Non-Conventional Measures for improve the Lightning Performance of Transmission Lines", Paper TPWRD-00263-2005, Paper Under Revision for publication in *IEEE Trans. Power Delivery*, 01 Feb. 2006a.

VISACRO, S.F., "Descargas Atmosféricas em Linhas de Transmissão: Fator de Comprometimento da Disponibilidade da Rede", *Primer Simposio de CIRGE en Bolivia*, Bolivia, Maio 2006b.

VISACRO, S.F., ANTUNES, E.P., MACHADO, V.G., GUEDES, V.T., "Improving the Lightning Performance of 69 kV to 230 kV Transmission Lines", pp. 326-332, *Proceedings of GROUND'2006 & 2nd LPE*, Maceió, Brazil, Nov. 2006c.

VISACRO, S.F., "A Comprehensive Approach to the Grounding Response to Lightning Currents", *IEEE - Transactions on Power Delivery*, v.22, p.381 - 386, 2007a.

VISACRO, S. "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, p.60 - 68, 2007b.

ZIVIANI, N., "Projeto de Algoritmos com Implementações em Pascal e C", Editora Pioneira, 1999.

XIE, Z., MANIMARAN, G., VITTAL, V., PHADKE, A.G., CENTENO, V., "An Information Architecture for Future Power Systems and Its Reliability Analysis", *IEEE - Transaction on Power Systems*, August 2002.