



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**

**FACULDADE DE ENGENHARIA**  
CAMPUS DE BAURU

**IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL PARA  
AVALIAR OS NÍVEIS DE SOBRETENSÕES  
ATMOSFÉRICAS INDUZIDAS EM LINHAS DE  
DISTRIBUIÇÃO**

**ROGÉRIO THOMAZELLA**

**BAURU - SP**

Dezembro / 2004



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**

**FACULDADE DE ENGENHARIA**  
CAMPUS DE BAURU

**IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL PARA  
AVALIAR OS NÍVEIS DE SOBRETENSÕES  
ATMOSFÉRICAS INDUZIDAS EM LINHAS DE  
DISTRIBUIÇÃO**

**ROGERIO THOMAZELLA**

Orientador: Prof. Dr. André Nunes de Souza

**Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da  
UNESP - Campus de Bauru, para obtenção do Título de  
Mestre em Engenharia Industrial.**

**BAURU - SP**

Dezembro / 2004

Aos meus pais Clóvis e Luzia  
pelo amor, exemplo de dedicação,  
seriedade, mas, especialmente, pelo  
incentivo em todos os momentos.

A minha futura esposa Bruna  
pelo constante estímulo, pela ajuda  
incondicional, pelo amor e por estar  
perto em todas as horas.

## **Agradecimentos**

Este trabalho teve a colaboração de diversas pessoas e instituições. Elencar todos os nomes e contribuições é uma tarefa árdua, havendo a possibilidade de deixar alguém sem o devido reconhecimento expresso nessas linhas. Desde já me desculpo por alguma omissão. Sendo dever de ofício e tradição, atrevo-me a tentar.

Ao meu orientador Prof. Dr. André Nunes de Souza pelos seus ensinamentos, compreensão, sugestões e críticas oferecidas no decorrer do desenvolvimento deste trabalho e principalmente pelas lições de vida.

Aos meus irmãos Carlos Adalberto Thomazella, Clóvis Thomazella Júnior, Luiz Henrique Thomazella e Evaldo Aparecido Thomazella pelo constante incentivo e apoio a este trabalho.

Aos amigos Prof. Dr. Ivan Nunes da Silva, Prof. Dr. Luiz Gonzaga C. Porto, Prof. Dr. Paulo Roberto de Aguiar, Eng. Amaury Haga, Eng. Rodolfo B. Biazon, M.Sc. Eng. Fábio Romano L. Dotto, Eng. Fernando Carneiro Lyra Amaral, MSc. Eng. Antonio Vanderlei Ortega, Eng. Cezar Sant'Anna cujas contribuições determinaram o rumo deste trabalho e também aos amigos Eng. Fábio Augusto Pinho, Eng M.Sc Luiz Fernando Grijo, Eng. Maurício Khenafes, M.Sc. Eng. Rogério Andrade Flauzino, Prof. Dr. José Alfredo Covolan Ulson e aos alunos de iniciação científica pelo convívio e descontrações diárias.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial, pela aceitação como pesquisador e de forma geral, à UNESP que me acolheu como um de seus filhos desde a graduação.

À Companhia Luz e Força Santa Cruz por financiar esta pesquisa e também a CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, por ter concedido bolsa de estudos para o desenvolvimento de meu mestrado.

"O mundo é um lugar perigoso de se viver, não por causa daqueles que fazem o mal, mas sim por causa daqueles que observam e deixam o mal acontecer".

Albert Einstein

"O único homem que não erra é aquele que nunca faz nada".

Roosevelt

# Sumário

<b>RESUMO .....</b>	<b>11</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>12</b>
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
1.1.) RELEVÂNCIA E MOTIVAÇÃO DA PESQUISA.....	13
1.2.) PROPOSTA DA DISSERTAÇÃO .....	13
1.3.) ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	14
<b>CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>16</b>
2.1.) HISTÓRICO.....	16
2.2.) FONTES DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS .....	17
2.3.) DESCARGAS NATURAIS.....	18
2.4.) DESCARGAS DESCENDENTES.....	20
2.5.) DESCARGAS ASCENDENTES .....	21
2.6.) ATIVIDADES DE DESCARGAS NO BRASIL.....	22
2.7.) O PAPEL DO INPE.....	23
2.8.) O CENTRO INTERNACIONAL DE PESQUISAS EM RAIOS INDUZIDOS E NATURAIS - CIPRIN .....	24
2.9.) TÉCNICAS ARTIFICIAIS DE INDUÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	26
<b>CAPÍTULO 3. ESTUDOS RELACIONADOS ÀS TENSÕES INDUZIDAS .....</b>	<b>28</b>
3.1.) HISTÓRICO DA PLATAFORMA COMPUTACIONAL EMTP/ATP .....	32
3.2.) TENSÕES INDUZIDAS UTILIZANDO O EMTP.....	34
3.3.) CONSIDERAÇÕES SOBRE A INCIDÊNCIA DE DESCARGAS INDIRETAS .....	41
3.4.) SOBRETENSÕES INDUZIDAS POR RAIOS: A INFLUÊNCIA DE DESCARGAS E PARÂMETROS DE LINHA .....	42
3.5.) INFLUÊNCIA DA IMPEDÂNCIA DE SURTO NO DOMÍNIO DO TEMPO .....	47
3.6.) MÉTODOS INDIRETOS PARA MEDIÇÃO DA CORRENTE DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS .....	47
3.7.) ESTUDOS ENVOLVENDO OS SISTEMAS DE AQUISIÇÃO DE DADOS .....	48
3.8.) TENSÕES INDUZIDAS DEVIDO ÀS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	49
3.9.) O MÉTODO DO IEEE.....	51
3.10.) PROGRAMA PARA O CÁLCULO DE TENSÕES INDUZIDAS POR RAIOS (LIOV) .....	53
3.11.) O PROGRAMA PARA O CÁLCULO DE TENSÕES INDUZIDAS POR RAIOS (LIOV) SOBRE UMA LINHA AÉREA.....	54
3.12.) A CONEXÃO ENTRE O LIOV E O EMTP .....	57
3.13.) ASPECTOS BÁSICOS SOBRE OS PÁRA-RAIOS .....	63
3.14.) DESCARGAS ATMOSFÉRICAS NAS LINHAS .....	69
<b>CAPÍTULO 4. METODOLOGIA E ADEQUAÇÃO DOS MODELOS MATEMÁTICOS .....</b>	<b>71</b>
4.1.) MODELAGEM DOS PÁRA-RAIOS DE ZNO NO ATP .....	71
4.2.) MODELAGEM DAS LINHAS E DESCARGAS NO ATP .....	72

4.3.) MODELAGEM DAS TENSÕES INDUZIDAS PROVOCADAS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS .....	73
4.4.) IMPLEMENTAÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS GENÉRICAS POR MEIO DE FUNÇÕES DEGRADAÇÃO.....	75
4.5.) FONTES DE COMPENSAÇÃO NO MODELO DE RUSCK PARA AS LINHAS FINITAS COM DESCONTINUIDADE.....	79
4.6.) SOFTWARE DESENVOLVIDO PARA O CÁLCULO DE TENSÕES INDUZIDAS EM LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO.....	82
4.7.) METODOLOGIA DAS SIMULAÇÕES.....	87
<b>CAPÍTULO 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>90</b>
5.1.) SIMULAÇÕES PRELIMINARES COM DESCARGA DIRETA .....	90
5.2.) SIMULAÇÕES DAS TENSÕES INDUZIDAS EM LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO.....	103
<b>CAPÍTULO 6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>117</b>
<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>119</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>120</b>

# Lista de Figuras

FIGURA 3.1 - FONTE DE CORRENTE INJETADA .....	37
FIGURA 3.2 - FONTES DE CORRENTE NA IMPLEMENTAÇÃO DO EMTF.....	38
FIGURA 3.3 - MÉTODO DE COMPENSAÇÃO NO EMTF.....	39
FIGURA 3.4 - SUBROTINA CONNEX E SUA INTERFACE COM O PROGRAMA PRINCIPAL.....	40
FIGURA 3.5 - PONTO DE DESCARGA CONSIDERADO NAS SIMULAÇÕES.....	43
FIGURA 3.6 - CONFIGURAÇÕES DE LINHA .....	45
FIGURA 3.7 - GEOMETRIA USADA PARA O CÁLCULO DA SOBRETENSÃO INDUZIDA .....	55
FIGURA 3.8 - CIRCUITO EQUIVALENTE DE UMA LINHA AÉREA MONOFÁSICA SEM PERDAS EXCITADA POR UMA DESCARGA INDIRETA .....	57
FIGURA 3.9 - CONFIGURAÇÃO DE LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO.....	58
FIGURA 3.10 - CONEXÃO DE UMA IMPEDÂNCIA ZT PARA UMA LINHA AÉREA POR MEIO DA LINHA DE BERGERON .....	59
FIGURA 3.11 - CIRCUITO EQUIVALENTE DE UMA LINHA CURTA SEM PERDAS DE ACORDO COM O MÉTODO DE BERGERON (REPRESENTAÇÃO DE NORTON) .....	60
FIGURA 3.12 - CIRCUITO EQUIVALENTE DE UMA LINHA CURTA SEM PERDAS DE ACORDO COM O MÉTODO DE BERGERON (REPRESENTAÇÃO DE THEVENIN) .....	61
FIGURA 3.13 - CONEXÃO ENTRE O LIOV E O EMTF PARA O CASO DE UMA TERMINAÇÃO CONECTADA AO FIM DO LADO ESQUERDO DA LINHA LIOV.....	62
FIGURA 3.14 - CONEXÃO ENTRE O LIOV E O EMTF PARA O CASO DE UMA IMPEDÂNCIA DE SHUNT LOCALIZADA NO NÓ DE TENSÃO DA LINHA LIOV.....	63
FIGURA 3.15 - EVOLUÇÃO DOS DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO CONTRA SOBRETENSÕES .....	64
FIGURA 4.1 - DIFERENTES MODELOS DE PÁRA-RAIOS DISPONÍVEIS NO ATPDRAW .....	72
FIGURA 4.2 - FONTES DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.....	73
FIGURA 4.3 - LCC NO ATPDRAW.....	73
FIGURA 4.4 - MODELO DE RUSCK PARA TENSÕES INDUZIDAS.....	74
FIGURA 4.5 - REPRESENTAÇÃO DA FORMA DE ONDA DA CORRENTE POR UMA SUCESSÃO DE DEGRAUS.....	75
FIGURA 4.6 - FONTE DE DESCARGA ATMOSFÉRICA DO TIPO HEIDLER.....	79
FIGURA 4.7 - MODELO DE RUSCK MODIFICADO PARA LINHAS FINITAS COM IMPEDÂNCIA DE TERMINAÇÃO.....	80
FIGURA 4.8 - SOFTWARE COMPUTACIONAL DESENVOLVIDO PARA O CÁLCULO DE TENSÕES INDUZIDAS .....	83
FIGURA 4.9 - CARACTERÍSTICAS DAS LINHAS E MODELAMENTO .....	84
FIGURA 4.10 - CARACTERÍSTICAS DA DESCARGA .....	85
FIGURA 4.11 - PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO .....	86
FIGURA 4.12 - EXECUÇÃO DA SIMULAÇÃO .....	87
FIGURA 4.13 - ANÁLISE DAS TENSÕES INDUZIDAS NA LINHA (IMPEDÂNCIA CASADA NAS EXTREMIDADES).....	88
FIGURA 5.1 - ESTRUTURA PADRONIZADA PARA SIMULAÇÃO DA LINHA DE DISTRIBUIÇÃO.....	92
FIGURA 5.2 - CONFIGURAÇÃO DOS CABOS NO PROGRAMA ATP .....	93
FIGURA 5.3 - DADOS CONSTRUTIVOS DA LINHA SIMULADA .....	94
FIGURA 5.4 - DADOS DA LINHA E CABO DE DISTRIBUIÇÃO .....	94
FIGURA 5.5 - TENSÃO GERADA PELA DESCARGA.....	95
FIGURA 5.6 - CORRENTE GERADA PELA DESCARGA .....	96
FIGURA 5.7 - PROPAGAÇÃO DA ONDA DE SOBRETENSÃO NA LINHA .....	97
FIGURA 5.8 - TENSÃO APÓS A ATUAÇÃO DO PÁRA-RAIOS.....	97
FIGURA 5.9 - TENSÃO NAS FASES APÓS A ATUAÇÃO DO PÁRA-RAIO.....	98

FIGURA 5.10 - TENSÃO NO PONTO “1” PARA O CIRCUITO 2.....	99
FIGURA 5.11 - TENSÃO NO PONTO “2” PARA O CIRCUITO 2.....	99
FIGURA 5.12 - TENSÃO NO PONTO “3” PARA O CIRCUITO 2.....	100
FIGURA 5.13 - TENSÃO NA METADE DA LINHA PARA O CIRCUITO COM VÁRIOS PÁRA-RAIOS.....	101
FIGURA 5.14 - TENSÃO NO FINAL DA LINHA PARA O CIRCUITO COM VÁRIOS PÁRA-RAIOS.....	102
FIGURA 5.15 - TENSÕES INDUZIDAS NAS FASES A, B, C PARA UM PONTO $X=-450M$ .....	105
FIGURA 5.16 - TENSÕES INDUZIDAS NAS FASES A, B, C PARA UM PONTO $X=-150M$ .....	106
FIGURA 5.17 - TENSÕES INDUZIDAS NAS FASES A,B,C PARA UM PONTO $X=0M$ .....	106
FIGURA 5.18 - TENSÕES INDUZIDAS NAS FASES A, B, C PARA DIVERSAS POSIÇÕES.....	107
FIGURA 5.19 - TENSÕES INDUZIDAS NAS FASES A, B, C PARA UM PONTO $X = -450M$ .....	108
FIGURA 5.20 - TENSÕES INDUZIDAS NAS FASES A, B, C PARA UM PONTO $X = -150M$ .....	109
FIGURA 5.21 - TENSÕES INDUZIDAS NAS FASES A, B, C PARA UM PONTO $X = 0M$ .....	109
FIGURA 5.22 - TENSÕES INDUZIDAS NAS FASES A, B, C PARA UM PONTO $X = 0, 150, 450, 750M$ .....	110
FIGURA 5.23 - TENSÕES INDUZIDAS NAS FASES A, B, C PARA UM PONTO $X = -450M$ .....	111
FIGURA 5.24 - TENSÕES INDUZIDAS NAS FASES A, B, C PARA UM PONTO $X = -150M$ .....	112
FIGURA 5.25 - TENSÕES INDUZIDAS NAS FASES A,B,C PARA UM PONTO $X = 0M$ .....	112
FIGURA 5.26 - TENSÕES INDUZIDAS NAS FASES A, B, C PARA UM PONTO $X = 0, 150, 450, 750M$ .....	113
FIGURA 5.27 - TENSÕES INDUZIDAS NAS FASES A, B, C PARA UM PONTO $X = -450M$ .....	114
FIGURA 5.28 - TENSÕES INDUZIDAS NAS FASES A, B, C PARA UM PONTO $X = -150M$ .....	114
FIGURA 5.29 - TENSÕES INDUZIDAS NAS FASES A, B, C PARA UM PONTO $X = 0M$ .....	115
FIGURA 5.30 - TENSÕES INDUZIDAS NAS FASES A, B, C PARA UM PONTO $X = 0, 150, 450, 750M$ .....	116

## Lista de tabelas

<i>TABELA 4.1 - COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES MODELOS DE PÁRA-RAIOS DO ATP.....</i>	<i>71</i>
<i>TABELA 4.2 – VALORES DE CONSTANTES UTILIZADAS NA GERAÇÃO DA DESCARGA.....</i>	<i>78</i>
<i>TABELA 5.1 - CONFIGURAÇÃO DOS CIRCUITOS QUANTO À PRESENÇA DE PÁRA-RAIOS.....</i>	<i>90</i>
<i>TABELA 5.2 - CONFIGURAÇÃO DOS CIRCUITOS QUANTO À PRESENÇA DE PÁRA-RAIOS.....</i>	<i>104</i>

THOMAZELLA, R. *Implementação computacional para avaliar os níveis de sobretensões atmosféricas induzidas em linhas de distribuição*. Bauru, 2004. 129p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) - Faculdade de Engenharia, Campus de Bauru, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

## **RESUMO**

O presente trabalho visa o desenvolvimento de uma ferramenta computacional confiável na análise e estimação dos níveis de tensões induzidas em linhas de distribuição. Neste contexto, utilizam-se ferramentas computacionais consolidadas, como o ATP (Alternative Transients Program), que combinado a um software desenvolvido em Visual Basic, permitem quantificar e avaliar o nível de sobretensões nas linhas de distribuição.

Por meio de modificações nas técnicas clássicas de modelagem das descargas atmosféricas, foi possível a construção de um software em Visual Basic capaz de quantificar os valores das tensões induzidas em linhas de distribuição finitas. A avaliação dos níveis de sobretensões induzidas nas mesmas foi implementada pela associação deste software a um programa de simulação (ATP), a fim de se obter resultados fidedignos deste transitório. Tais resultados foram utilizados para se avaliar o desempenho das linhas de distribuição frente aos vários níveis de proteções.

### **Palavras-Chave:**

Descargas atmosféricas, pára-raios, tensões induzidas, ATP (Alternative Transients Program), linhas de distribuição, sobretensões atmosféricas.

THOMAZELLA, R. *Computational implementation to evaluate the levels of induced atmospheric overvoltage in distribution lines*. Bauru, 2004. 129p. Master Degree Dissertation – Faculty of Engineering. State University of São Paulo, UNESP “Júlio de Mesquita Filho”.

## **ABSTRACT**

The present work aims at the development of a trustworthy computational tool in the analysis and estimate of the levels of induced overvoltage in distribution network. In this context, consolidated computational tools are used, as ATP (Alternative Transients Program), that combined with a software developed in Visual Basic (beginner's all-purpose symbolic instruction code), they allow to quantify and to evaluate the level of overvoltage in the distribution network.

By the means of modifications in the classic techniques of modeling of the atmospheric discharges, the construction of a software in Visual Basic was possible to quantify the values of the induced overvoltage in a finite of distribution network. The evaluation of the levels of induced overvoltage in the distribution network was implemented by the association of this software with a simulation program (ATP), in order to get a good result of this transitory. Such results had been used to evaluate the performance of the distribution network to compare some levels of protections.

### **Keywords:**

Atmospheric discharges, surge arresters, induced overvoltage, ATP(Alternative Transients Program), distribution network, lightning protection.

## **CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO**

### **1.1.) RELEVÂNCIA E MOTIVAÇÃO DA PESQUISA**

Nos sistemas de distribuição, as descargas atmosféricas são as principais causas de interrupções não planejadas no fornecimento de energia elétrica. Essa constatação deve impulsionar novas abordagens para buscar soluções cada vez mais eficientes, no sentido de diminuir os efeitos dessas descargas nas redes de distribuição. Nesse sentido, a avaliação precisa do comportamento das redes de distribuição frente às descargas atmosféricas, torna-se uma missão prioritária para pesquisadores que buscam melhorar a proteção dos sistemas, a diminuição dos custos de projeto, a identificação de sistemas vulneráveis e seus impactos efetivos, tendo se em vista a escassez econômica e social dos setores.

A utilização cada vez mais comum de equipamentos sensíveis ligados às instalações dos consumidores na rede de baixa tensão tem mostrado a importância do problema da qualidade de energia fornecida. Dentro desse contexto, assume especial importância o problema das sobretensões geradas pelas descargas atmosféricas tanto diretas quanto indiretas.

O conhecimento detalhado das características das tensões induzidas é de suma importância para as concessionárias de distribuição, as quais especificam a proteção dos transformadores e do sistema como um todo.

### **1.2.) PROPOSTA DA DISSERTAÇÃO**

A proposta principal desta pesquisa visa o desenvolvimento de técnicas computacionais a fim de estimar e avaliar os níveis de sobretensões gerados nas linhas de distribuição frente às descargas atmosféricas. Tal análise é fundamental

para inferir o desempenho de sistemas de proteção e níveis da qualidade de energia que será ofertada aos consumidores.

Por meio de simulações computacionais utilizando-se o programa ATP (Alternative Transients Program), aliadas ao software desenvolvido, pode-se quantificar o nível de sobretensões nas linhas de distribuição, auxiliando a especificação e a utilização de dispositivos de proteção (supressores de surto).

Como metodologia de desenvolvimento, destaca-se o emprego de técnicas convencionais na estimação paramétrica dos modelos desenvolvidos, bem como simulações computacionais aliadas a um software dedicado. Como resultado desta integração, torna-se possível à avaliação dos níveis de sobretensão, apresentando alto grau de eficiência e melhorando significativamente tal processo.

### **1.3.) ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

A presente dissertação se desenvolve em 6 capítulos, conforme descrito a seguir:

No *capítulo 2* são apresentados os principais conceitos envolvidos em uma descarga atmosférica, principalmente aspectos de sua formação, classificação, características e ensaios clássicos de indução.

No *capítulo 3* tem-se uma descrição dos conceitos fundamentais de descargas atmosféricas induzidas, tensões induzidas, modelamento matemático das descargas, software de simulações e muitos outros aspectos relacionados aos estudos das tensões induzidas.

No *capítulo 4* descreve-se de maneira minuciosa a metodologia, os parâmetros e configurações simuladas no capítulo seguinte.

No *capítulo 5* são apresentados os resultados (simulações computacionais) e as discussões das simulações realizadas neste trabalho.

No *capítulo 6* tem-se as conclusões obtidas com a realização do presente trabalho e também sugestões para trabalhos futuros.

Os estudos relacionados a esta dissertação já foram apresentados ou estão em processo de julgamento para publicações em fóruns nacionais e internacionais. Algumas dessas publicações são listadas a seguir:

SANT'ANNA, C. J.; SOUZA, A. N. de; THOMAZELLA, R. "The Low Impedance of the Grounding System When the Steel in the Concrete of the Building Foundations is Used and the Tension Outbreak is Provoked by Atmospheric Discharges Close to Transformers". In: VII SIPIDA International Symposium on Ligthning Protection, 2003, Curitiba. Proceedings of the VII SIPIDA. 2003. v. 1, p. 202-206.

THOMAZELLA, R., SOUZA, A. N., DOTTO, F. R. L., SILVA, I. N. da, HAGA, A., BIAZON, R. B. "Avaliação dos Níveis de Sobretensões Induzidas em Linhas de Distribuição Rurais". AGRENER GD, Campinas, Outubro de 2004.

THOMAZELLA, R., SOUZA, A. N., AMARAL, F. C. L., PORTO, L. G. C. "Evaluation of High Frequency Performance in a Grounding System by Neural" Approach In: IEEE INDUSTRY APPLICATIONS SOCIETY, 2004, Joinville - SC. Proceedings of the IEEE Industry Applications Society, CD., 2004.

SILVA, I. N., MARCONDES, J., SOUZA, A. N., SANTOS, N. R. "Uma Contribuição para o estudo de tensões induzidas em equipamentos e linhas de distribuição" CITENEL, 2003.

## **CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1.) HISTÓRICO**

O principal objetivo deste capítulo é apresentar, de maneira resumida, a revisão bibliográfica das pesquisas envolvendo o fenômeno das descargas atmosféricas em âmbito mundial, pesquisas essas que estão em franca expansão. Ressalta-se que todas essas informações são essenciais para melhorar o conhecimento sobre as tensões induzidas, as quais fazem parte de um tipo de descarga, comumente denominada de Descarga Indireta.

Resultados de várias pesquisas têm sido publicados e analisados em diversos comitês científicos, discutindo os principais fundamentos e modelos que explicam o desenvolvimento das descargas atmosféricas e seus respectivos efeitos nos sistemas elétricos.

Dentre essas pesquisas, destacam-se três abordagens referentes às metodologias, as quais são utilizadas para representar e identificar o comportamento dos processos de desenvolvimento de uma descarga atmosférica. A primeira abordagem é caracterizada pelas técnicas que consideram simplesmente estudos estatísticos sobre o fenômeno, num enfoque puramente probabilístico (BERGER & NOVEL, 1967). A segunda abordagem refere-se às técnicas que são derivadas de medições e observações feitas diretamente no campo (WILLIAMS & BROOKS, 1963). Finalmente, a terceira abordagem é caracterizada pelas técnicas que investigam profundamente a física natural do fenômeno e o seu modelamento computacional (BROOKS et al, 1962).

Por meio de estudos realizados por Benjamin Franklin provou-se que o relâmpago era uma descarga elétrica, medindo-se ainda o sinal da carga em uma nuvem, a mais de 200 anos atrás (FRANKLIN, 1941). A pesquisa moderna da parte física do relâmpago começou no início do século XX com os trabalhos direcionados a inferir sobre a estrutura de tempestades em nuvens e sobre a carga

envolvida em um relâmpago fazendo medidas dos campos elétricos das tempestades de trovões.

Em uma outra linha, na década de 30, pesquisas sobre relâmpagos eram motivadas primeiramente pela necessidade de reduzir os efeitos de relâmpagos em sistemas de energia e pelo desejo de se entender o importante processo meteorológico. Já na década de 60, ocorreu uma renovação no interesse, por causa da inesperada vulnerabilidade das estruturas eletrônicas sólidas danificadas pelas tensões e correntes induzidas por relâmpagos levando perigo, como por exemplo, aos modernos sistemas de aviação (UMAN & KRIDER, 1989).

## **2.2.) FONTES DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

Existem vários tipos de nuvens que geralmente são classificadas e ou denominadas de: stratus, stratocumulus, cumulus, nimbostratus, altostratus, altocumulus, cirrus e cumulonimbus, e qualquer um desses tipos pode potencialmente causar relâmpagos ou alguma forma relacionada às descargas elétricas.

O modelo clássico para a estrutura de uma nuvem de tempestade foi desenvolvido entre 1920 e 1930, a partir de medidas feitas em terra considerando as mudanças dos campos elétrico e magnético que eram causadas quando da ocorrência de relâmpagos. Neste modelo, a nuvem forma um dipolo elétrico onde existe uma região de cargas positivas acima de uma região de cargas negativas. O atrito entre as partículas de gelo dá origem à formação de cargas elétricas. A temperatura na base da nuvem é da ordem de 15°C e no topo é de aproximadamente -60°C.

De maneira geral, pode-se dizer que as correntes ascendentes de ar tendem a transportar as partículas positivas e as pequenas gotas de água para a parte superior da nuvem, enquanto as partículas negativas são levadas para a base da nuvem pelas grandes gotas de água.

Assim, um grande centro de carga negativa é desenvolvido na região inferior da nuvem, enquanto um centro de carga positiva é induzido na terra, resultando em uma diferença de potencial entre a nuvem e a terra. Esses centros de carga continuam a se desenvolver até que o gradiente elétrico, numa concentração de cargas na nuvem ou na terra, exceda a rigidez dielétrica do ar provocando o movimento de cargas em direção a terra ou a nuvem. Esta rigidez dielétrica é da ordem de 30kV/cm para o ar seco nas condições atmosféricas padronizadas, mas pode ser bem menor, devido tanto à redução da pressão atmosférica, em função da altura da nuvem, como também devido à presença de gotas de água na nuvem.

### **2.3.) DESCARGAS NATURAIS**

Um relâmpago é um transiente, ou seja, uma descarga de alta corrente cujo tamanho é medido em quilômetros. Sabe-se que mais da metade de todas as descargas ocorrem na região interna das nuvens e são chamadas descargas Intra-Clouds (IC). Relâmpago nuvem-terra ou Cloud-to-Ground (CG), tem sido o mais difundido, tendo em vista a sua importância prática (causa de lesões, mortes, distúrbios em sistemas de energia, comunicação e incêndios em florestas) e por causa do estrondo de um relâmpago uma nuvem é mais facilmente estudada com técnicas ópticas. Descargas nuvem-nuvem (Cloud-to-Cloud) e nuvem-ar (Cloud-to-air) ocorrem com menor frequência do que os relâmpagos IC ou CG (UMAN & KRIDER, 1989).

Uma descarga atmosférica pode ainda ser definida como um conjunto de descargas a terra em uma descarga múltipla e o raio como sendo uma das descargas entre a nuvem e a terra, os quais podem ser divididos em raios explosivos de alta intensidade e de curta duração e os raios incendiários de baixa intensidade e longa duração.

Um raio ao cair na terra, pode provocar grandes efeitos de destruição, devido ao alto valor de sua corrente elétrica que gera intensos campos

eletromagnéticos, calor, etc. Além dos danos causados diretamente pela corrente elétrica e pelo intenso calor, o raio pode provocar sobretensões em redes de energia elétrica, em redes de telecomunicações, de TV a cabo, antenas parabólicas, redes de transmissão de dados, etc. Esse fenômeno é denominado de sobretensões transitórias e podem ocorrer de duas maneiras:

*Descarga direta:* o raio atinge diretamente uma rede elétrica ou telefônica. Neste caso, o raio tem um efeito devastador, gerando elevados valores de sobretensões sobre os diversos circuitos.

*Descarga Indireta:* o raio caindo a uma distância de até 1 quilômetro de uma rede elétrica. A sobretensão gerada é de menor intensidade do que a provocada pela descarga direta, mas pode causar sérios danos. Essa sobretensão induzida acontece quando uma parte da energia do raio é transferida por meio da indução eletromagnética à rede elétrica.

A densidade de raios para a terra pode ser obtida a partir do nível ceráunico de cada região, o qual indica o número de dias no ano com ocorrência de trovoadas. O nível ceráunico não reflete necessariamente o número de descargas para a terra, já que uma única descarga ou uma série delas durante algumas horas serão contadas como um único dia de trovoadas.

Os pontos de igual intensidade ceráunica são mapeados para formar as curvas isoceráunicas, a partir das quais pode ser obtida a quantidade de raios para a terra pela consideração de um fator empírico.

Técnicas são utilizadas para se conseguir um mapeamento das fontes de radiação de um relâmpago, e assim, conhecer a dinâmica do seu desenvolvimento. Este mapeamento é obtido com a técnica da diferença no tempo de chegada (Difference of Time-of-Arrived - DTOA). Geralmente, os aparelhos utilizados medem variações súbitas no campo eletrostático produzido por uma descarga atmosférica (MAZUR, 2002).

## **2.4.) DESCARGAS DESCENDENTES**

### **2.4.1.) DESCARGAS NEGATIVAS**

Uma descarga negativa iniciada de uma nuvem descarrega por volta de 10C (Coulomb) de carga negativa sobre a terra. O período de duração de uma descarga tem uma duração típica da metade de um segundo. Uma descarga tem vários componentes, sendo que, o mais significativo são três ou quatro pulsos de alta corrente chamados de quedas. A separação entre as quedas equivale a um período de dez milissegundos (UMAN & KRIDER, 1989).

O valor médio de corrente para as primeiras descargas negativas é de aproximadamente 30kA, já as descargas positivas, as quais são menos frequentes, apresentam um valor médio de 35kA. Entretanto, enquanto apenas 5% das descargas negativas excedem 80kA, este valor para as descargas positivas está em torno de 250kA.

A descarga líder é iniciada por meio de uma ruptura preliminar através da nuvem, apesar de não existir uma conformidade sobre a forma e localização exatas deste processo. A quebra preliminar está na parte baixa da nuvem, entre as regiões de carga negativa e positiva.

Fotografias de alta velocidade mostram que os passos da descarga líder têm tipicamente 1 $\mu$ s de duração, 10m de comprimento, e o seu tempo de pausa entre os passos é de 20 $\mu$ s a 50 $\mu$ s.

O caminho total percorrido pela descarga líder pode estar por volta de 10C (Coulomb) de carga negativa em direção a terra em 10ms e a velocidade média para baixo da propagação está por volta de 20.000m/s.

A média da corrente líder está entre 105A. A descarga líder tem picos de pulsos de corrente por volta de 1.000A. Durante sua progressão em direção a terra a descarga líder produz uma estrutura geométrica ramificada para baixo (UMAN & KRIDER, 1989).

### **2.4.2.) DESCARGAS POSITIVAS**

Descargas positivas para a terra são de considerável interesse prático por causa de suas correntes de pico e a carga positiva total transferida para a terra pode ser bem maior do que uma descarga negativa comum. Um grande número de correntes de pico tem sido estudadas, aquelas entre 200kA e 300kA. Descargas positivas para a terra são iniciadas por descargas líderes que não são exibidas com passos distintos como suas equivalentes negativas. As descargas positivas geralmente contêm somente uma simples queda de retorno, seguida por um período de continuação da corrente.

As descargas positivas são provavelmente iniciadas por cargas positivas acima de tempestades em nuvens onde esta carga tinha sido separada horizontalmente da carga negativa por ventos cortantes, mas isso não é sempre uma condição necessária. Descargas positivas são produzidas por tempestades de ventos e tempestades de neve, apesar destas tempestades produzirem poucas descargas, sendo somente 1% a 15% das descargas atmosféricas.

Experiências feitas em tempestades de vento no Japão, onde foram analisados relâmpagos desencadeados por foguetes, não mostraram casos de descargas CG positivos. Esta é uma forte evidência que aumenta a hipótese de não ocorrerem múltiplas quedas de retorno em descargas CG positivas. Contudo, múltiplas descargas CG positivas com vários canais para a terra, separados por distâncias de 10.000m um do outro, podem ser mapeados pelo sistema DTOA (MAZUR, 2002).

### **2.5.) DESCARGAS ASCENDENTES**

Relâmpagos são em algumas vezes iniciados por descargas líderes movendo-se para cima que surgem de picos de grandes montanhas ou de estruturas feitas pelo homem. Descargas líderes movendo-se para cima podem ser iniciadas artificialmente quando um condutor aterrado com 100m de comprimento

é rapidamente conduzido para cima por um foguete até uma nuvem carregada (UMAN & KRIDER, 1989).

A maioria dos raios ascendentes (1% do total) associados, em geral, a construções elevadas como torres, pára-raios de edifícios etc. A presença dessas construções erigidas pelo homem dá origem ao raio, sob condições (em geral, a existência de descargas elétricas dentro das nuvens) que não seriam suficientes para uma manifestação natural. Para as elevações típicas dessas edificações (dezenas de metros), o número de raios induzidos é pequeno. Mas se a altura do objeto ultrapassa 100 metros- caso do Empire State, construído em Nova York na década de 30 -, o número de raios induzidos pode ser significativo. O Empire State induz, em média, 26 raios por ano. Também podem ser incluídos na categoria artificial os raios gerados por explosões nucleares na atmosfera, atualmente proibidas, ou abaixo da superfície do mar, permitidas sob rígido controle (PINTO & PINTO JR, 2002).

As descargas líderes em relâmpagos iniciados para cima são geralmente positivas. As descargas líderes positivas para cima mostram uma contínua luminosidade que é modulada de maneira similar para descargas líderes positivas encaminhadas para baixo. As descargas líderes positivas para cima são freqüentes entre nuvens e produzem correntes da ordem de 100A a 1.000A.

## **2.6.) ATIVIDADES DE DESCARGAS NO BRASIL**

As primeiras observações relatadas para atividades de descargas atmosféricas (relâmpagos) no Brasil foram feitas no início dos anos 60, quando o número de tempestades começou a ser estudado em diferentes partes do país (PINTO & PINTO JR, 2002). Estas observações foram feitas ao longo de três décadas. Apesar de na última década terem sido instaladas várias redes de detecção de relâmpagos, as observações do número de dias de tempestades permaneciam somente como informações do país como um todo. Em duas décadas de observações concluiu-se que em muitas partes do Brasil, as tempestades ocorrem mais do que 50 dias por ano, ocorrendo até em mais de 100

dias por ano em uma grande parte do país. Segundo esse estudo, o valor máximo de 140 dias de tempestades por ano ocorre na região amazônica (PINTO & PINTO JR, 2002).

Na última década, esta situação mudou com o início das medições dos relâmpagos por satélites feitas por um sensor com capacidade de detectar descargas em todos os locais. Em 1995, o primeiro destes tipos de sensores foi lançado, o Detector Transiente Ótico - OTD (BOCCIPPIO et al, 2001). Em 1997, o Sensor de Imagem de Relâmpago (LIS), segundo desta nova geração de sensores, foi lançado a bordo do satélite TRMM em uma órbita de menor altitude do que o sensor anterior (CHRISTIAN et al, 1999).

Diante disto, obtiveram-se vários progressos nas observações de relâmpagos no Brasil. Os dados do LIS ajudaram a esclarecer, por exemplo, relatos de descargas entre nuvens. A partir deste sensor foi possível mapear a atividade de relâmpago nuvem-terra em diferentes partes do Brasil e obter informações que ajudariam a entender as estruturas elétricas em uma tempestade.

## **2.7.) O PAPEL DO INPE**

A importância em se estudar os fenômenos e os efeitos relativo às descargas atmosféricas torna-se ainda mais evidente com os estudos recentes feitos pelo grupo de Eletricidade Atmosférica do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) em parceria com a NASA (NEWMAN et al, 1967). Por meio do LIS, o INPE mapeou a incidência de raios nos últimos quatro anos.

De acordo com essa pesquisa, o Brasil é atingido por até 70 milhões de descargas por ano, estando em primeiro lugar na incidência de raios no mundo, à frente dos Estados Unidos (25 milhões de quedas). Isso é favorecido pela grande extensão territorial e pelo Brasil ser o país com a maior região tropical do planeta.

Nas regiões oeste do Rio Grande do Sul e sul do Mato Grosso do Sul, a quantidade do fenômeno chega a 16 raios por quilômetro quadrado. No estado de São Paulo, a média é de 7 raios por quilômetro quadrado.

Os raios matam cerca de 100 pessoas por ano e os prejuízos financeiros chegam a 500 milhões de reais, causados por estragos em linhas de distribuição aéreas, telecomunicações e equipamentos. Cerca de 70% das interrupções no fornecimento de energia elétrica no Brasil são provocadas por raios.

## **2.8.) O CENTRO INTERNACIONAL DE PESQUISAS EM RAIOS INDUZIDOS E NATURAIS - CIPRIN**

A natureza imprevisível de um raio, apesar de torná-lo fascinante, também faz com que seja difícil pesquisá-lo, principalmente no que se refere a observações próximas ao canal onde circula a corrente. Essas observações são essenciais para compreender melhor o processo físico de conexão das descargas atmosféricas com o solo e os efeitos dos campos eletromagnéticos gerados sobre as vizinhanças, em particular nas linhas de distribuição, que podem influenciar diretamente sobre as técnicas de proteções praticadas nos sistemas elétricos.

Com o intuito de superar essa dificuldade, técnicas de indução de descargas, as quais representam as tensões induzidas, têm sido estudadas desde 1960. Especificamente no Brasil, verifica-se a adoção de uma técnica de indução de descargas, a qual utilizam-se pequenos foguetes acoplados a um fio condutor. Esse foguete é conduzido à atmosfera em direção a uma nuvem de tempestade. O foguete, que tem aproximadamente 1 metro, é lançado quando o campo elétrico-atmosférico no solo, normalmente em torno de 100V/m e atinge um valor em torno de 8 a 10kV/m, devido à proximidade de uma tempestade.

A introdução rápida do foguete carregando consigo um fio condutor na atmosfera intensifica o campo existente, a ponto de gerar em sua extremidade uma descarga que dá início ao processo de indução. Esse fio condutor pode ser aterrado (método clássico de indução) ou não (método de altitude de indução).

A primeira descarga induzida por essa técnica foi obtida a bordo de um barco no final da década de 60 (FIEUX & GARY, 1975). Logo após este experimento foi possível a realização do mesmo no continente sendo que as

primeiras descargas induzidas foram obtidas na França em 1973 (FIEUX & GARY, 1978).

A técnica de indução de descargas por foguetes tem sido empregada em diversos países, como por exemplo, na França, Estados Unidos, Canadá, Japão e China.

No Brasil foi criado o CIPRIN (Centro Internacional de Pesquisas em Raios Induzidos e Naturais). O mesmo está localizado dentro das instalações do INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, em Cachoeira Paulista, SP. Inaugurado em 2000, o centro só opera durante o verão. O local foi escolhido considerando-se a atividade de descargas no local e também em virtude das facilidades operacionais.

O centro é constituído basicamente por uma plataforma com capacidade para lançar até 12 foguetes durante uma tempestade. Essa plataforma é ligada a um laboratório, distante cerca de 45 metros, onde equipamentos controlam, além do lançamento, todos os instrumentos instalados em seu interior e ao redor da plataforma. Diversos sensores têm sido empregados: de corrente, de campo elétrico CC/CA e de luminosidade.

Além de sensores, o centro conta com diversas câmeras VHS e uma câmera rápida. Ambos os métodos de indução têm sido empregados. A atividade de descargas na região do centro é monitorada por sistemas locais e de larga escala.

No Brasil, condições favoráveis de indução têm sido obtidas para valores de campo elétrico local de 8 a 11kV/m. O primeiro raio induzido obtido no centro ocorreu em 23 de novembro de 2000, pelo método de altitude. Até outubro de 2002, já haviam sido induzidos nove raios, empregando ambos os métodos. A margem de sucesso nos lançamentos está na faixa de 25%, um valor aquém das expectativas iniciais.

Após terem sido realizadas três campanhas (2000 a 2002), e apesar do pequeno número de raios induzidos, podem-se tirar as primeiras conclusões:

- A técnica de indução de raios por foguetes parece funcionar bem em uma região tropical como a brasileira, mas precisa ser adaptada para que uma maior margem de sucesso possa ser obtida;
- Os raios induzidos no Brasil, por ambos os métodos de indução, têm registrado até o momento valores de pico de corrente superiores aos registrados na França e nos Estados Unidos, e as demais características são similares; mas o sistema de detecção de descargas atualmente existente no sudeste do Brasil precisa ser modificado para que se tenha um melhor desempenho de detecção.

Diante dessas premissas, diversos trabalhos têm sido realizados para elevar o conhecimento deste fenômeno, e de maneira sistemática e intensa, tentar minimizar os efeitos dessas descargas no número de interrupções no sistema elétrico no âmbito mundial (RAKOV, 1999).

## **2.9.) TÉCNICAS ARTIFICIAIS DE INDUÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

Dentre as diversas técnicas artificiais de indução, as quais são utilizadas para verificar o comportamento das sobretensões atmosféricas, destaca-se a técnica que emprega foguetes artificiais denominada de “Método Clássico de Indução”, esse método depende de diversos fatores, pois além do valor do campo elétrico na superfície é necessário o histórico do campo elétrico nos minutos antecedentes, a frequência de descargas naturais e finalmente, a velocidade de ascensão do foguete.

As melhores condições são obtidas para campos relativamente constantes e com pouca atividade de descargas naturais. Em relação à velocidade do foguete, esta deve manter-se alta (acima de 200m/s) até altitudes de 300 metros.

A descarga elétrica inicia-se com um líder ascendente positivo, gerado pela intensificação do campo elétrico na extremidade do foguete. Esse líder surge

quando o foguete atinge uma altura em torno de 200 a 300 metros, resultando em uma velocidade de subida da descarga líder de aproximadamente 100.000m/s.

Neste instante, o líder ascendente vaporiza o fio de cobre, estabelecendo uma corrente contínua de ordem de algumas centenas de Amperes, que transporta cargas negativas em direção ao solo. Após um intervalo de tempo de algumas centenas de milissegundos, a corrente é interrompida por algumas dezenas de milissegundos, e é seguida então por uma ou mais descargas de retorno de curta duração, com intensidade de algumas dezenas de kA.

Diferentemente de MASTER & UMAN (1984), as descargas atmosféricas naturais negativas descendentes (tipo semelhante aos raios mais comum na natureza) é idêntica aos raios naturais induzidos ascendentes, e os raios induzidos pelo método clássico sempre começam com uma corrente contínua.

Embora as descargas de retorno raramente excedam 50kA (o maior valor registrado até hoje foi de 60kA), suas derivadas no tempo apresentam valores da mesma ordem de grandeza das descargas de retorno de raios naturais, e são, assim, apropriadas a estudos em sistemas de energia e comunicação. Os raios induzidos pelo método clássico também apresentam longos períodos de corrente contínua; portanto, são apropriados para testes de cabos e outros dispositivos susceptíveis à energia total transferida pela descarga.

Em geral, é mais difícil induzir raios pelo método de altitude. Embora existam poucas medidas de corrente, o mesmo tende a mostrar um comportamento típico mais semelhante a um raio natural negativo descendente. As descargas induzidas por esse método, além das aplicações referidas para raios induzidos pelo método clássico, são apropriadas para testes de diferentes sistemas de proteção.

As descargas induzidas pelo método de altitude iniciam-se por um líder bidirecional. Em geral, o líder ascendente transporta cargas positivas, enquanto o líder descendente transporta cargas negativas. Após o líder descendente conectar-se ao solo, uma descarga de retorno ocorre, conectando-se ao líder ascendente. Normalmente, essa primeira descarga de retorno é seguida por um período de corrente contínua e, posteriormente, por outras descargas de retorno muito similares às subseqüentes dos raios naturais.

## **CAPÍTULO 3. ESTUDOS RELACIONADOS ÀS TENSÕES INDUZIDAS**

As sobretensões pesquisadas em linhas de distribuição ocasionadas por fenômenos atmosféricos podem ser classificadas em quatro grupos principais (PORTELA, 1982), os quais são relacionados a seguir:

Grupo 1: São as sobretensões originadas por descargas que atingem diretamente as linhas de distribuição.

Grupo 2: São as sobretensões induzidas por descargas atmosféricas que ocorrem nas vizinhanças da linha de distribuição.

Grupo 3: São as sobretensões induzidas por descargas elétricas entre nuvens e dentro da própria nuvem.

Grupo 4: São as sobretensões originadas pela presença de nuvens carregadas acima das linhas de distribuição.

Atualmente, cerca de 700 milhões de raios por ano lampejam pelo globo terrestre. Provocam em média duas mil mortes e pelo menos 30% da falta de energia elétrica, entre outros inúmeros prejuízos, como queima de equipamentos entre outros prejuízos ao sistema elétrico (PINTO & PINTO JR, 2002). Dada a importância deste tema, encontram-se na literatura diversos estudos relacionados as sobretensões atmosféricas. Desta maneira, o efeito dessas sobretensões é analisado por meio do desempenho de linhas de distribuição frente às descargas atmosféricas e dos desligamentos ocorridos na linha por ano, que são causados pela incidência destes fenômenos sobre a linha ou próximo dela (tensões induzidas). Para o cálculo do desempenho são necessárias informações sobre as descargas atmosféricas, sobre o processo de incidência na linha e finalmente, sobre o comportamento do sistema frente à tais fenômenos (CIGRÉ, 1991; SOARES AT AL, 2000; SOARES, 2001).

Os principais componentes envolvidos nos cálculos de sobretensão causados por descargas atmosféricas são os cabos aéreos, as torres de transmissão,

distribuição e seus respectivos aterramentos. A modelagem desses componentes não considera o acoplamento magnético entre eles (VISACRO & PORTELA, 1992), além daquele propiciado pela ligação metálica entre os mesmos.

Esses componentes são modelados de maneira simplificada, a exemplo disso, uma torre de transmissão pode ser representada por uma linha de transmissão vertical de impedância de surto constante e sem perdas, e o aterramento por meio de sua resistência de baixa frequência. Esses componentes são de extrema importância no desenvolvimento de novas modelagens, principalmente, considerando o acoplamento eletromagnético total entre os componentes da linha.

O cálculo do transitório eletromagnético na linha devido à incidência direta das descargas tem como objetivo a determinação de valores de sobretensão resultantes sobre os isolamentos da linha, podendo avaliar a ocorrência de ruptura elétrica e desligamentos do sistema (CIGRÉ, 1991; SOARES ET AL, 2000; SOARES, 2001; VISACRO & PORTELA, 1992).

O cálculo do transitório deve ser efetuado para diferentes pontos de incidência de descargas, ou seja, sobre a torre ou nos cabos aéreos ao longo do vão, ou numa parte aterrada (cabos pára-raios e torre) ou em uma parte energizada (condutores de fases). Como a incidência se dá em qualquer um destes lugares a rigidez dielétrica do isolamento à tensão gerada deve ser avaliada em diversos pontos.

A modelagem citada é dedicada ao cálculo de transitórios em aterramentos elétricos (VISACRO et al, 1995; SOARES et al, 1997) e posteriormente estendido a sistemas de condutores aéreos. A resposta do sistema é obtida no domínio da frequência e convertida para o tempo por meio da Transformada de Fourier. Nesse modelo os condutores que representam diversos elementos da linha (cabos aéreos, torres e aterramentos) são divididos em segmentos menores. Dessa forma, admite-se que cada segmento seja percorrido por dois tipos de correntes.

A corrente longitudinal é a que flui ao longo do segmento e representa uma fonte de campo senoidal, que provoca a queda de tensão nesse segmento (impedância longitudinal própria) e nos demais segmentos (impedância

longitudinal mútua). A corrente transversal atravessa o segmento ao longo de sua extensão, provocando um aumento de potencial em relação ao infinito neste segmento (impedância transversal própria), e nos outros (impedância transversal mútua). Parâmetros tais como, resistividade, permissividade e permeabilidade, são usados para computar as impedâncias de elementos no ar e no solo (SOARES et al, 1997).

A conexão entre os segmentos fornece um sistema de equações que gera os valores para os diversos parâmetros após sua solução. Neste tipo de abordagem, costuma-se desprezar os efeitos não lineares (corona e ionização do solo).

As tensões induzidas por descargas atmosféricas em linhas com diferentes configurações têm sido também uma constante. Nesses estudos são utilizadas simulações computacionais baseadas na teoria de Rusck (RUSCK, 1958), bem como em ensaios experimentais realizados em modelos reduzidos (escala reduzida).

A utilização da teoria de Rusck é dada exclusivamente pelos resultados consistentes que a mesma conduz, sendo que NUCCI (1995) e COORAY (1994) podem ser encontradas a base para essa afirmação. O modelo desenvolvido nesse trabalho é uma extensão do modelo de Rusck, pois o mesmo possui diversas limitações e simplificações na sua aplicação, ou seja, não pode ser generalizado para diversos casos. O modelo em evidência permite que os cálculos sejam efetuados considerando o comprimento do canal do “return stroke” (descarga de retorno), a ocorrência de descargas em estruturas metálicas próximas à linha, a ocorrência do líder ascendente, o comprimento da linha, as linhas com ângulos e finalmente, as linhas com diferentes condições de terminação.

Levando-se em conta o comprimento da linha e seus ângulos, verifica-se por meio dos resultados de DIENDORFER (1990) que para o caso de uma linha infinita, a amplitude da tensão não se altera quando o cálculo é feito em um ponto que esteja a uma distância superior a 500m de ambas as extremidades, uma vez que nesta condição o efeito do comprimento da linha só é sentido após a tensão ter atingido seu valor de crista. As tensões induzidas com ângulo podem diferir

daquelas referentes às linhas retas, sobretudo, se o ponto de incidência da descarga for próximo a uma derivação (DIENDORFER, 1990).

Para as condições de diferentes terminações de linha utiliza-se uma linha de teste e uma outra de referência sendo suas terminações: extremidade casada e outra em aberto, ambas as extremidades em aberto, ambas as extremidades em curto-circuito, uma extremidade casada e a outra em curto-circuito e uma extremidade em curto-circuito e a outra em aberto. Verifica-se a partir dessas simulações que as condições de terminação da linha podem ter influência na forma de tensão induzida. Sendo que, esse efeito torna-se mais importante quanto menor for o comprimento da linha (ERIKSSON et al, 1982).

As tensões induzidas por descargas indiretas é um importante fator no projeto da isolação de linhas de distribuição aéreas. As tensões induzidas sobre essas linhas devido às descargas do tipo “return-strokes” (próximos de 50 a 500 metros) é a causa de danos mais freqüentes em relação às descargas diretas, tendo em vista que essas descargas ocorrem com mais freqüência (AGRAWAL et al, 1980). A estimação da magnitude e a forma de onda das sobretensões induzidas por descargas em linhas têm sido objeto de vários estudos (NUCCI, 1993).

Existem outros tipos de estudos, cujo embasamento teórico envolve de maneira sistemática a especificação da distribuição espacial e temporal da descarga de corrente através do canal direto do aterramento. Os cálculos dos campos elétricos produzidos pelo canal de corrente e pela tensão induzida devido ao acoplamento destes campos com a linha são discutidas no modelo de Agrawal (AGRAWAL et al, 1980).

Para o cálculo dos campos magnéticos dessas descargas, assume-se um canal vertical sobre um condutor de aterramento perfeito. Para a aplicação da descarga de corrente “return stroke” utiliza-se a mesma forma de onda utilizada por NUCCI (1993). Assumindo que a terra é um condutor perfeito é possível calcular o campo eletromagnético vertical e horizontal irradiado pela proximidade do canal de descarga no domínio do tempo usando as equações dadas por UMAN (1985).

### 3.1.) HISTÓRICO DA PLATAFORMA COMPUTACIONAL EMTP/ATP

O programa EMTP (Electromagnetic Transients Program) foi criado inicialmente por Herman W. Dommel na década de 60, com base no trabalho de Frey e Althammer (Brown Boveri, Switzerland), em Munique, na Alemanha (ATP-EMTP RULE BOOK, 1997).

O programa inicial só permitia a modelagem de circuitos monofásicos por meio de modelos indutivos, resistivos, capacitivos e linhas de transmissão sem perdas, incluindo uma chave e uma fonte de excitação. Os elementos concentrados utilizavam a regra de integração trapezoidal e as linhas de transmissão o método de Bergeron.

Dommel trabalhou na BPA (Boneville Power Administration - USA), entre 1964 e 1973, no desenvolvimento de vários modelos que foram incorporados ao programa com ajuda de diversos colaboradores. A partir de 1973, Dommel foi para a UBC (Universidade de British Columbia - Canadá) e Scott Meyer assumiu a coordenação do desenvolvimento do programa na BPA, estabelecendo um processo articulado com os usuários do EMTP, que tornou o programa uma ferramenta bastante poderosa para a simulação de fenômenos transitórios. Atualmente, existem Grupos de Usuários do EMTP em várias regiões do mundo (ATP-EMTP RULE BOOK, 1997).

Em 1984 o EPRI (Electric Power Research Institute - USA) decidiu investir no EMTP, tendo sido criado o DCG (Development Coordination Group) com a finalidade de melhorar os modelos e a documentação existentes na época.

Scott Meyer criou uma nova versão do EMTP denominada de ATP (Alternative Transients Program) (ATP-EMTP RULE BOOK-LEUVEN, 1987), a partir da versão M39 do EMTP e instalada no LEC (Leuven EMTP Center - Leuven-Bélgica), o qual centralizou a distribuição do ATP até o final de 1992, quando, então, a BPA e Scott Meyer voltaram a exercer novamente a efetiva coordenação do desenvolvimento do programa (ATP-EMTP RULE BOOK, 1997).

Atualmente, o programa é uma ferramenta de grande flexibilidade e de grande importância para a realização de estudos de transitórios em sistemas de potência, ou mesmo, de estudos de regime permanente onde a topologia da rede, ou o problema a ser estudado, não permite uma simples representação monofásica. O programa dispõe de praticamente todos os modelos necessários a qualquer tipo de estudo de transitórios e rotinas auxiliares para a representação de sistemas de controle e de componentes não convencionais (ATP-EMTP RULE BOOK, 1997).

O EMTP começou a ser usado no Brasil nos primeiros anos da década de 70, mas o passo mais importante foi em 1976 quando um grupo de trabalho composto por representantes de várias empresas brasileiras iniciou um trabalho de um ano visando à análise do EMTP e sua implantação no Brasil.

A primeira versão do EMTP foi instalada em Furnas, Centrais Elétricas S/A, em 1975, a qual não passava de 5000 linhas de comandos, tendo sido necessário incluir a possibilidade de realizar estudos de chaveamento estatístico. Durante muitos anos as versões do EMTP mais populares no Brasil foram às versões para computadores IBM de grande porte. Entre 1989 e 1992, Furnas participou do Leuven EMTP Center e uma nova fase do desenvolvimento do EMTP começou com o lançamento das primeiras versões para computadores pessoais do tipo IBM PC.

Todos os casos testes e modelos existentes na versão IBM foram integralmente analisados e alguns casos foram comparados com resultados obtidos em ensaios de campo e estudos em TNA (Transient Network Analyser). O trabalho foi coordenado por representantes de Furnas, e uma consequência natural do trabalho desenvolvido foi à criação do Comitê Brasileiro de Usuários do EMTP. A coordenação do Comitê coube a Furnas, sem custos de qualquer espécie para a distribuição das versões e da documentação relacionada com o EMTP (ATP-EMTP RULE BOOK, 1997).

Investimentos de grande porte foram aplicados em atividades relacionadas com treinamentos na área de transitórios eletromagnéticos e utilização do EMTP em vários seminários e cursos pelo Brasil e em outros países da América Latina.

As versões IBM do EMTP foram muito importantes para as empresas do Brasil e da América Latina até a década de 90, quando o ATP surgiu como uma alternativa importante devido aos investimentos realizados em micro informática. Houve um período entre 1990-1992 onde o interesse nas versões IBM era manifestado quase que exclusivamente pelas companhias brasileiras (ATP-EMTP RULE BOOK, 1997).

### **3.2.) TENSÕES INDUZIDAS UTILIZANDO O EMTP**

Pesquisas relacionadas à implementação da Teoria de Rusck sobre tensões induzidas por descargas atmosféricas em linhas de transmissão no EMTP (Electromagnetic Transients Program), estão presentes nos principais centros de pesquisa em todo o mundo.

Normalmente, uma análise teórica do problema é realizada para posterior implementação do modelo de Rusck e o EMTP, deixando como etapas subseqüentes à comparação dos resultados obtidos com o modelo de Nucci. Uma abordagem prática também é freqüentemente utilizada em diversos trabalhos (PAULINO et al, 1993) por meio de simulações feitas com medições em linhas de distribuição.

Existem, atualmente, muitas teorias cujo objetivo é o cálculo das tensões induzidas por descargas atmosféricas em linhas e equipamentos (MASTER & UMAN, 1984). Uma dessas teorias que sobreviveram a todos os tipos de testes foi à proposta de S. RUSCK (1957).

Em sua tese de doutorado, Rusck desenvolveu, a partir das equações de Maxwell, uma expressão analítica para a tensão induzida por uma descarga atmosférica em uma linha ideal infinita. Uma extensão do trabalho de Rusck para linhas finitas com descontinuidade é apresentada em PAULINO et al (1994). A teoria de Rusck calcula tensões, ao longo da linha, induzidas por uma descarga atmosférica em qualquer instante de tempo.

Um dos mais poderosos e utilizados programas para o cálculo de transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência tem sido o EMTP (DOMMEL, 1992; MICROTRAN, 1991). Apesar desse programa conter diversas modelagens, ele não está preparado para trabalhar com fontes distribuídas alimentando linhas de transmissão. Desta forma, torna-se necessário a sua adaptação de forma que simule, por meio de fontes distribuídas, os transitórios induzidos por descargas atmosféricas em linhas de energia.

### 3.2.1.) *TEORIA DE RUSCK*

Segundo essa teoria, é possível obter uma expressão analítica que descreva a tensão induzida por descarga atmosférica em qualquer ponto de uma linha homogênea infinita. Linhas finitas com descontinuidades podem ser consideradas se a teoria for ligeiramente modificada. Esse tipo de modificação usa fontes de corrente conectadas a segmentos da linha e foi apresentada por Rusck em seu trabalho original, sendo também utilizada por ANDERSON & SHORT (1980) e PORTO & PAULINO (1990) mais recentemente.

O campo elétrico criado por uma descarga atmosférica é calculado por RUSCK (1958) usando a clássica expressão:

$$E = -\nabla V_i - \frac{\partial A_i}{\partial t} \quad (3.1)$$

onde:

$V_i$  - Potencial elétrico (escalar);

$A_i$  - Campo magnético (vetorial).

Em sua teoria, RUSCK (1958) propõe que a tensão induzida numa linha de transmissão homogênea e infinita possa ser calculada por:

$$V(x, t) = U_E(x, t) + U_V(x, t) \quad (3.2)$$

$$U_E(x, t) = \left( \frac{1}{2v_0} \right) \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\partial V_i \left( u, t - \frac{|x-u|}{v_0} \right)}{\partial t} du \quad (3.3)$$

$$U_V(x, t) = h \frac{\partial A_i(x, t)}{\partial t} \quad (3.4)$$

onde:

x - ponto ao longo da linha;

t - tempo;

$v_0$  - velocidade de descarga de retorno;

u - variável de integração;

h - altura da linha;

$U_E(x, t)$  - componente originada no potencial elétrico - escalar;

$U_V(x, t)$  - componente originada no potencial magnético - vetor.

RUSCK (1958) mostrou em sua tese que a equação (3.3) pode ser resolvida pela aplicação de fontes de corrente ao longo da linha. A teoria por ele desenvolvida fornece a fonte de corrente advinda do potencial elétrico “ $U_E$ ”. A outra fonte de corrente está relacionada ao campo magnético “ $U_V$ ”.

### 3.2.2.) FONTE DE CORRENTE – POTENCIAL ELÉTRICO ESCALAR

A fonte de corrente a ser injetada na linha para representar o potencial elétrico escalar é comentada em PAULINO et al (1994):

$$I_{ei}(x, t) = \frac{1}{v_0 Z} \cdot \frac{\partial V_i(x, t)}{\partial t} \cdot \Delta x \quad (3.5)$$

onde “Z” é a impedância de surto da linha.

Para incorporar essas fontes no EMTP é necessário discretizar a linha em segmentos de comprimento  $\Delta x$ , como ilustrado na Figura 3.1. As fontes terminais ( $I_{e1}$  e  $I_{en}$ ) têm seus valores divididos por dois, pois os segmentos terminais tem comprimento  $\Delta x/2$ .

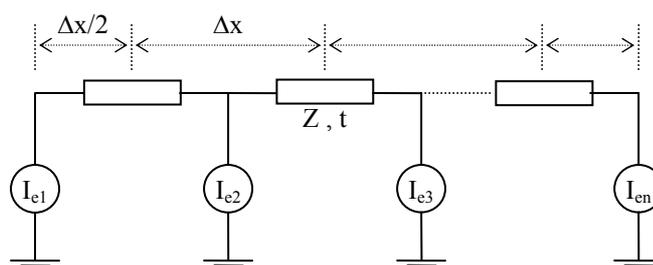


Figura 3.1 - Fonte de Corrente Injetada  
(Fonte: Adaptado de RUSCK, 1958)

$Z$  - Impedância de surto

$t$  - tempo de trânsito

### 3.2.3.) FONTE DE CORRENTE – CAMPO MAGNÉTICO VETORIAL

Sem nenhuma descontinuidade na linha, a tensão induzida pelo vetor potencial magnético é adicionada à tensão induzida obtida pelo transitório causado pelas fontes de corrente criadas pelo potencial elétrico escalar. A tensão que deve ser somada é:

$$V_1(x, t) = h \frac{\partial A_i(x, t)}{\partial t} \quad (3.6)$$

Neste caso, devido ao fato do EMTP trabalhar com equações nodais, a tensão  $V_1$  da equação 3.6 pode ser calculada por meio de uma fonte de corrente equivalente. Para isso, é necessário fazer o arranjo mostrado na Figura 3.2. Essa figura mostra que a fonte de corrente é conectada a linha previamente discretizada

por meio de uma resistência de alto valor “ $R_1$ ”. Se ( $R_2=1\Omega$ ) é conectada em paralelo à “ $I_{vi}$ ”, a diferença de potencial entre os nós “ $a_i$ ” e “ $b_i$ ” é exatamente a soma das tensões induzidas pelos potenciais escalar e vetor magnético.

Quando há uma descontinuidade para a terra, a componente do campo elétrico, originária do potencial magnético (vetorial), produzirá uma circulação de corrente na linha, sendo, portanto, necessário o cálculo do transitório eletromagnético que essa corrente causará. Para isso, é necessário fazer “ $R_1$ ” igual a 0 e  $R_2$  igual à resistência que represente o elemento “shunt”. Por exemplo, se a descontinuidade para terra for um ponto de aterramento, “ $R_2$ ” será a resistência de aterramento. Se a descontinuidade for um equipamento qualquer, o processo é o mesmo, pois o EMTP modela todos os elementos por uma fonte de corrente e uma resistência equivalente.

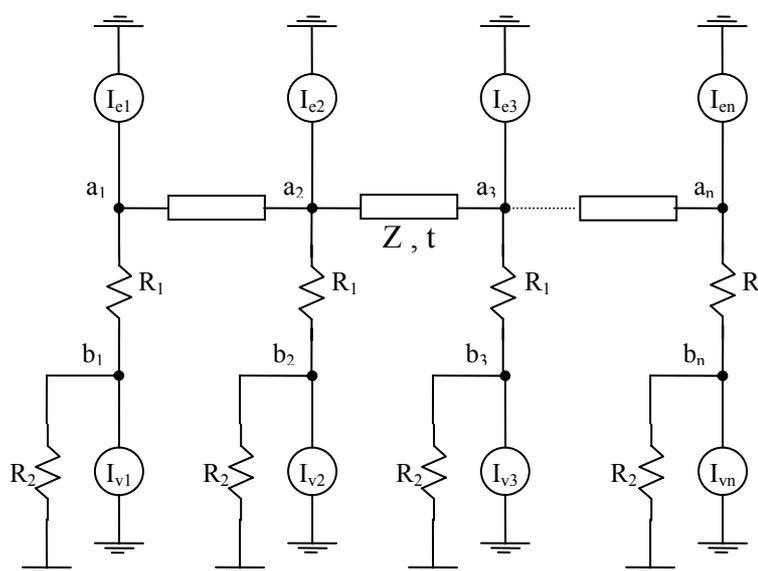


Figura 3.2 - Fontes de Corrente na Implementação do EMTP  
(Fonte: Adaptado de RUSCK, 1958)

#### 3.2.4.) IMPLEMENTAÇÃO NO EMTP

A implementação da teoria de Rusck no EMTP apresentada nesta dissertação tiram proveito de uma subrotina existente na versão MICROTRAN (1991) denominada de CONNEC. Neste caso, o EMTP usa o método da compensação para tratar elementos não lineares. O princípio básico deste método é excluir da rede o ramo da não linearidade e substituí-lo por uma fonte de corrente (DOMMEL, 1992). O valor da corrente dependerá do equivalente de Thevenin da rede (visto dos nós da não linearidade) e da não linearidade propriamente dita. Assim, a equação da rede juntamente com a do elemento não linear deve ser resolvida simultaneamente. A Figura 3.3 ilustra essa situação.

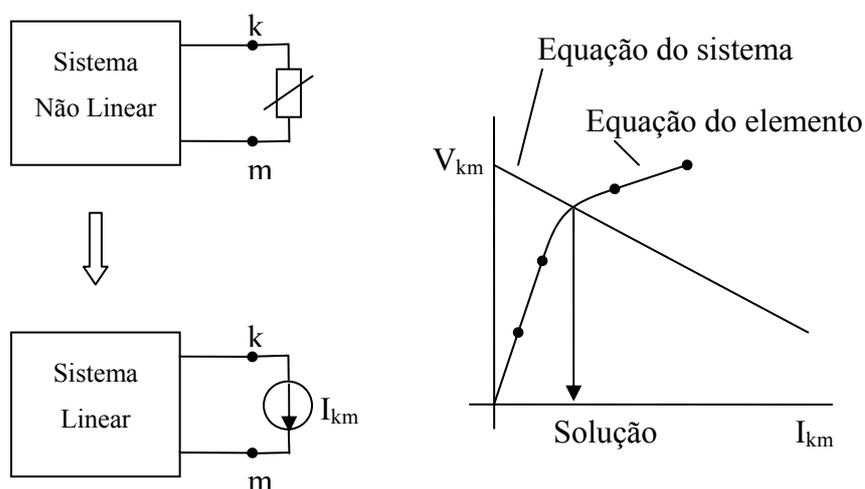
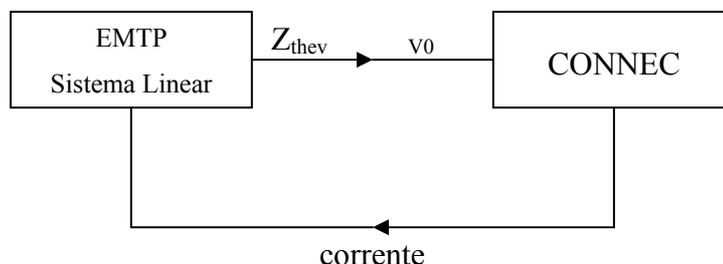


Figura 3.3 - Método de Compensação no EMTP  
(Fonte: Adaptado de MICROTRAN, 1991)

A versão “MicroTran” mencionada anteriormente disponibiliza ao usuário a utilização do Método de Compensação para qualquer elemento que venha a ser conectado a dois nós quaisquer de uma rede a ser simulada, sem qualquer modificação do programa fonte. O EMTP calcula, em cada passo de tempo, o equivalente “Thevenin” da rede visto de quaisquer conjunto de nós previamente definidos. A subrotina deve retornar ao programa principal o valor da corrente no elemento não linear, como mostra a Figura 3.4. Assim, a subrotina “CONNEC” possibilita ao usuário escrever um pequeno programa que descreva seu elemento não linear (por exemplo, fontes de corrente distribuídas da teoria de Rusck) e

interfaceá-la com o EMTP, sem a menor modificação no programa fonte do mesmo.



*Figura 3.4 - Subrotina CONNEC e sua Interface com o Programa Principal*  
(Fonte: Adaptado de MICROTRAN, 1991)

Em 1993, NUCCI et al (1993) apresentaram uma metodologia de cálculo de tensões induzidas em linhas aéreas de transmissão causadas por descargas atmosféricas (NUCCI et al, 1993 e 1995), no qual a interação campo-linha foi feita segundo a formulação desenvolvida por AGRAWAL et al (1980). Duas comparações foram feitas para o modelo de Rusck: a primeira é com a modelagem de Nucci; a segunda é com medições realizadas na África do Sul (GELDENHUYS, 1990).

Por meio da utilização de fontes de corrente para a representação das componentes do campo elétrico obtido pela teoria de Rusck, é possível o cálculo do transitório induzido por descargas atmosféricas em linha de energia usando-se o EMTP. A implementação de fontes generalizadas de corrente foi realizada pelo método da compensação (CONNEC).

Algumas comparações foram feitas para mostrar a precisão e eficácia do método. Então, evidenciou-se pelos resultados obtidos em (GELDENHUYS, 1990), que as simulações pelo EMTP utilizando a teoria de Rusck, reproduziu com grande eficácia os resultados de Nucci. As pequenas diferenças observadas neste caso estão relacionadas às diferentes formas de representação da corrente de descarga.

### **3.3.) CONSIDERAÇÕES SOBRE A INCIDÊNCIA DE DESCARGAS INDIRETAS**

Uma descarga atmosférica entre a nuvem e o solo, incidindo em um ponto no solo próximo da linha (descarga indireta), pode eventualmente induzir sobretensões nos cabos das linhas, em geral mais moderadas do que aquelas oriundas das descargas diretas, conforme apresentados em DARVENIZA (1997) e IEEE GUIDE 1410 (1997).

No caso de linhas de baixa tensão ou média tensão nominal até 35kV, uma grande parte dessas sobretensões resultantes nos cabos podem ser superiores ao nível de isolamento da linha (NBI), originando um arco elétrico e por consequência um curto-circuito na linha. Na maioria dos casos, essas linhas não têm cabos pára-raios e, logo, estão sujeitas a falharem todas as vezes que forem atingidas por uma descarga direta. Mesmo assim, nessas linhas, o número de curtos-circuitos devido às descargas indiretas pode ser superior ao número de curtos-circuitos devido às descargas diretas (IEEE GUIDE 1410, 1997).

Entretanto, o efeito dessas descargas pode ser bastante reduzido quando se aumenta o nível de isolamento da linha, o que pode ser feito das seguintes formas:

- i) uso de isolador com maior nível de isolamento ou uso de um número maior de isoladores de suspensão;
- ii) isolamento de estais laterais com 2 isoladores de disco ou abaixamento do ponto de fixação dos estais;
- iii) alteração da instalação das mãos-francesas ou uso de mãos-francesas não metálicas, de modo a se aproveitar melhor as características dielétricas da madeira dos postes e das cruzetas. É importante mencionar que com o aumento do nível de isolamento das estruturas, os pára-raios passarão a ser mais exigidos, o que torna obrigatório o controle de sua qualidade.

Atualmente, discute-se que o número de curtos-circuitos provocados por descargas indiretas é muito sensível à altura dos cabos em relação ao solo, sendo tanto maior quanto maior esta altura. Além disso, pode-se obter uma redução importante do número de curtos-circuitos provocados por descargas indiretas otimizando a disposição e características dos cabos pára-raios. Entretanto, essa otimização deve ser efetuada considerando cada caso, e tendo também em conta a influência dos cabos pára-raios no número de desligamentos, em virtude de haver vários efeitos que podem ser da mesma ordem de grandeza, o que pode impossibilitar a aplicabilidade de critérios gerais e simples para essa otimização.

#### **3.4.) SOBRETENSÕES INDUZIDAS POR RAIOS: A INFLUÊNCIA DE DESCARGAS E PARÂMETROS DE LINHA**

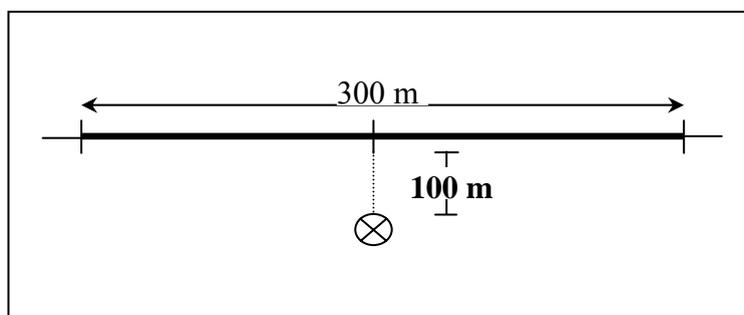
Os trabalhos de SILVEIRA et al (2002) investigam o comportamento de algumas descargas atmosféricas e parâmetros de linha sobre o perfil das sobretensões induzidas por raios. Nessas pesquisas são realizadas simulações usando um modelo eletromagnético que é capaz de, simultaneamente, computar a distribuição de corrente através do canal (representado como um condutor vertical que recebe a descarga) e o acoplamento magnético entre o canal e a linha. Análises de sensibilidade são apresentadas para relacionar a influência de parâmetros da descarga, tais como: o ponto de atração, a forma geométrica do canal e as perdas no núcleo do canal, além de parâmetros de linha (altura da linha, presença de fio terra, número de conexões ao solo, valor da impedância do pé da torre, distância entre os cabos da fase e o fio terra) sobre a amplitude das sobretensões induzidas por raios.

Nas pesquisas de (VISACRO et al, 2002; SILVEIRA, 2001) têm sido utilizado um modelo para aplicações de problemas envolvendo descargas atmosféricas, que é capaz de computar a interação eletromagnética entre o canal “return stroke” e condutores de linha e também ao mesmo tempo a distribuição de corrente através do canal. Essa distribuição é determinada por meio da

representação de características físicas do canal. Desta maneira, o modelo também é capaz de computar a resistividade finita do solo.

O solo tem sido considerado como um perfeito condutor para não prejudicar os resultados. A corrente aplicada no canal apresenta uma rampa de  $1/50 \mu\text{s}$  com 1kA de pico, a qual foi escolhida para identificar o comportamento de sobretensões induzidas por raios. As simulações realizadas por SILVEIRA et al, 2001) utilizaram um canal com um comprimento de 900m, sendo que, por meio das mesmas, observou-se que qualquer aumento no comprimento não produziria nenhuma influência nas sobretensões induzidas (SILVEIRA et al, 2001).

Neste estudo (SILVEIRA et al, 2001), o ponto de incidência da descarga foi posicionado a 100 metros de distância do centro da linha. Uma linha de 300 metros de comprimento e 10 metros de altura foi utilizada na aplicação como um condutor simples. Todas as impedâncias foram dispostas nas terminações da linha a fim de minimizar os efeitos das reflexões eletromagnéticas. Esta configuração está representada na Figura 3.5.



*Figura 3.5 - Ponto de descarga considerado nas simulações.*

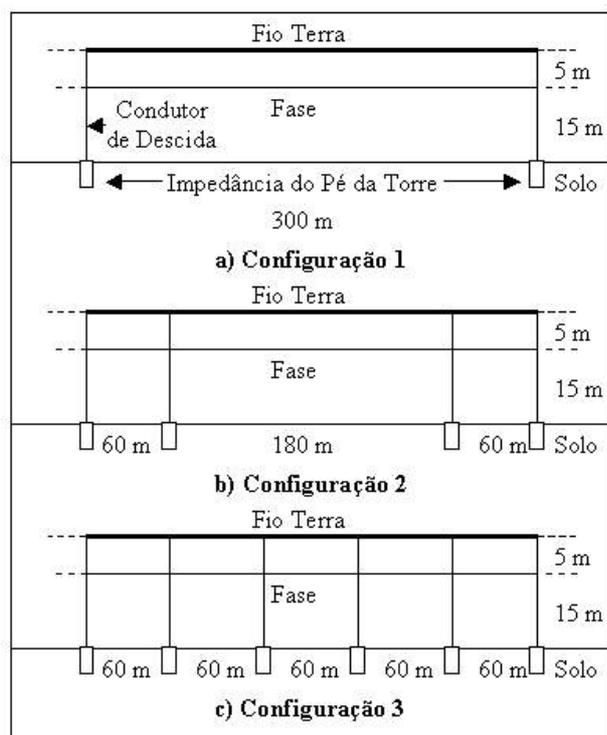
(Fonte: Adaptado de SILVEIRA et al, 2001)

Os resultados desse trabalho (SILVEIRA et al, 2001) podem ser divididos em três partes. Na primeira parte são apresentadas as análises da influência de parâmetros da descarga em sobretensões induzidas por raios. Na segunda parte apresenta a análise relacionada com os parâmetros de linha e por último, é apresentado um estudo preliminar sobre a influência de sobretensões induzidas na

entrada de serviço de consumidores (RAKOV & UMAN, 1998). Na avaliação da altura do ponto de atração em sobretensões induzidas, foram simuladas três condições: uma considerando a altura da superfície do solo, a outra 100m acima e finalmente, 300m acima e a velocidade da luz para a propagação da corrente.

Os resultados obtidos por (NUCCI, 1995) para essas condições demonstram que o aumento na altura do ponto de atração faz com que ocorra um aumento na sobretensão induzida. Para o ponto de atração de 300m acima do solo, a sobretensão excedeu 100% da sobretensão ao nível do solo. Esse incremento pode ser explicado pela dupla contribuição da onda de corrente para 300m, pois as componentes da corrente de retorno (a onda que sai do ponto de atração para cima e a que vem de cima e entra no ponto de atração e depois refletida) contribuem com o campo eletromagnético que atinge a linha. No caso da corrente que sai do nível da superfície do solo, apenas uma componente contribui, a que sai do ponto de atração para cima.

Nesse trabalho (NUCCI, 1995) foram utilizadas três configurações para linha de transmissão para analisar sua influência na sobretensões induzidas por raios. A diferença entre as configurações utilizadas está no número de condutores de descida que conectam o fio terra ao solo. A Figura 3.6 apresenta as configurações adotadas nestes estudos.



*Figura 3.6 - Configurações de Linha*  
(Fonte: Adaptado de SILVEIRA et al, 2001)

Para uma melhor avaliação das configurações foram simuladas por (SILVEIRA et al, 2001) três alturas de linha diferentes: 5, 10 e 15 metros. Os resultados apresentam um incremento na sobretensão induzida com aumento da altura. Esse incremento se dá visto que existe um proporcional aumento do fluxo magnético que atravessa a região limitada pela superfície do solo e os condutores da linha (altura da linha).

Para análise da influência do fio terra foi utilizada na simulação a configuração apresentada na Figura 3.6a, ou seja, um fio terra 5m acima da fase e a fase, 15m acima do solo. Ambos os fios possuíam a mesma terminação a fim de minimizar efeitos de reflexões. Uma impedância de aterramento de  $50\Omega$  foi adotada para ambas conexões. Por meio das simulações foi constatada uma redução na sobretensão induzida em 15%, considerando a presença do fio terra e não considerando. Além disso, para a simulação com a presença do fio terra, foi observada uma oscilação da forma de onda da sobretensão, a qual pode ser

atribuída às reflexões nas terminações da linha (RUSCK, 1958 e SILVEIRA et al, 2001).

Para a avaliação do número de condutores de descida para o solo foram simuladas 3 configurações como a apresentada na Figura 3.6a, 3.6b e 3.6c, para respectivamente 2, 4 e 6 condutores de descida e impedância de aterramento de  $50\Omega$ . Os resultados obtidos demonstram que conforme se aumenta o número de conexões ao solo a amplitude das sobretensões induzidas é diminuída. A linha com 4 condutores de descida conectados ao solo apresentou uma diminuição de 47% em relação à de 2 condutores e a linha com 6 uma diminuição de 67%.

Para análise da influência da impedância do pé da torre utilizou-se a configuração 2 (Figura 3.6b), e variou-se o valor da impedância em 10, 30, 50 e  $80\Omega$ . Para o caso em estudo, a variação da impedância não mudou o primeiro pico da sobretensão induzida, mas os outros picos seguintes da forma de onda oscilatória foram reduzidos, sendo que a maior redução desse valor deu-se para a impedância de  $80\Omega$  (SILVEIRA et al, 2001).

Apesar de ser um resultado interessante, não é adequado do ponto de vista do stress da linha, pois, o primeiro pico não é reduzido, neste caso o número de condutores de descida é o fator mais relevante devido à diminuição do primeiro pico e os picos seguintes (SILVEIRA et al, 2001 e AGRAWAL et al, 1980).

### ***3.4.1) APLICAÇÃO DE MODELOS ELETROMAGNÉTICOS***

O trabalho elaborado por COORAY (1998) fundamentou-se na avaliação da influência de algumas características físicas do canal de descarga sobre uma distribuição de corrente de retorno espacial e temporal. Os resultados de COORAY (1998) são obtidos em simulações por meio de um modelo eletromagnético desenvolvido para esta finalidade. Neste trabalho, pode-se analisar o efeito da variação da forma geométrica do canal e as perdas no núcleo do mesmo sobre a velocidade da corrente de retorno e a atenuação através do canal. Pode-se citar também algumas outras conclusões:

- A diminuição da amplitude da onda de corrente pelo canal pode ser atribuída às perdas no núcleo do canal.
- A variação da forma geométrica foi responsável pela redução da velocidade de propagação da corrente.
- Admitindo a propagação da descarga para cima e determinadas as condições para representação do canal, a variação da onda de corrente foi significativa, principalmente para canais de altura menor.

### **3.5.) INFLUÊNCIA DA IMPEDÂNCIA DE SURTO NO DOMÍNIO DO TEMPO**

Um modelo baseado na representação de canais de descarga para uma linha de transmissão tem sido desenvolvido em DIENDORFER & SHULZ (1998) para analisar o perfil de corrente através do canal de descarga. O modelo pode representar características físicas do canal, como a forma geométrica e as perdas no núcleo do canal. Simulações sistemáticas foram realizadas por DIENDORFER & SHULZ (1998), a fim de comparar seus resultados com outros modelos eletromagnéticos elaborados anteriormente. O modelo tem a capacidade de representar toda a dinâmica do canal, bem como permitir a inclusão de outros elementos como torres e sistemas de aterramento.

### **3.6.) MÉTODOS INDIRETOS PARA MEDIÇÃO DA CORRENTE DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

O estudo realizado por COLLUMS & MURPHY (1998) apresenta um método de medição indireta de parâmetros da corrente de descarga atmosférica. A metodologia emprega um dispositivo, que é capaz de registrar a forma de onda da descarga. O sistema desenvolvido fornece dados de referência para medições do “Sistema de Localização de Raios” (LLS), instalado no estado de Minas Gerais.

Pela comparação entre os dados relacionados às ocorrências locais e as indicações do LLS, o erro pode ser estimado e correções podem ser implementadas.

Os primeiros resultados experimentais de COLLUMS & MURPHY (1998) demonstraram que o sistema funciona muito bem. Porém, existe a necessidade de mais testes, além do desenvolvimento de outros sistemas semelhantes que devem ser distribuídos em todo o estado de Minas Gerais para permitir a calibração do LLS.

### **3.7.) ESTUDOS ENVOLVENDO OS SISTEMAS DE AQUISIÇÃO DE DADOS**

Descargas atmosféricas são responsáveis por um grande número de defeitos e interrupções em linhas de distribuição. Por esta razão, as sobretensões causadas pelas descargas atmosféricas diretas podem alcançar altíssimas amplitudes, a tensão induzida por descarga na vizinhança da linha usualmente representa um dos mais sérios problemas devido à sua alta frequência de ocorrência.

Neste sentido, a importância de obter mais dados de campo tem motivado o desenvolvimento e implementação de sistemas para aquisição de dados de descargas atmosféricas, com uma especial referência para sobretensões induzidas por raios.

YOKOHAMA (1983) têm como objetivo caracterizar sobretensões induzidas por raios em linha com e sem pára-raios, levando-se em conta a incidência de uma descarga próxima de uma linha não convencional, projetada e construída especialmente para este tipo de abordagem. É importante ressaltar que as formas de ondas das sobretensões induzidas são gravadas em diferentes pontos no decorrer da linha. No caso das descargas diretas, uma torre de 62,5m de altura foi construída para o estudo, distante 67m da linha, onde a corrente da descarga é medida.

### **3.8.) TENSÕES INDUZIDAS DEVIDO ÀS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

Os principais aspectos que integram o processo de simulação do fenômeno físico relacionado às descargas atmosféricas próximas às linhas de transmissão e distribuição são descritos de maneira resumida neste item.

#### **3.8.1.) MODELAMENTO DA DESCARGA ELÉTRICA**

Dentre esses aspectos, destaca-se o estudo realizado por BEWLWY (1963), o qual baseou-se na análise do colapso do campo eletrostático nas vizinhanças de sistemas de distribuição de energia elétrica, causado por descargas atmosféricas entre as nuvens, ignorando o efeito do campo eletromagnético associado às descargas de retorno. Neste trabalho, explorou-se a avaliação da influência das formas de ondas das descargas em um sistema de distribuição de energia elétrica.

Em um outro trabalho, WAGNER & MCCANN (1942) demonstraram que o impacto de campos associados à descarga de retorno pode ser mais importante do que o efeito do campo eletrostático das nuvens em relação ao fenômeno de sobretensões induzidas próximo às linhas. Nesses tipos de estudos, a tônica tem sido a discussão de que a velocidade da descarga é uma variável muito importante no equacionamento matemático do fenômeno, afetando significativamente os resultados (LUNDHOLM, 1958 e RUSCK, 1958).

Então, baseado nestas premissas, BERGER (1977) sugeriu um valor para a velocidade da descarga entre 20 e 110m/μs. Por outro lado, GOLDE (1942), comprovaram matematicamente que a velocidade da descarga de retorno reduz exponencialmente quando a descarga sai da terra em direção à nuvem, como pode ser observado na equação abaixo:

$$v(t) = v_0 \exp(-\gamma) \quad [\text{m/seg}] \quad (3.7)$$

$v_0$  - Velocidade inicial de retorno (m/s)

$\gamma$  - Parâmetro de Bruce.

Neste mesmo período, LUNDHOLM e RUSCK (1958) estabeleceram a relação entre a velocidade e a magnitude da descarga da seguinte forma:

$$v = \frac{c}{\sqrt{1 + \frac{500}{I}}} \text{ [m/}\mu\text{s]} \quad (3.8)$$

Onde:

$c$  - Velocidade da luz (m/s)

$I$  - Magnitude da corrente de retorno da descarga (A).

### 3.8.2.) *MODELO DE CORRENTE MÓVEL*

O “Modelo de Corrente Móvel” (NUCCI et al, 1993) assume uma fonte de corrente equivalente ascendente pelo canal da descarga, considerando uma velocidade da descarga entre 20 e 110 m/ $\mu$ s. A corrente elétrica que flui da fonte móvel tem a velocidade da luz, de acordo com as expressões abaixo:

$$I(z', t) = I(0, t + z'/c) \quad \text{para } z' \leq vt \quad (3.9)$$

$$I(z', t) = 0 \quad \text{para } z' \geq vt \quad (3.10)$$

Onde:

$I(z', t)$  - corrente elétrica na posição  $z'$  do canal plasmático (kA).

$z'$  - posição (elevação) no canal plasmático (m).

$t$  - tempo (s).

$c$  - velocidade da luz (m/s).

$v$  - velocidade da descarga (m/s).

### 3.8.3.) *MODELO DA LINHA DE TRANSMISSÃO MODIFICADA*

O “Modelo da Linha de Transmissão Modificada” (CHOWDHURI, 1984) também tem sido muito empregado em estudos de tensões induzidas. Neste modelo a corrente elétrica diminui em função da altura do canal em relação ao solo:

$$I(z',t) = \exp(-z'/\lambda).I \quad (3.11)$$

Onde:

$\lambda$  - é a constante de decaimento.

### 3.8.4.) *MODELO DE DISTRIBUIÇÃO UNIFORME DAS CARGAS*

No estudo de CHOWDHURI (1984, 1989 e 1990) o mesmo utiliza um modelo peculiar para a descarga elétrica. A principal premissa deste modelo é que a carga elétrica é uniformemente distribuída por todo canal de descarga entre a nuvem e a terra.

## 3.9.) O MÉTODO DO IEEE

No Guia IEEE (IEEE GUIDE 1410, 1997), a fórmula simplificada apresentada por RUSCK (1959) tem sido adotada para avaliar a tensão induzida por descargas atmosféricas. A fórmula de Rusck fornece o valor máximo da tensão induzida  $V_{\max}$  (em kV), no ponto de uma linha próximo ao local da incidência da descarga atmosférica.

$$V_{\max} = Z_0 \frac{I * D}{d} (1 + 1/\sqrt{2} * v * \frac{1}{\sqrt{(1 - 0,5 * v^2)}}) \quad (3.12)$$

Onde:

$$Z_0 = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} = 30\Omega$$

Sendo que,  $I$  é o pico de corrente da descarga (em kA),  $D$  é a altura da linha (em metros),  $d$  é a distância (em metros) até o centro da linha e finalmente,  $v$  é a razão entre a velocidade da descarga e a velocidade da luz.

Com respeito ao procedimento estatístico usado para inferir a performance da linha de distribuição frente a uma descarga, o IEEE GUIDE 1410 (1997) segue o método apresentado em (CHOWDHURI, 1989). A amplitude da corrente de ruptura é variada de 1 a 200kA em intervalos de 1kA. Para cada valor de corrente, calcula-se a distância mínima  $y_{\min}$ .

O número anual de descargas indiretas por km da linha de distribuição  $F_p$  é obtido como a somatória das contribuições de todos intervalos considerados, como mostrado na expressão (3.13):

$$F_p = 2 * \sum_{i=1}^{200} (y_{\max}^i - y_{\min}^i) * N_g * P_i \quad (3.13)$$

Sendo que,  $N_g$  é a densidade de descargas atmosféricas para a terra e  $P_i$  é a probabilidade da corrente de pico estar dentro de um certo intervalo. Para o cálculo da probabilidade, adota-se a seguinte expressão, a qual foi adotada de ANDERSON (1982):

$$P(I_0 \geq i_0) = \frac{1}{1 + (i_0 / 31)^{2,6}} \quad i_0 \leq 200 \text{ kA} \quad (3.14)$$

$I_0$  – Descarga inicial -

O valor de  $y_{\min}$  é obtido pela expressão da distância lateral:

$$y_{\min} = \sqrt{r_s^2 - (0,9 * r_s - h)^2} \quad \text{onde, } r_s = 10 * I_{0,65} \quad (3.15).$$

### **3.10.) PROGRAMA PARA O CÁLCULO DE TENSÕES INDUZIDAS POR RAIOS (LIOV)**

As tensões induzidas de descargas indiretas constituem uma das principais causa de interrupções de linhas de distribuição de média tensão. O problema tem sido considerado com mais seriedade nos últimos anos devido ao aumento da demanda de uma melhoria na qualidade de energia pelos usuários do sistema. De fato, a avaliação de tensões induzidas por raios tem sido assunto em diversos estudos na literatura por muitos anos (GOLD, 1958 e RUSCK, 1958).

Para uma melhor compreensão do complexo mecanismo de indução, linhas de distribuição em geral foram consideradas com infinitamente longas ou adaptadas, para evitar reflexões de surto. Em outros casos, elas foram determinadas como sendo puramente resistivas (GOLDE, 1942).

Entretanto, a otimização do número e da localização da proteção contra surtos a fim de minimizar o número de interrupções devidas aos raios, requer a estimação das tensões induzidas para as mais realísticas configurações de linha. Em particular, a presença de transformadores de distribuição e os dispositivos de proteção relevantes nas terminações da linha, bem como a presença de pára-raios no decorrer da linha (NUCCI et al, 1993).

A primeira tentativa para avaliar sobretensões induzidas por raios sobre as linhas terminadas em transformadores de distribuição ou em cabos curtos foi realizado por CHOWDHURI (1984), sendo que, onde o transformador de distribuição foi modelado em uma primeira aproximação pela média da capacitância. Para executar isso, um programa computacional previamente desenvolvido para o cálculo da sobretensão induzida por raios foi devidamente ampliado por CHOWDHURI (1984). Em princípio, as mais complexas configurações de terminações de linha (transformadores de distribuição), bem

como descontinuidades da linha (pára-raios), podem ser tratados com determinadas modificações no programa original.

Em CHOWDHURI (1989) o trabalho apresenta uma melhoria na capacidade de simulação do programa original pela interface deste com o “Programa de Transientes Eletromagnéticos” (EMTP). A interface do programa é compreendida quando leva se em conta a presença de complexas terminações de linha e descontinuidades na linha sem modificar o programa original.

### **3.11.) O PROGRAMA PARA O CÁLCULO DE TENSÕES INDUZIDAS POR RAIOS (LIOV) SOBRE UMA LINHA AÉREA.**

Este programa permite a avaliação de tensões induzidas sobre uma linha aérea do tipo multi-condutor com perdas de aterramento. Apesar da capacidade deste programa o trabalho de BARROS & SILVA (1984) foi limitado para o caso de uma linha aérea monofásica sem perdas como representado na Figura 3.7. A linha não exibe qualquer descontinuidade e termina com ambas extremidades sobre duas resistências  $R_0$  e  $R_L$ . É importante mencionar que, no momento, a modelagem de fenômenos não lineares como corona, não são incluídos no LIOV. Sendo que, outros autores têm desenvolvido um modelo de linha para a este caso (BARROS & SILVA, 1984 E BARROS et al, 1984).

O programa é dividido em duas partes principais: o cálculo do campo eletromagnético emitido por descarga indireta, e o cálculo da sobretensão induzida por uma descarga indireta na linha.

O modelo da corrente de descarga indireta (NUCCI et al, 1990) e um modelo de acoplamento (NUCCI et al 1994) deve ser especificado para os pontos 0 e L. Contudo, o ponto 0 não possui qualquer implicação na conexão entre o LIOV e o EMTP, no qual foi limitado descrevendo o modelo de acoplamento relacionado ao ponto L do LIOV.

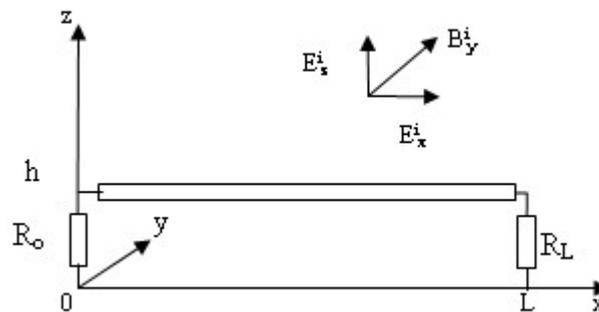


Figura 3.7 - Geometria Usada para o Cálculo da Sobretensão Induzida.

(Fonte: NUCCI et al, 1994)

A linha é excitada pelo campo eletromagnético incidente ( $E_i$ ,  $B_i$ ) como apresentado na Figura 3.7. O campo incidente é a soma do campo emitido por uma descarga indireta e pelo campo refletido na terra, ambos considerados na ausência do fio. O campo total ( $E$ ,  $B$ ) é dado pela soma do campo incidente ( $E_i$ ,  $B_i$ ) e o campo dispersado ( $E_s$ ,  $B_s$ ), no qual representa a reação do fio para o campo incidente.

A tensão induzida pela descarga indireta na linha é calculada usando o modelo de acoplamento (AGRAWAL et al, 1980). De acordo com este modelo, a tensão total induzida na linha é dada pela soma da tensão dispersada  $u_s$  e a tensão incidente  $u_i$ , expressada por:

$$u(x, t) = u^s(x, t) + u^i(x, t) = u^s(x, t) - \int_0^h E_z^i(x, z, t) dz \quad (3.16)$$

A tensão dispersa é obtida da solução das seguintes equações de linhas de transmissão:

$$\frac{\partial u^s(x, t)}{\partial x} + L' \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} = E_x^i(x, h, t) \quad (3.17)$$

$$\frac{\partial i(x, t)}{\partial x} + C' \frac{\partial u^s(x, t)}{\partial t} = 0 \quad (3.18)$$

Onde:

$i(x,t)$  é a corrente induzida sobre a linha,

$C'$  e  $L'$  são a capacitância de linha e a indutância de linha por unidade de comprimento respectivamente, e

$E_{ix}(x,h,t)$  é a componente horizontal do campo elétrico incidente na altura do condutor.

As condições de fronteira, para um tipo geral de terminação, são:

$$u^s(0,t) = -\Gamma_0(i(0,t)) + \int_0^h E_z^i(0,z,t) dz \quad (3.19)$$

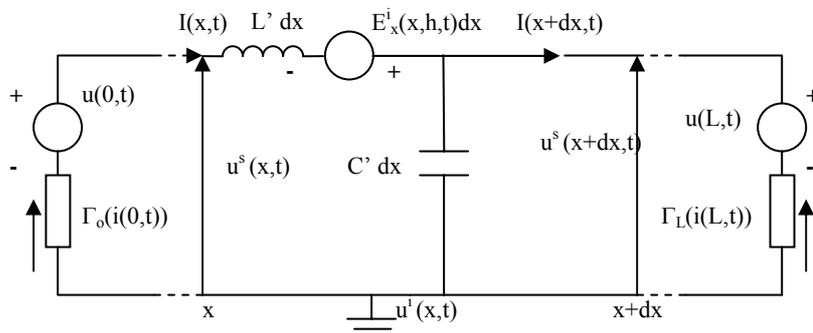
$$u^s(L,t) = -\Gamma_L(i(L,t)) + \int_0^h E_z^i(L,z,t) dz \quad (3.20)$$

Onde

$\Gamma_0$  e  $\Gamma_L$  são os operadores o qual descreve a queda de tensão nas terminações ( $\Gamma_i = R \cdot i$  para uma terminação resistiva),

$E_{iz}(0,z,t)$  e  $E_{iz}(L,z,t)$  são os componentes verticais do campo elétrico incidente nas terminações de linha.

O circuito equivalente para o caso de um único fio sem perda sobre um perfeito condutor de aterramento excitado por uma descarga indireta é apresentado na Figura 3.8.



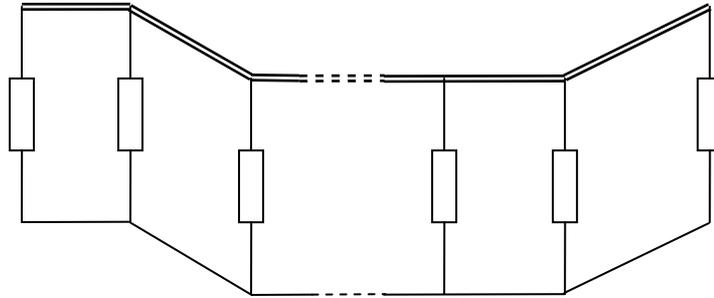
*Figura 3.8 - Circuito Equivalente de uma Linha Aérea Monofásica sem Perdas Excitada por uma Descarga Indireta.*  
(Fonte: AGRAWAL et al, 1980)

As equações (3.16) e (3.17) podem ser resolvidas pela média do ponto centrado da técnica da finita diferença (AGRAWAL et al, 1980). Em princípio, como mencionado anteriormente, o programa pode ser modificado apropriadamente caso a caso, levando em consideração a presença de tipos específicos de terminações, bem como as discontinuidades da linha. Esse procedimento, como apresentado em GUERRIERI (1994), requer que as equações de acoplamento sejam reescritas de forma apropriada caso a caso. Entretanto, quando as terminações representam uma componente de potência para o qual um modelo complexo de circuito é requerido (por exemplo), as condições limites assumem uma expressão complexa.

### 3.12.) A CONEXÃO ENTRE O LIOV E O EMTP

Uma linha de distribuição pode ser visualizada como um grupo de linhas daquela apresentado na Figura 3.7, conectadas juntas em correspondência de impedâncias de “shunt”, como apresentado na Figura 3.9. A impedância de “shunt” apresenta a presença de pára-raios no decorrer da linha, ou o condutor de aterramento do neutro para linhas de baixa tensão, etc. Cada seção da linha de distribuição entre duas impedâncias de “shunt” consecutivas foi modelada por

(BERGERON, 1949) como uma linha monofásica descrita na Figura 3.7 anteriormente (chamada linha LIOV)



*Figura 3.9 - Configuração de Linhas de Distribuição.*  
(Fonte: BERGERON, 1949)

Para descrever como os dois programas foram conectados por BERGERON (1949), será tratado primeiro o caso de uma impedância de terminação  $Z_t$  conectado ao fim do lado esquerdo da linha LIOV. Foi assumido que  $Z_t$  é conectado à linha LIOV pela média de uma linha de curto comprimento sem perdas  $\Delta l$ , o qual não sofre ação de qualquer campo eletromagnético. Isto é apresentado na Figura 3.10, onde os nós de tensão e a corrente do método da diferença finita são indicados e, onde por conveniência, o subscrito que denota a tensão distribuída tem sido omitido. A linha curta que não sofre ação do campo magnético foi chamada linha B, sendo tratada como uma linha utilizada no método de BERGERON (1949).

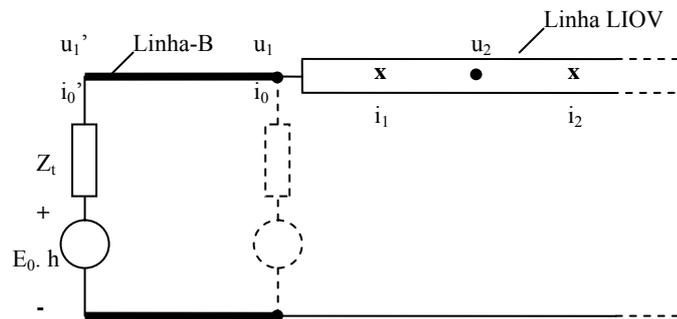


Figura 3.10 - Conexão de uma Impedância  $Z_t$  para uma Linha Aérea Por Meio da Linha de Bergeron.

(Fonte: BERGERON, 1949)

A aplicação do método de BERGERON (1949) para linha B representada na Figura 3.10 fornece as seguintes equações.

$$i_0' = \frac{u_1'(t)}{Z_c} - \left[ \frac{u_1(t - \Delta t) - Z_c \cdot i_0(t - \Delta t)}{Z_c} \right] \quad (3.21)$$

$$= \frac{u_1'(t)}{Z_c} - A_0'(t - \Delta t)$$

$$i_0 = \frac{u_1(t)}{Z'} - \left[ \frac{u_1'(t - \Delta t) - Z_c \cdot i_0'(t - \Delta t)}{Z_c} \right] \quad (3.22)$$

$$= \frac{u_1(t)}{Z_c} - A_0(t - \Delta t)$$

Onde:

$Z_c$  é a impedância de surto da linha B, e

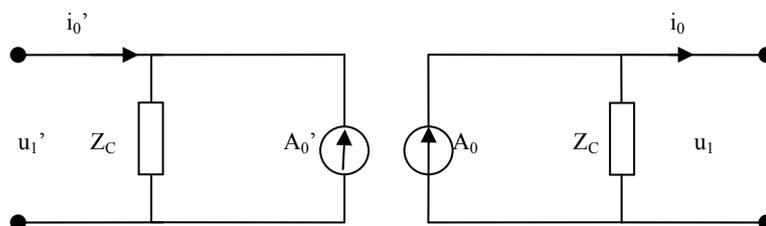
$\Delta t$  é o tempo de prorrogação da tensão e corrente no decorrer da linha B relacionado ao  $\Delta l$  por:

$$\Delta l = c \cdot \Delta t \quad (3.23)$$

Onde:

$c$  é a velocidade de propagação da tensão e corrente sobre a linha B

As equações 3.23 e 3.24 são descritas por um circuito equivalente apresentado na Figura 3.11. As fontes de correntes  $A_0'$  e  $A_0$  dependem respectivamente da tensão e corrente nos pontos 0 e 0' no final da linha B,  $\Delta t$  segundos adiantados (BERGERON, 1949).



*Figura 3.11 - Circuito Equivalente de uma Linha Curta sem Perdas de Acordo com o Método de Bergeron (Representação de Norton).*

(Fonte: BERGERON, 1949)

Para esta proposta, uma representação mais conveniente das mesmas equações é apresentada a seguir:

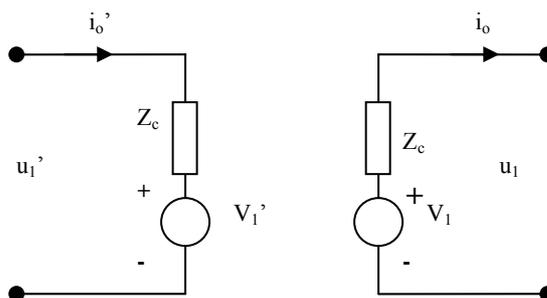
$$u_1(t) = Z_c \cdot i_0 + [u_1(t - \Delta t) - Z_c \cdot i_0(t - \Delta t)] \quad (3.24)$$

$$= Z_c \cdot i_0 + V_1(t - \Delta t)$$

$$u_1(t) = Z_c \cdot i_0 + [u_1(t - \Delta t) - Z_c \cdot i_0(t - \Delta t)] \quad (3.25)$$

$$= Z_c \cdot i_0 + V_1(t - \Delta t)$$

O circuito equivalente de uma linha curta, sem perdas de acordo com Bergeron pode ser vista na Figura 3.12. Novamente, as fontes de tensão  $V_1'$  e  $V_1$  são dependentes da tensão e corrente nos pontos l e l' no final da linha B,  $\Delta t$  segundos adiantados

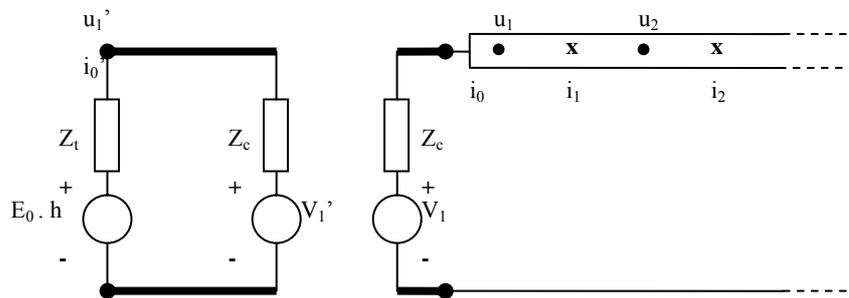


*Figura 3.12 - Circuito Equivalente de uma Linha Curta sem Perdas de Acordo com o Método de Bergeron (Representação de Thevenin).*

(Fonte: BERGERON, 1949)

Agora, para o caso examinado, a conexão entre o código LIOV e o EMTP é ilustrado na Figura 3.13. A tensão  $u_1$  e a corrente  $i_0$  são calculadas pelo LIOV no tempo (t) e a entrada da fonte de tensão  $V_1'$  para EMTP. Então, o EMTP resolve o circuito do lado esquerdo da Figura 3.13 (condições de limites) processa  $u_1'$ , e a entrada desta para a fonte de tensão  $V_1$  do LIOV, a fim de determinar a resposta da linha LIOV no  $t+\Delta t$ . O intervalo de tempo  $\Delta t$  é o passo de integração do tempo, setado no mesmo valor para o LIOV e o EMTP. Deve ser observado que uma que  $\Delta t$  é fixado pelo usuário,  $\Delta l$  é determinado de acordo com o programa. A transferência de informação entre dois códigos toma lugar pela média das duas fontes de tensão  $V_1$  e  $V_1'$  apresentada na Figura 3.13.

Na ordem para realizar a conexão descrita acima, algumas instruções foram apropriadamente adicionadas no EMTP, bem como no LIOV.



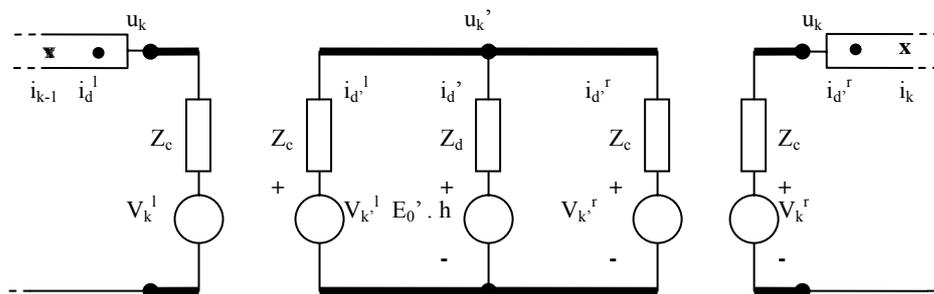
*Figura 3.13 - Conexão entre o LIOV e o EMTP para o Caso de uma Terminação Conectada ao Fim do Lado Esquerdo da Linha LIOV.*

(Fonte: BERGERON, 1949)

Segundo o mesmo procedimento usado para o caso de terminação  $Z_t$  conectado ao fim do lado esquerdo da linha LIOV, o caso mais geral de uma impedância de shunt  $Z_d$  que interconecta duas linhas LIOV podem ser levando em conta.

A conexão entre o LIOV e EMTP é apresentada na Figura 3.14, também para esse caso e o EMTP tem sido modificado da maneira apropriado.

A impedância de “shunt” é tratada como uma terminação no final do lado esquerdo para linha LIOV sobre o direito e como uma terminação no final do lado direito para linha LIOV sobre o esquerdo. A corrente no final da linha LIOV é obtida pela extrapolação de dois valores de corrente de dois nós adjacentes e a corrente na descontinuidade foi dividida em dois valores  $i_{ld}$  e  $i_{rd}$  calculados da linha LIOV esquerda e direita respectivamente.



*Figura 3.14 - Conexão entre o LIOV e o EMTP para o Caso de uma Impedância de Shunt Localizada no nó de Tensão da Linha LIOV.*

(Fonte: BERGERON, 1949)

A estimação de tensões induzidas por raios é um pré-requisito para otimização do número e localização de pára-raios. Isto tem sido geralmente realizado fazendo referência ou para linhas infinitamente longas, ou para linhas terminadas em resistências puras (freqüentemente iguais à impedância de surto).

O problema tem aqui sido abordado considerando configurações de linha realista, nomeadas linhas finitas terminadas em transformadores de distribuição. Também, a presença de pára-raios no decorrer da linha foi levada em conta. Para este trabalho tem sido interfaceado um programa previamente desenvolvido para o cálculo de sobretensões induzidas (LIOV), com o EMTP.

O LIOV computa as tensões induzidas sobre as diferentes seções de linha delimitadas por várias discontinuidades (pára-raios), e o EMTP resolve as condições limites em correspondência das discontinuidades acima mencionadas e das terminações de linha (transformadores de distribuição).

### **3.13.) ASPECTOS BÁSICOS SOBRE OS PÁRA-RAIOS**

Os equipamentos de uma instalação elétrica podem ser submetidos a sobretensões provocadas por descargas atmosféricas ou manobras no sistema, sendo necessário à instalação de dispositivos de proteção para evitar sua

danificação. Apesar de sua importante missão, os pára-raios são equipamentos de custo reduzido, simples do ponto de vista construtivo e de pequenas dimensões. Um pára-raio é constituído de um elemento resistivo não linear associado ou não a um centelhador em série (TRANQUELL, 1970).

Em operação normal, o pára-raio é semelhante a um circuito aberto. Então, quando ocorre uma sobretensão, o centelhador dispara e uma corrente circula pelo resistor não linear, impedindo que a tensão nos seus terminais ultrapasse um determinado valor. É possível a eliminação do centelhador, utilizando-se somente o resistor não linear. Neste caso específico, o material deve apresentar uma característica suficientemente adequada para esta finalidade (ASEA, 1982 e PHELPS, 1979).

### 3.13.1.) DETALHES CONSTRUTIVOS DOS PÁRA-RAIOS

A Figura 3.15 apresenta, a título de ilustração, o processo evolutivo dos dispositivos de proteção contra sobretensões.

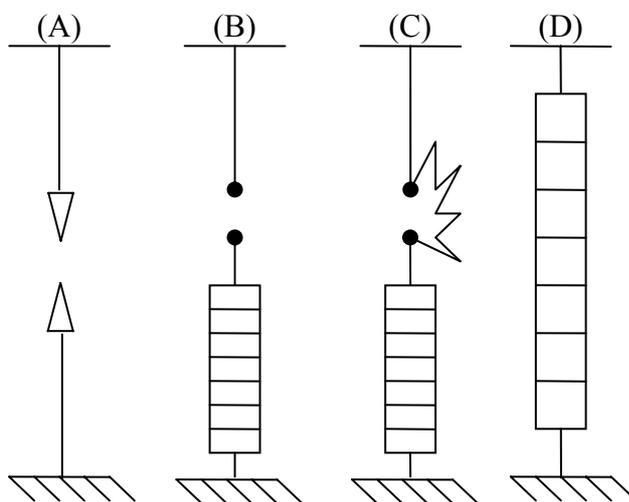


Figura 3.15 - Evolução dos Dispositivos de Proteção Contra Sobretensões.

(Fonte: SAKSHAUG, 1979)

Na Figura 3.15A, está indicado um centelhador, que é um dispositivo que pode ser utilizado para a proteção dos equipamentos de uma subestação. O

centelhador apresenta como grande desvantagem o estabelecimento de um curto-circuito, o qual deve ser eliminado pela proteção do sistema.

Com o objetivo de evitar o estabelecimento de um curto-circuito no sistema e seus inconvenientes, foi desenvolvido o pára-raio mostrado na Figura 3.15B. Esse pára-raio consiste de um resistor não linear em série com um centelhador, de forma a limitar a corrente de descarga. São normalmente utilizados em sistemas de distribuição (<138kV) e a corrente de descarga só é interrompida quando a tensão passa por zero (SAKSHAUG, 1979).

Normalmente, os resistores não lineares têm resistências muito altas, acarretando uma tensão residual elevada nos terminais dos pára-raios. Na prática, este problema não é preocupante porque os equipamentos desta faixa de tensão são projetados com níveis de isolamento elevados (SAKSHAUG, 1979).

Com o crescimento das tensões dos sistemas de transmissão, os pára-raios tiveram o seu desenvolvimento acelerado e os pára-raios com "gap" ativo constituíram um estágio importante deste processo. A Figura 3.15C apresenta, esquematicamente, este tipo de equipamento. O seu funcionamento é baseado no alongamento do arco através do "gap" com o auxílio de um campo magnético. Em condições normais de operação, a corrente que circula pelo pára-raio é de poucos miliamperes, sendo limitada pelos resistores não lineares e pelos resistores equalizadores. Esta pequena corrente assegura que a tensão do sistema aplicada aos terminais dos pára-raios se distribua de maneira uniforme através dos "gaps" e demais componentes do equipamento (SAKSHAUG, 1979).

Durante o processo de condução propriamente dito, a corrente de descarga circula pelos "gaps" e resistores de "by-pass", uma vez que as indutâncias das bobinas de sopro magnético impedem a circulação desta corrente com alta taxa de crescimento. Este processo é iniciado quando a tensão nos terminais dos pára-raios ultrapassa o valor da tensão de disparo e a corrente circula inicialmente na parte do "gap", onde a distância é a menor (SAKSHAUG, 1979).

Após o surto inicial de corrente, os "gaps" encontram-se altamente ionizados e uma corrente provocada pela tensão do sistema (corrente subsequente a 60Hz) pode fluir no pára-raio. Inicialmente, esta corrente é função somente da

tensão do sistema e dos resistores não lineares. Sendo uma corrente com pequena taxa de variação, o seu caminho natural será pela bobina de sopro magnético, uma vez que nestas condições a sua indutância tem valor reduzido, deixando, portanto, de circular pelo resistor de "by-pass". A passagem de corrente nesta bobina cria um forte campo magnético, com tendência a expandir a corrente através do "gap", formando desta maneira um arco elétrico alongado. Este alongamento do arco provoca o aumento da tensão nos terminais dos pára-raios, ajudando a limitar a corrente até a sua completa extinção. Após a extinção da corrente, o pára-raio retorna a sua condição normal de operação (SAKSHAUG, 1979).

A Figura 3.15D apresenta o estágio atual de desenvolvimento dos pára-raios, sendo utilizados apenas blocos de resistores não lineares na sua construção.

Considerando-se a expressão ( $I=kV^n$ ) para a característica do resistor não linear, pode-se verificar que o SiC tem o expoente  $n$  da ordem de 4. Enquanto que, o ZnO apresenta um expoente  $n$  na ordem de 25. Essa alta não linearidade do ZnO está permitindo o abandono do "gap", anteriormente necessário para os pára-raios convencionais, simplificando tremendamente a construção dos pára-raios e aumentando bastante a confiabilidade destes equipamentos (SAKSHAUG, 1979).

### ***3.13.2.) AVALIAÇÃO DE CORRENTES EM PÁRA-RAIOS DE BAIXA TENSÃO***

A seleção de características nominais de dispositivos de proteção contra surtos em baixa tensão busca melhorar sua performance de proteção, dependendo do conhecimento da sua amplitude de surto e das tensões impostas. Entre outros mecanismos, esses surtos podem ser originados por descargas atmosféricas diretas em linhas de média tensão. Eles não são tão freqüentes em sistemas de distribuição, mas seus efeitos são tão severos em virtude de suas grandes amplitudes. Quando se trata de dispositivos de proteção contra surtos em baixa tensão, o importante são os picos da corrente de surto e a carga drenada, ambos relacionados com a duração do surto (IEEE C62.34, 1996 e IEC 6164-1, 1998).

Nesses tipos de estudos, o cálculo da sobretensão tem sido realizado usando o ATP (Alternative Transient Program). Os modelamentos das componentes dos sistemas incluem as características de isolamento (tensão versus tempo) dos isoladores primários e secundários e um modelo do transformador de distribuição para altas frequências, as quais levam em conta as condições de carga. Alguns parâmetros de interesse são também considerados na análise, bem como a resistência de terra dos pólos e dos consumidores, a posição da queda da descarga e o valor de crista da corrente da descarga atmosférica. Simulações são realizadas variando diferentes parâmetros.

Durante as simulações, pode-se constatar duas amplitudes diferentes para a corrente da descarga (45kA e 90kA). De acordo com (SEKIOKA et al, 1995) o valor médio da amplitude da primeira frente de onda no Brasil está em torno de 43kA, onde o valor de 90kA excedeu em mais de 5% dos eventos analisados. Nas simulações, a corrente é representada por uma onda triangular com tempo de crista de 2 $\mu$ s e tempo de 80 $\mu$ s na metade do seu valor. Dois valores diferentes de resistência de terra têm sido selecionados: baixa (10 $\Omega$ ) e alta (100 $\Omega$ ). Quatro distâncias entre o transformador e o ponto da descarga atmosférica são usadas (0m, 90m, 180m e 300m), assumindo que a descarga ocorreu na seção direita das linhas de distribuição de média tensão.

A partir das simulações de SEKIOKA et al (1995) tem sido possível avaliar os surtos em sistemas típicos de distribuição de baixa tensão, fornecendo informações sobre a magnitude dos valores de crista das correntes e o valor de carga absorvida pelos pára-raios contra surtos em baixa tensão. Esta é uma informação relevante para a seleção das características nominais dos pára-raios contra surtos em baixa tensão.

Os resultados não têm mostrado uma forte dependência da amplitude da corrente da descarga com as resistências de terra, devido à ocorrência de raios que promove uma natural limitação de sobretensão na rede pela criação de vários caminhos para drenar a corrente de descarga. Porém, em geral, os valores obtidos tendem ao crescimento com o aumento dos valores desses parâmetros (SEKIOKA et al, 1995).

A instalação de pára-raios contra surtos em baixa tensão nos terminais de baixa tensão dos transformadores é um procedimento de proteção usual. As magnitudes das sobretensões podem ser reduzidas com a instalação de pára-raios também no fim das linhas de baixa tensão. Esta prática deve representar uma alternativa para o controle dos surtos provocados por descargas, especialmente para aquelas ocorridas relativamente distantes das redes de baixa tensão.

A partir dos resultados das simulações de SEKIOKA et al (1995) pode-se observar que os valores de pico valores de correntes são muito menores do que aqueles injetados pela descarga atmosférica, sendo que eles estão na faixa de 5kA em cerca de 80% dos casos. Entretanto, a análise dos resultados mostra que os valores obtidos para a carga drenada são muito maiores que os valores associados ao valor de pico da corrente padrão.

Nos Estados Unidos e no Japão diversas concessionárias de energia elétrica têm utilizado pára-raios de linha desde 1980 (SHIH et al, 1985; FURUKAWA, 1989 e ROSA et al, 1996). No Brasil, FURNAS e CEMIG, duas importantes geradoras de energia elétrica, estão instalando esses dispositivos em suas linhas de transmissão de 138kV (KASTRUP et al, 1996; CHERCHIGLIA et al, 1998 e ANDRADE et al, 2001).

Após identificar as zonas críticas de incidência de raios na linha, os estudos para a aplicação de pára-raios de linha determinam um número ideal de unidades e também o melhor lugar para a instalação. É uma prática comum aplicar pára-raios em todas as fases de cada torre em seções críticas da linha. Esse procedimento praticamente elimina surto de descargas nestas seções (KASTRUP et al, 1996).

Com este propósito as linhas de transmissão são modeladas utilizando o programa EMTP /ATP, com um detalhado modelamento de cabos aéreos, torres e parâmetros de potência, frequência e tensão. Quando necessário, o efeito corona também pode ser incluído neste programa ATP (ATP-EMTP RULE BOOK, 1997).

Embora a performance das linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas terem sido estudadas já por muitas décadas, novos aspectos são

introduzidos com o advento das aplicações dos pára-raios de linha. O conceito de corrente crítica de alguns trabalhos (KASTRUP et al, 1996) ajuda a prever os efeitos dos pára-raios de linha e também incluir os efeitos na tensão, na frequência e na potência.

A possibilidade de otimização da instalação de pára-raios depende das características de linhas e da severidade das condições ambientais conforme pode ser observado, os quais têm sido confirmados a partir dos resultados obtidos em campo. Um outro resultado interessante para novos projetos é a possibilidade de se aplicar diferentes pára-raios de diferentes classes de tensão na mesma torre.

### **3.14.) DESCARGAS ATMOSFÉRICAS NAS LINHAS**

A incidência de descargas atmosféricas diretamente nas torres ou nos cabos das linhas de transmissão e distribuição pode provocar desligamentos do sistema elétrico dependendo das características da descarga atmosférica incidente (magnitude e frente de onda), do ponto de incidência (cabos pára-raios, estruturas ou cabos das fases) e das características da linha de transmissão (tipo de terreno, isolamento, aterramento e blindagem) (DARVENIZA et al, 1975).

Teoricamente, seria possível posicionar os cabos pára-raios para evitar a incidência de descargas atmosféricas diretamente nos cabos condutores. Entretanto, na prática, o número de desligamentos é muito dependente do tipo de terreno, sendo muito difícil aplicar uma blindagem eficiente em terrenos montanhosos. Em terrenos planos ocorre o contrário, as sobretensões causadas pela incidência direta nos cabos condutores pode ser facilmente calculada pelo produto da corrente incidente dividida por dois e pela impedância de surto do cabo condutor. Então, quando a sobretensão é superior ao isolamento da linha de transmissão ou distribuição ocorre o desligamento (DARVENIZA et al, 1975).

A incidência de descargas atmosféricas nos cabos pára-raios ou nas estruturas de uma linha gera ondas de tensão que se propagam pelos cabos pára-raios e pelas estruturas. Por indução, também há propagação de ondas de tensão nos cabos condutores. O cálculo da tensão resultante é mais bem realizado por

meio de simulações com ferramentas específicas para esta finalidade, sendo uma delas o ATP (Alternative Transients Program), o qual dispõe de modelos apropriados a esta finalidade.

Em diversos estudos, consta-se que os fatores que mais influenciam a possibilidade de ocorrer desligamentos são o aterramento das estruturas e o acoplamento entre os cabos, bem como as características das descargas atmosféricas. As linhas de transmissão de maior nível de tensão têm mais facilidade em suportar a incidência de descargas atmosféricas, mantendo-se a ocorrência de desligamentos em níveis aceitáveis (DARVENIZA et al, 1975 e SEKIOKA, 1995).

Nos casos de incidência de descargas nas estruturas ou nos cabos pára-raios, a blindagem praticamente não tem influência na quantidade de desligamentos, ao contrário do sistema de aterramento que possui uma importância fundamental (DARVENIZA et al, 1975).

## CAPÍTULO 4. METODOLOGIA E ADEQUAÇÃO DOS MODELOS MATEMÁTICOS

### 4.1.) MODELAGEM DOS PÁRA-RAIOS DE ZNO NO ATP

Algumas possibilidades estão disponíveis no ATP para modelar uma resistência não-linear, que seria o equivalente ao pára-raio de ZnO sem centelhadores série. Basicamente, existem duas possibilidades principais: o uso direto de um determinado número de pontos no plano tensão/corrente ou a determinação de equações que representam a característica não-linear dos pára-raios de ZnO.

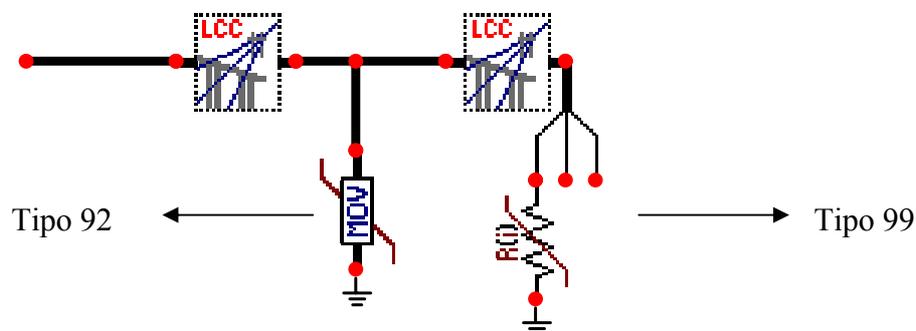
A partir do comparativo apresentado na Tabela 4.1, pode-se verificar que todos os modelos têm um comportamento consistente, com diferenças muito pequenas na energia absorvidas para cada modelo.

*Tabela 4.1 - Comparação entre Diferentes Modelos de Pára-Raios do ATP*

<b>Modelo</b>	<b>Tensão (kV)</b>	<b>Corrente (A)</b>	<b>Energia (kJ)</b>
<b>Tipo 99</b>	547.8	9940	1375
<b>Tipo 92 (4444.)</b>	547.6	9895	1372
<b>Tipo 92 (5555.)</b>	547.8	9978	1362

(Fonte: ATP-EMTP RULE BOOK, 1997)

A Figura 4.1 mostra os dois tipos de pára-raios desenhados utilizando o ATPDraw.



*Figura 4.1 - Diferentes Modelos de Para-raios Disponíveis no ATPDraw*  
(Fonte: ATPDraw versão 3.6p2)

#### 4.2.) MODELAGEM DAS LINHAS E DESCARGAS NO ATP

A descarga atmosférica pode ser modelada de várias formas (fonte de corrente do Tipo 13 - Dupla Rampa, Fonte Tipo HEIDLER, etc.). A escolha pelo tipo de fonte depende da aplicação e dos efeitos que devem ser considerados.

Os parâmetros para as linhas de transmissão são calculados por meio de uma rotina específica para essa finalidade (Line Constants), acessível por intermédio do programa LCC do ATP.

O programa LCC é uma versão que permite a obtenção dos parâmetros das linhas de transmissão. Basicamente, é um programa que facilita a criação do arquivo de dados para o processamento da rotina Line Constants do ATP. É um módulo executável, de fácil instalação, que uma vez acionado abre “janelas” para a entrada dos dados necessários ao processamento da rotina Line Constants.

Geralmente, os dados incluem a configuração geométrica das torres de transmissão, as características físicas dos cabos elétricos, dados sobre a resistividade do solo, frequência, tipo de modelo requerido pelo usuário para a linha de transmissão e saída de dados estipulada pelo usuário. Como resultado, podem ser obtidos arquivos de dados correspondentes aos diversos modelos de

linhas já formatados para o ATP, os quais podem ser copiados e introduzidos via editor de dados para um arquivo ATP.

O ATPDraw também já incorporou o LCC, o qual pode ser acionado diretamente, como se fosse um dos modelos disponíveis para as linhas. A Figura 4.2 mostra algumas fontes para representar as descargas atmosféricas no ATPDraw.

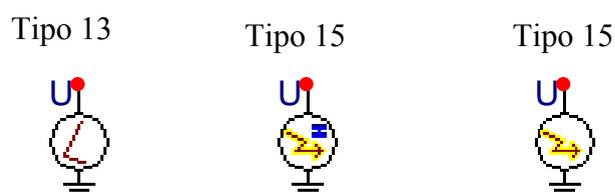


Figura 4.2 - Fontes de Descargas Atmosféricas.

(Fonte: ATPDraw versão 3.6p2)

A Figura 4.3 mostra a aparência do bloco LCC no ATPDraw com a sua ligação física.

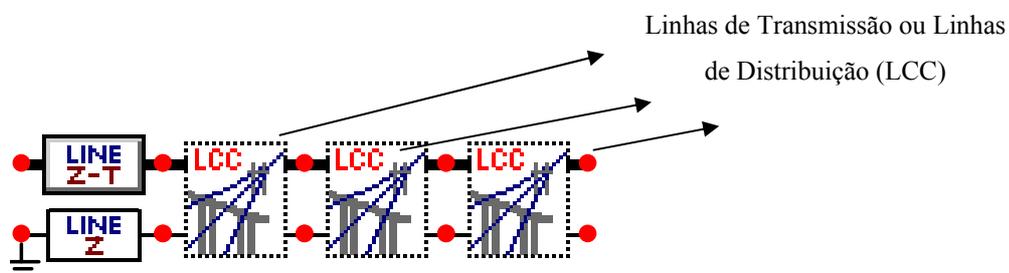


Figura 4.3 - LCC no ATPDraw

(Fonte: ATPDraw versão 3.6p2)

### 4.3.) MODELAMENTO DAS TENSÕES INDUZIDAS PROVOCADAS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Neste tópico serão apresentadas algumas modificações no modelo de Rusck (original) para que seja possível a simulação de tensões induzidas provocadas por descargas atmosféricas em situações reais.

O modelo de Rusck foi desenvolvido para uma linha infinita com uma excitação de descarga do tipo degrau, como pode ser visto detalhadamente na Figura 4.4.

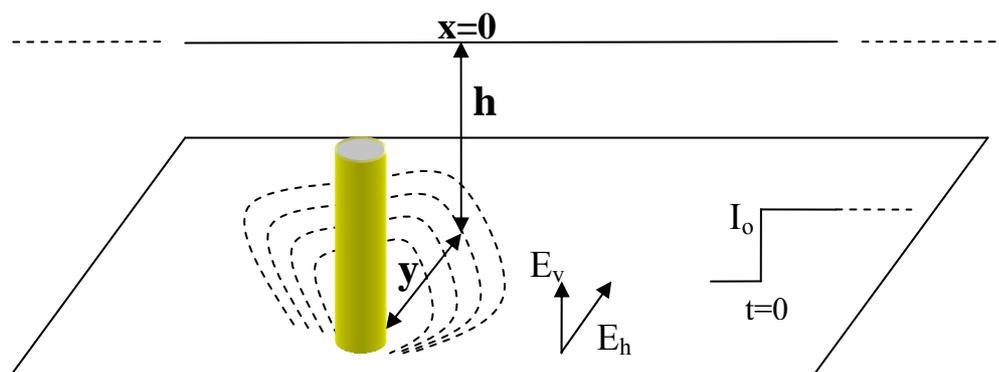


Figura 4.4 - Modelo de Rusck para Tensões Induzidas  
(Fonte: Adaptado de RUSCK, 1968)

Partindo de uma modelagem para a corrente de retorno, Rusck calcula o campo elétrico originado por esta corrente na superfície do solo, a partir do valor do campo e da configuração de uma linha de transmissão multifilar.

A teoria fornece os valores das tensões resultantes nos fios da linha. Segundo Rusck, as tensões induzidas em uma linha infinita dependem apenas da altura da linha em metros ( $h$ ) e da menor distância entre a linha e o ponto de incidência do raio ( $y$ ). Por meio de dois parâmetros, pode-se encontrar a tensão induzida na linha:

$$V(x,t) = U(x,t) + U(-x,t) \quad (4.1)$$

$$U(x,t) = 30.I_0.h.\beta \cdot \left[ \frac{(ct-x)}{y^2 + \beta^2(ct-x)^2} \right] \cdot \left[ 1 + \frac{x + \beta^2(ct-x)}{\sqrt{\beta^2 c^2 t^2 + (1-\beta^2)(x^2 + y^2)}} \right] \quad (4.2)$$

$$\beta \cong \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{5 \times 10^5}{I_0}}} \quad (4.3)$$

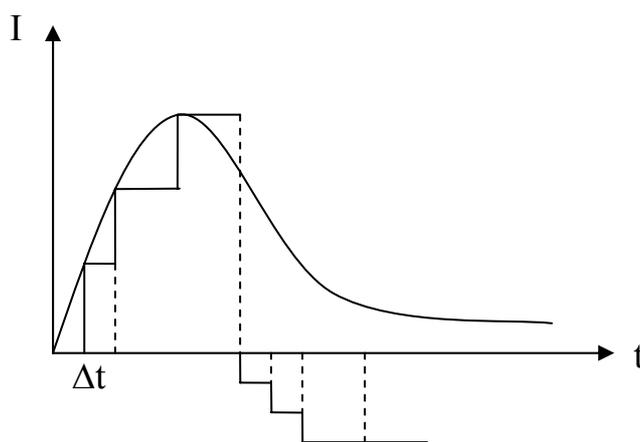
Sendo que,  $t$  é o tempo em segundos;  $c$  é a velocidade da luz no vácuo;  $I_0$  é o valor de pico da corrente de retorno;  $h$  é altura da linha em metros;  $y$  é a menor distância entre a linha e o ponto de incidência; e  $x$  é o ponto que se deseja conhecer o valor da tensão induzida.

Vale ressaltar que a teoria de Rusck apresenta várias restrições e não pode ser aplicada em uma situação real, onde as linhas têm tamanhos definidos e a descarga característica é extremamente diferente de uma função degrau.

#### 4.4.) IMPLEMENTAÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS GENÉRICAS POR MEIO DE FUNÇÕES DEGRAUS

Normalmente, as descargas atmosféricas podem ser representadas por diversos tipos de fontes (Dupla Rampa, Heidler, etc.), entretanto como pode ser observado no item 4.6, o modelo de Rusck admite que a corrente de retorno é do tipo degrau, e, por isso, dificulta a sua aplicação em situações práticas.

Para contornar este problema, implementou-se o princípio da integral de Duhamel, onde a forma de onda de corrente pode ser representada por uma sucessão de degraus defasados no tempo, como ilustrado na Figura 4.5.



*Figura 4.5 - Representação da Forma de Onda da Corrente por uma Sucessão de Degraus*

(Fonte: Adaptado de GREENWOOD, 1992)

Partindo deste princípio, qualquer forma de onda pode ser representada por degraus sucessivos e assim, qualquer tipo de descarga pode ser implementado no modelo de Rusck.

A partir dos estudos correlatos apresentados no capítulo anterior (capítulo 3), constata-se que as duas fontes que melhor representam as descargas atmosféricas são as do tipo Dupla Rampa e Heidler. As funções de Heidler têm apresentando resultados extremamente satisfatórios em diversos trabalhos publicados pela comunidade científica, pois é considerada por muitos pesquisadores como a melhor opção na representação de descargas atmosféricas reais.

Desta forma, optou-se por representar correntes de descarga atmosférica utilizando o modelo de Heidler. A corrente de descarga é apresentada na equação (4.4) a seguir:

$$i(t) = i_{h1}(t) + i_{h2}(t) + i_{de}(t) \quad (4.4)$$

onde,

$$i_{h1}(t) = \frac{I_{01}}{\eta_1} \frac{\left(\frac{t}{\tau_{11}}\right)^{n1}}{1 + \left(\frac{t}{\tau_{11}}\right)^{n1}} e^{\left(\frac{-t}{\tau_{12}}\right)} \quad (4.5)$$

$$i_{h2}(t) = \frac{I_{02}}{\eta_2} \frac{\left(\frac{t}{\tau_{21}}\right)^{n2}}{1 + \left(\frac{t}{\tau_{21}}\right)^{n2}} e^{\left(\frac{-t}{\tau_{22}}\right)} \quad (4.6)$$

$$i_{de}(t) = [(1 - e^{\alpha}) - (1 - e^{\beta})] \quad (4.7)$$

onde,

$$\eta_1 = e^{\left[ -\left(\frac{\tau_{11}}{\tau_{12}}\right) \left(n_1 \frac{\tau_{12}}{\tau_{11}}\right)^{\frac{1}{n1}} \right]} \quad (4.8)$$

$$\eta_2 = e^{\left[ -\left(\frac{\tau_{21}}{\tau_{22}}\right) \left(n_2 \frac{\tau_{22}}{\tau_{21}}\right)^{\frac{1}{n2}} \right]} \quad (4.9)$$

Na literatura, os valores para os parâmetros  $n1$ ,  $n2$ ,  $\tau_{11}$ ,  $\tau_{12}$ ,  $\tau_{21}$ ,  $\tau_{22}$ ,  $\alpha$  e  $\beta$  são definidos como constantes e, por isso, não variam durante as simulações.

Na Tabela 4.2 encontram-se os valores admitidos nas equações (4.4) a (4.9) para a geração de uma fonte de descarga atmosférica do tipo Heidler.

*Tabela 4.2 – Valores de Constantes Utilizadas na Geração da Descarga.*

<b>Constante</b>	<b>Valor</b>
$I_{01}$	$10,7 \times 10^3$
$n_1$	2
$\tau_{11}$	$0,25 \times 10^{-6}$
$\tau_{12}$	$2,5 \times 10^{-6}$
$I_{02}$	$6,5 \times 10^3$
$n_2$	2
$\tau_{21}$	$2,1 \times 10^{-6}$
$\tau_{22}$	$230 \times 10^{-6}$
$I_{de}$	0
$\alpha$	$5 \times 10^4$
$\beta$	$3 \times 10^5$

(Fonte: SILVA et al, 2003)

Utilizando-se as equações (4.4) a (4.9) foi possível a implementação de uma fonte de descarga atmosférica do tipo Heidler. Devido à necessidade de se modelar as descargas atmosféricas, em um software de programação, utilizou-se o Microsoft Visual Basic para este fim.

A Figura 4.6 apresenta o modelo de uma fonte de corrente de descarga atmosférica do tipo Heidler, implementada no Microsoft Visual Basic com  $I_{01}=12\text{kA}$  e  $I_{02}=6,5\text{kA}$ .

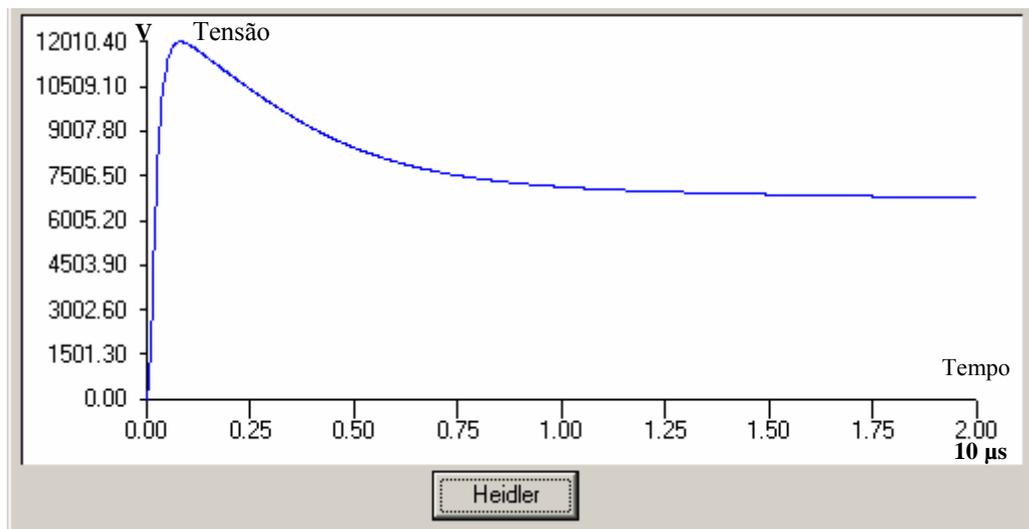


Figura 4.6 - Fonte de descarga atmosférica do tipo Heidler

#### 4.5.) FONTES DE COMPENSAÇÃO NO MODELO DE RUSCK PARA AS LINHAS FINITAS COM DESCONTINUIDADE

Sabe-se que linhas infinitas não existem na prática, por isso, a utilização do modelo de Rusck não é adequada para a simulação de tensões induzidas. Entretanto, por meio do uso de fontes de compensação, torna-se possível considerar uma linha de tamanho finito com impedâncias de terminação em suas extremidades.

A Figura 4.7 mostra as mudanças no modelo de Rusck para o cálculo de tensões induzidas em linhas finitas.

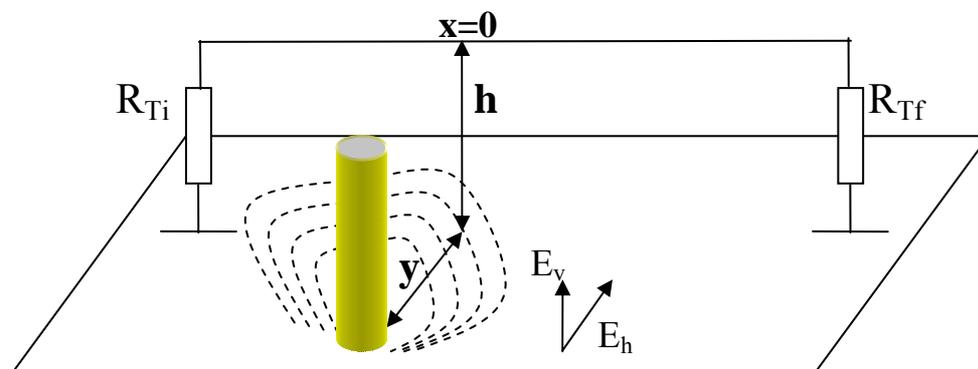


Figura 4.7 - Modelo de Rusck Modificado para Linhas Finitas com Impedância de Terminação

Pode-se verificar o aparecimento de duas impedâncias  $R_{Ti}$  e  $R_{Tf}$  no início e fim da linha respectivamente, e uma linha de tamanho  $L$  finita.

Com esta particularização, torna-se necessário analisar os efeitos de reflexão da onda e também do casamento das impedâncias de terminação. A impedância característica e o coeficiente de reflexão são dados pelas seguintes equações:

$$Z_0 \cong 138 \cdot \log\left(\frac{h}{d}\right) \quad (4.10)$$

Sendo que,  $Z_0$  é a impedância característica da linha;  $h$  é a altura da linha em relação ao solo; e  $d$  é o diâmetro do condutor.

$$\Gamma_c = \frac{Z_c - Z_0}{Z_c + Z_0} \quad (4.11)$$

onde:

$\Gamma_c$  é o coeficiente de reflexão na carga ( $R_{Ti}$  ou  $R_{Tf}$ ),

$Z_c$  é a impedância de carga,

$Z_0$  é a impedância característica da linha.

Pode-se reescrever o modelo de Rusck para uma linha finita com impedâncias de terminação devidamente casadas com a linha como sendo:

$$V(x,t) = U(x,t) + U(-x,t) - U(x_i,t)u(t-t_i) - U(x_f,t)u(t-t_f) \quad (4.12)$$

A função  $u(t-t_0)$  é a função degrau unitário:

$$u(t-t_0) = 0 \text{ se } t < t_0 \text{ e } u(t-t_0) = 1 \text{ se } t \geq 0 \quad (4.13)$$

Sendo que,  $t_0$  é o ponto de trânsito entre o ponto  $x$  e o ponto  $x_i$ ,  $t_i$  e  $t_f$  podem ser definidos pelas equações a seguir:

$$t_i = \frac{|x - x_i|}{c} \quad (4.14)$$

$$t_f = \frac{|x - x_f|}{c} \quad (4.15)$$

É possível constatar que diversas parcelas foram adicionadas ao modelo de Rusck para que o cálculo pudesse ser aplicado em uma situação real.

Para que tensões induzidas possam ser simuladas no ATP, torna-se necessário a inclusão de fontes de tensão a cada trecho da linha, entretanto, o principal problema é determinar o valor de cada uma destas fontes de tensão de forma a se obter o melhor resultado.

É pertinente comentar que considerou-se também o aparecimento das impedâncias no início e fim da linha, usadas no modelo de Rusck modificado para o cálculo de tensões induzidas em linhas finitas (reais).

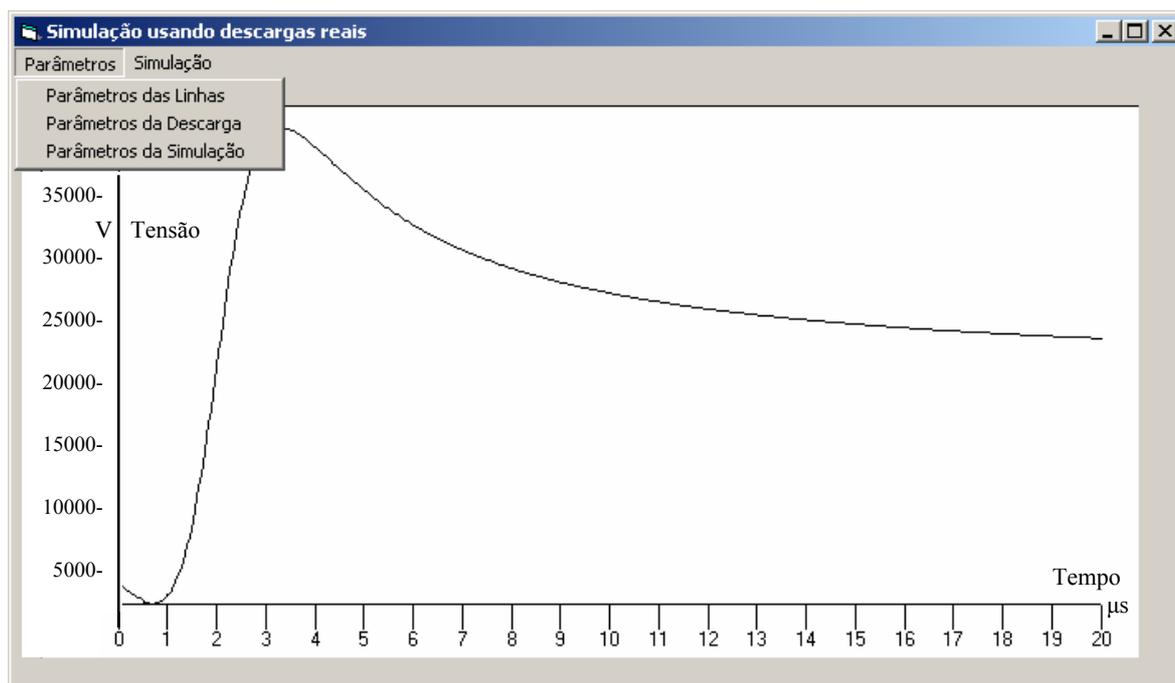
#### **4.6.) SOFTWARE DESENVOLVIDO PARA O CÁLCULO DE TENSÕES INDUZIDAS EM LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO**

O desenvolvimento de um software computacional torna-se necessário para o cálculo de tensões induzidas em linhas de distribuição, pois assim, como no EMTP, o ATP necessita de um componente adicional para gerar parâmetros, o que permitirá a correta simulação das linhas de distribuição.

No EMTP, tal função era representada pelo CONNEC, entretanto, até o momento não foram encontrados tais recursos no ATP e, por isso, um software adicional teve que ser desenvolvido de modo que seja possível simular uma descarga atmosférica que induza corrente nos condutores de uma linha de distribuição com parâmetros reais e conseqüentemente auxilie nas simulações realizadas pelo ATP.

O objetivo do software desenvolvido é contribuir para a estimação das tensões induzidas ocasionadas por descargas atmosféricas próximas à linha de distribuição, aliando-se esta ferramenta ao ATP foi possível determinar o comportamento das tensões induzidas por toda a linha considerada. Todo o software foi desenvolvido utilizando a linguagem Basic na plataforma Visual, ou seja, Visual Basic versão 6.0 da Microsoft.

A aparência da janela principal do software é mostrada na Figura 4.8.



*Figura 4.8 - Software Computacional Desenvolvido para o Cálculo de Tensões Induzidas.*

Como pode ser observado, o software possui dois menus principais: “Parâmetros” e “Simulação”. O menu “Parâmetros” relaciona todos os parâmetros que devem ser informados ao sistema para que a simulação correta possa ser realizada.

Os parâmetros de simulação estão subdivididos em três partes: Parâmetros das Linhas, Parâmetros da Descarga Atmosférica e Parâmetros da Simulação, como pôde ser observado na Figura 4.9. O usuário pode acessar qualquer uma dessas três categorias acessando o menu da janela principal.

Na Figura 4.8 ainda pode ser observado que a tensão induzida apresenta uma defasagem temporal devido à distância entre a linha de distribuição e a descarga atmosférica, representada pela variável  $y$  na Figura 4.7.

A Figura 4.9 mostra a aparência da Janela “Parâmetros das Linhas”.

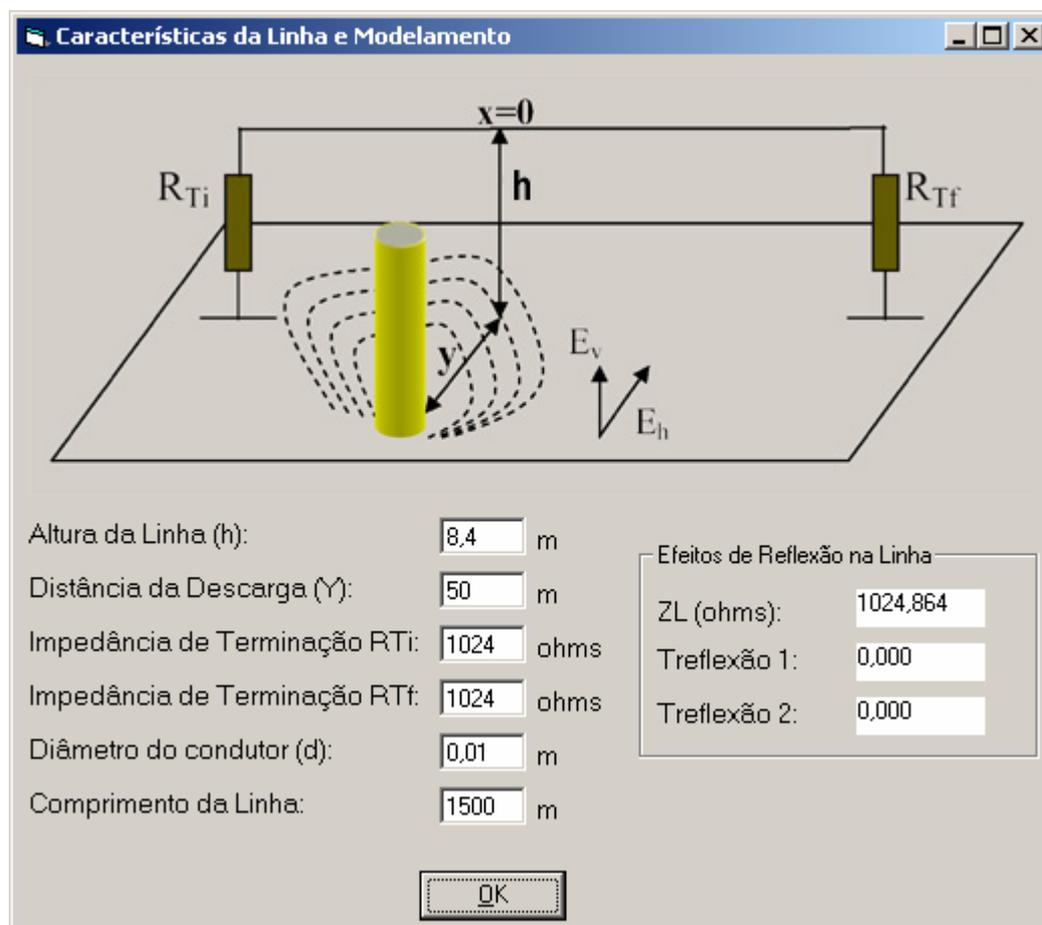


Figura 4.9 - Características das Linhas e Modelamento.

Na Figura 4.9 pode-se notar um conjunto de valores que permite adequar o modelo matemático às situações reais, por isso, cada um destes parâmetros deve ser analisado e atribuído corretamente.

É importante salientar que nem todos os campos necessitam ser preenchido, pois alguns deles são derivados de outros e calculados dinamicamente. Como exemplo, pode-se citar os parâmetros impedância característica e coeficiente de reflexão que dependem da altura da linha, das impedâncias de terminação e do diâmetro do condutor.

A Figura 4.10 mostra a aparência da janela “Características da Descarga” acessada por meio do menu “Parâmetros de Descarga” da janela principal.

Componente 1			
Corrente 1:	10,7	KA	T1: 0,25 μs
T2:	2,5	μs	N: 2

Componente 2			
Corrente 2:	6,5	KA	T1: 2,1 μs
T2:	230	μs	N: 2

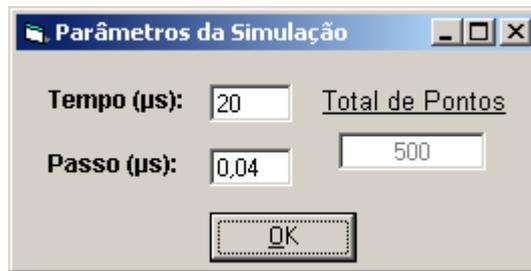
Figura 4.10 - Características da Descarga.

As características como amplitude da corrente de descarga, tempo de subida, tempo de meia onda, etc., podem ser modificadas por meio da janela mostrada na Figura 4.10.

O modelo de descarga utilizado foi o “Modelo de Heidler” que tem se mostrado em diversos trabalhos científicos como o que mais se aproxima das descargas reais e por meio da modelagem mostrada no item 4.4 pode ser facilmente discretizada em fontes do tipo degrau. Os parâmetros pertinentes ao modelo são mostrados também na Figura 4.10 e podem ser modificados segundo a região geográfica na qual a descarga atmosférica ocorrerá.

Os parâmetros de descarga utilizados no “software” durante as simulações foram àqueles conhecidos e validados para o clima tropical brasileiro.

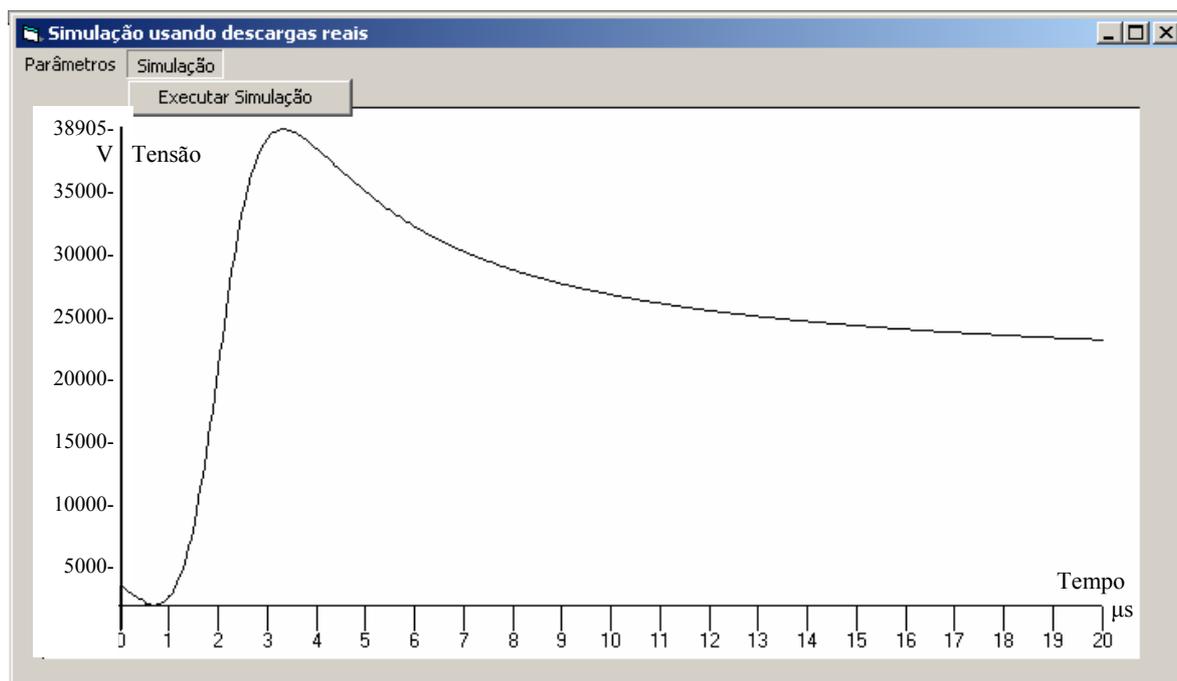
A Figura 4.11 mostra a aparência da janela “Parâmetros da Simulação” que também pode ser acessada por meio do menu da janela principal.



*Figura 4.11 - Parâmetros da Simulação.*

Na Figura 4.11, pode-se notar dois campos principais: “Tempo” e “Passo”. O campo “Tempo” permite que possa ser definido o intervalo de tempo que deverá ser simulado, enquanto que o campo “Passo” permite definir o passo de integração. A divisão do tempo pelo passo de integração resulta no número de pontos necessário para a realização da simulação e este valor é mostrado no campo “Total de Pontos”.

Após a definição de todos os parâmetros, a simulação poderá ser realizada, bastando para isso acessar o item “Executar Simulação” do menu Simulação da janela principal, como pode ser visto na Figura 4.12.



*Figura 4.12 - Execução da Simulação.*

Como resultado da simulação uma série de gráficos são gerados juntamente com um arquivo contendo parâmetros de entrada para a simulação de tensões induzidas no ATP.

#### **4.7.) METODOLOGIA DAS SIMULAÇÕES**

Inicialmente, foi realizada a etapa da revisão bibliográfica, onde os modelos existentes foram estudados e adaptados à condição de análise, ou seja, linhas finitas reais. Após a realização do estado da arte e de posse dos modelos reformulados foi possível unificá-los e construir um algoritmo computacional, que implementado na linguagem Microsoft Visual Basic, fornecesse as tensões induzidas para os diversos pontos da linha em questão. Assim, torna-se viável a confecção de gráficos que expressam as tensões induzidas para os vários pontos da linha de distribuição.

O modelo reformulado de Rusck para linhas finitas determina que o ponto da descarga, transladado ao plano do condutor, seja adotado como  $x=0$  e a distância entre o condutor e a descarga adotada como  $y$ , como visto na Figura 4.7.

Sabe-se também que as plantas de distribuição englobam trechos sinuosos e retilíneos, tornando-se o sistema extremamente complexo e com inúmeras derivações para ser analisado de uma única vez. Sendo assim, decidiu-se por um estudo direcionado a trechos retilíneos e com poucas derivações. A Figura 4.13 mostra uma parte da planta da Companhia Luz e Força Santa Cruz (CLFSC) analisado para o cálculo das tensões induzidas.

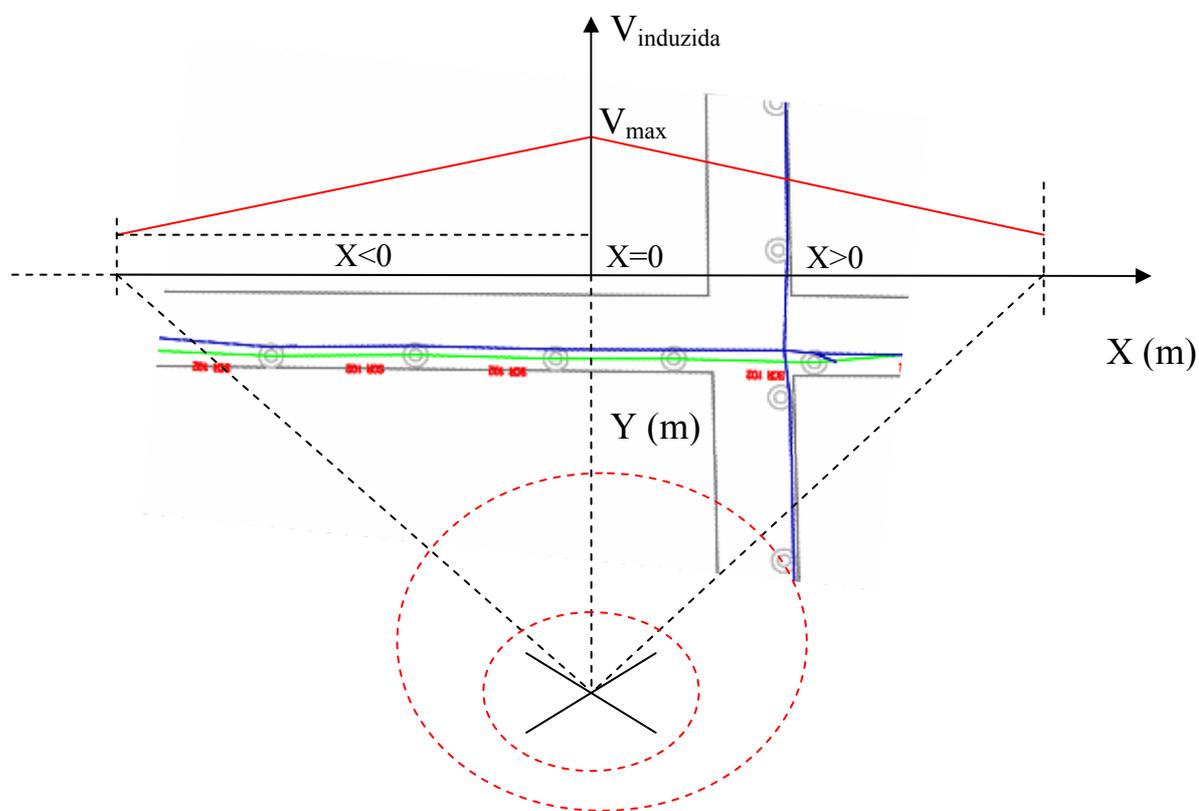


Figura 4.13 - Análise das tensões induzidas na linha (impedância casada nas extremidades)

O tamanho da linha nas simulações não ultrapassou os 1500m e o posicionamento da descarga foi estrategicamente definido para que o comportamento pudesse ser analisado em trechos com  $x>0$  e  $x<0$ . A região central

tornou-se a mais afetada pelas altas tensões induzidas sendo propagada as extremidades com valores inferiores (admitiu-se um perfeito casamento de impedância nas terminações).

Durante as simulações, variou-se o número de pára-raios e analisou-se a melhor configuração, buscando sempre a otimização do sistema elétrico frente às descargas indiretas.

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1.) SIMULAÇÕES PRELIMINARES COM DESCARGA DIRETA

A fim de evidenciar a atuação dos pára-raios na linha de distribuição e quantificar o nível de tensão propagado em uma descarga direta, foram realizadas algumas simulações preliminares. Nestas simulações com descarga direta, construíram-se dois circuitos de distribuição, os quais foram protegidos com pára-raios conforme a Tabela 5.1.

*Tabela 5.1 - Configuração dos circuitos quanto à presença de pára-raios.*

Posições (m)	0	150*	300	600	750**	900	1050	1200	1500
Nome do Ponto	Ini	P0	P1	P3	Meio	P5	P6	P7	Fim
<b>Pára-raios Circuito 1</b>					X				
<b>Pára-raios Circuito 2</b>	X		X		X		X		X

\* Posição em que ocorre a descarga atmosférica em ambas as simulações.

\*\* Posição em que é locado o transformador de distribuição em ambas às simulações.

Nesta simulação, utilizou-se uma linha de distribuição trifásica de 13,8kV, 1.500m de comprimento, o qual foi subdividido em 10 partes de 150m para análise da onda de tensão e onda de corrente originária pela descarga atmosférica. A linha possui uma altura nominal de 8,4m nos pontos altos e 7,2m nos pontos mais baixos.

O cabo utilizado nesse sistema de distribuição foi o de alumínio, com bitola 1/0 AWG, sem revestimento de isolamento e sem alma de aço. Os dados construtivos deste cabo foram fornecidos pela Companhia Luz e Força Santa Cruz (CLFSC).

Considerou-se também a transposição dos cabos, o efeito “skin” e os pára-raios utilizados foram os de óxido de zinco (ZnO). Para que a simulação apresentasse um comportamento mais real possível, utilizou-se um transformador de distribuição, trifásico, com saturação de modo a representar a rede de baixa tensão.

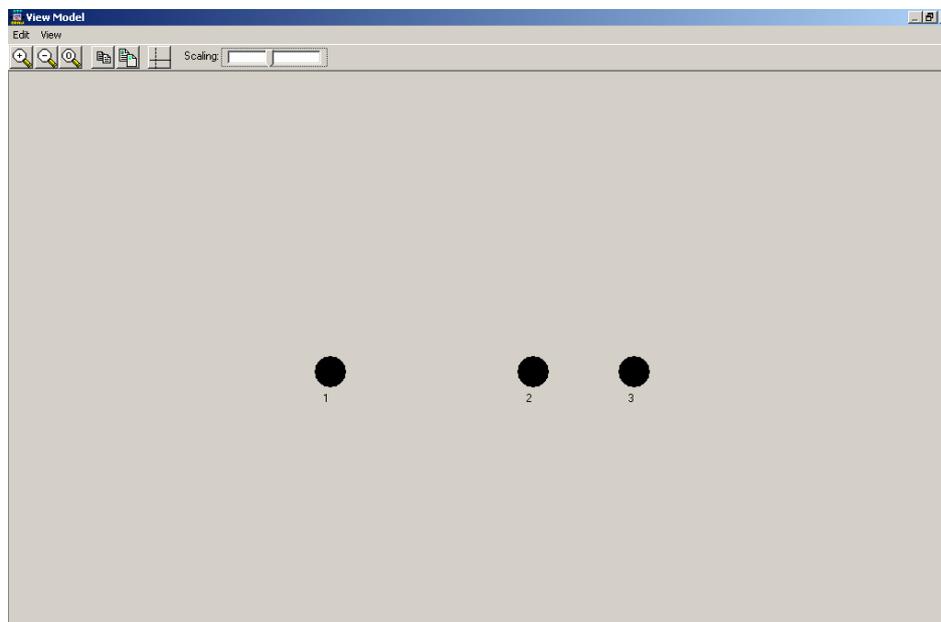
A impedância característica da linha pode ser calculada pela expressão (4.10). O valor calculado para a impedância característica foi da ordem de 500 Ohms, valor utilizado para um casamento de impedância adequado.

Utilizaram-se três pára-raios do tipo Óxido de Zinco (Type 92), com tensão de corte em 25kV, inserido junto a estação transformadora.

A descarga atmosférica foi simulada por meio de uma fonte de corrente HEIDLER tipo 15 (Figura 4.2), com tensão variável e corrente fixada em 90kA no instante inicial da descarga. A descarga teve duração de aproximadamente 30 $\mu$ s obedecendo a topologia da fonte utilizada. A eficácia da simulação está intimamente ligada aos parâmetros construtivos da linha, tais como: altura dos postes, espaçamento entre cabos, bitola de cabos, resistência, disposição, etc.

A Figura 5.1 mostra uma estrutura padronizada para redes aéreas de distribuição urbana que comumente são utilizadas pelas concessionárias de energia elétrica. Com os dados construtivos mostrados nesta figura, é possível configurar parte da linha simulada no programa ATP.





*Figura 5.2 - Configuração dos Cabos no Programa ATP.*  
(Fonte: ATPDraw versão 3.6p2)

Com tais dados construtivos, foi possível inserir valores reais nos itens de configuração da linha no programa ATP. As Figuras 5.3 e 5.4, mostram os dados inseridos no ícone LCC do ATPdraw.

Model | Data

System type  
 Overhead Line Phases: 3

Transposed  
 Auto bundling  
 Skin effect  
 Segmented ground  
 Real transf. matrix

Units  
 Metric  
 English

Standard data  
 Rho [ohm\*m] 0.01  
 Freq. init [Hz] 0.05  
 Length [km] 1.5

Model  
 Type  
 Bergeron  
 PI  
 JMarti  
 Noda  
 Semlyen

Data  
 Decades 8 Points/Dec 10  
 Freq. matrix [Hz] 5000 Freq. SS [Hz] 5  
 Use default fitting

Comment:

OK Cancel Import Save As Run ATP View Verify Edit icon Help

Figura 5.3 - Dados Construtivos da Linha simulada.  
 (Fonte: ATPDraw versão 3.6p2)

Model | Data

#	Ph.no.	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]	Separ [cm]	Alpha [deg]	NB
1	1	0	9.35	0.9	0	8.4	6	0	0	0
2	2	0	9.35	0.9	1.2	8.4	6	0	0	0
3	3	0	9.35	0.9	1.8	8.4	6	0	0	0

Add row Delete last row Insert row copy Move

OK Cancel Import Save As Run ATP View Verify Edit icon Help

Figura 5.4 - Dados da Linha e Cabo de Distribuição.  
 (Fonte: ATPDraw versão 3.6p2)

### 5.1.1.) RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DE DESCARGAS DIRETAS EM LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO

Nas Figuras 5.5 e 5.6, observa-se o comportamento da tensão e da corrente respectivamente.

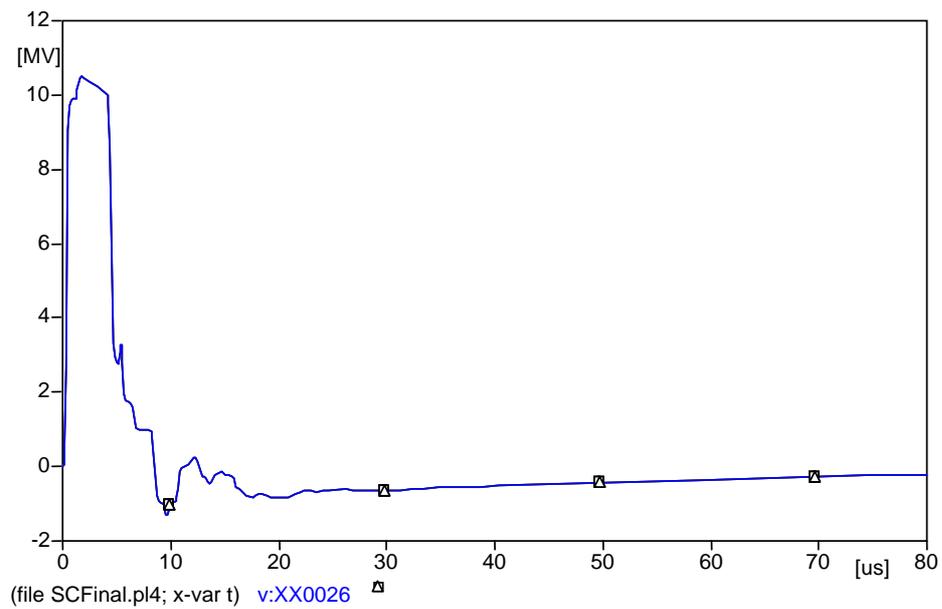
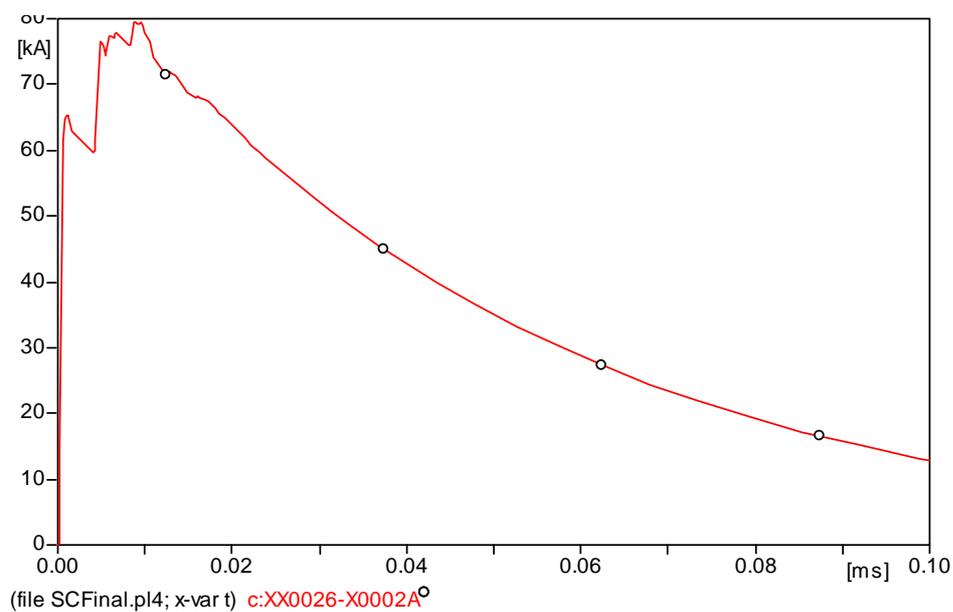


Figura 5.5 - Tensão Gerada pela Descarga.



*Figura 5.6 - Corrente Gerada pela Descarga.*

A tensão da descarga pela fonte de Heidler é muitas vezes superior à tensão nominal da linha em questão, logo a fonte de tensão nominal da linha pode ser suprimida. Para o casamento de impedâncias adequados, utilizou-se o mesmo valor de impedância, tanto para o início da linha quanto para seu término.

A Figura 5.7 apresenta a propagação da onda em vários pontos da linha. Nesta figura, nota-se claramente a defasagem temporal, o decaimento do valor de pico e a atuação do pára-raio reduzindo a tensão a um valor de 25kV para os pontos protegidos pelo mesmo.

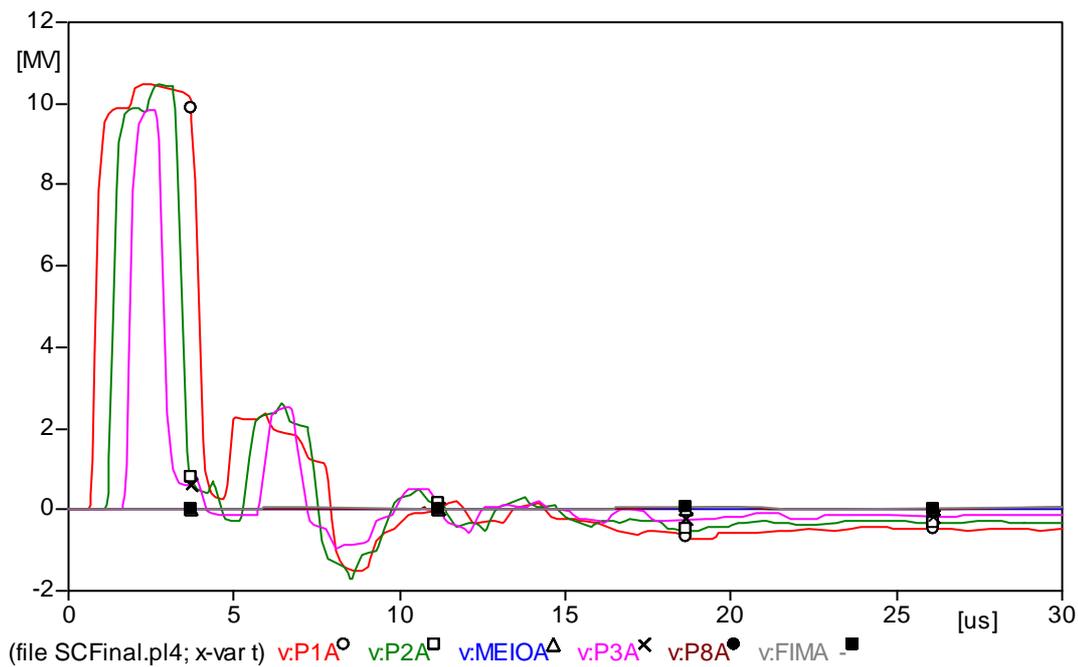


Figura 5.7 - Propagação da Onda de Sobretensão na Linha.

A Figura 5.8 mostra a atuação dos pára-raios cortando a onda de tensão em 25kV, a qual é a tensão limite dos pára-raios considerada nesta simulação. A ação dos pára-raios é notada não só na fase atingida pela descarga, mas também pelas fases onde a descarga foi induzida.

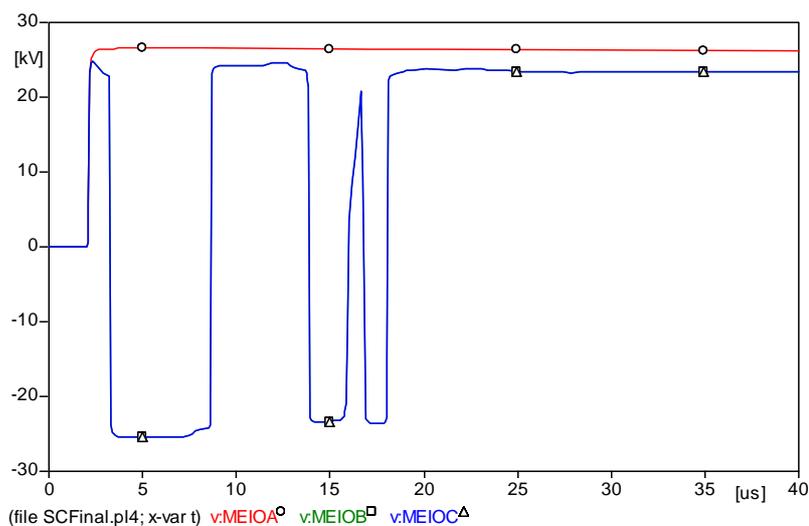
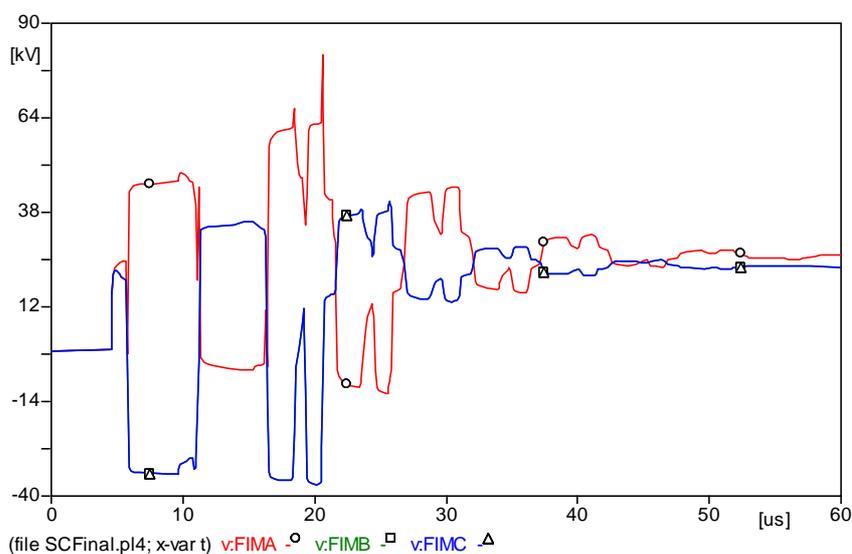


Figura 5.8 - Tensão após a Atuação do Pára-Raios.

A tensão na fase atingida se mantém em um nível não superior a 40kV de pico conforme observado na Figura 5.9 denotando um certo decaimento significativo da tensão inicial gerada pela descarga. Vale ressaltar que nesta configuração utilizada (Tabela 5.1), tem-se a proteção apenas no transformador. Para ampliar a confiabilidade deste sistema em questão, sugerem-se inserir outros dispositivos de proteção adicionais, que serão acrescidos e simulados no circuito 2 mostrado na Tabela 5.1.



*Figura 5.9 - Tensão nas Fases após a Atuação do Pára-Raio.*

Na Figura 5.10 tem-se um decaimento de tensão já no primeiro ponto estudado, isto ocorre justamente pela existência de um pára-raio neste ponto, fazendo com que não haja a propagação da sobretensão para os outros pontos da linha.

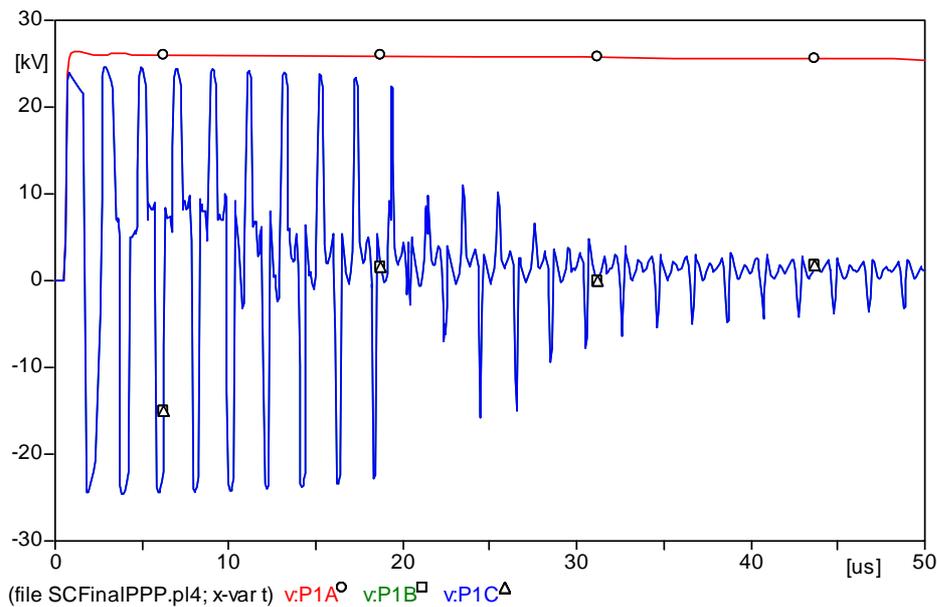


Figura 5.10 - Tensão no Ponto "1" para o Circuito 2.

A Figura 5.11 apresenta o comportamento da tensão para o ponto "2", a partir desta figura é possível identificar um acréscimo de tensão frente ao ponto "1", isto ocorre porque este ponto não possui proteção e com a reflexão de ondas no final da linha tem-se o aumento do limiar de tensão para este ponto.

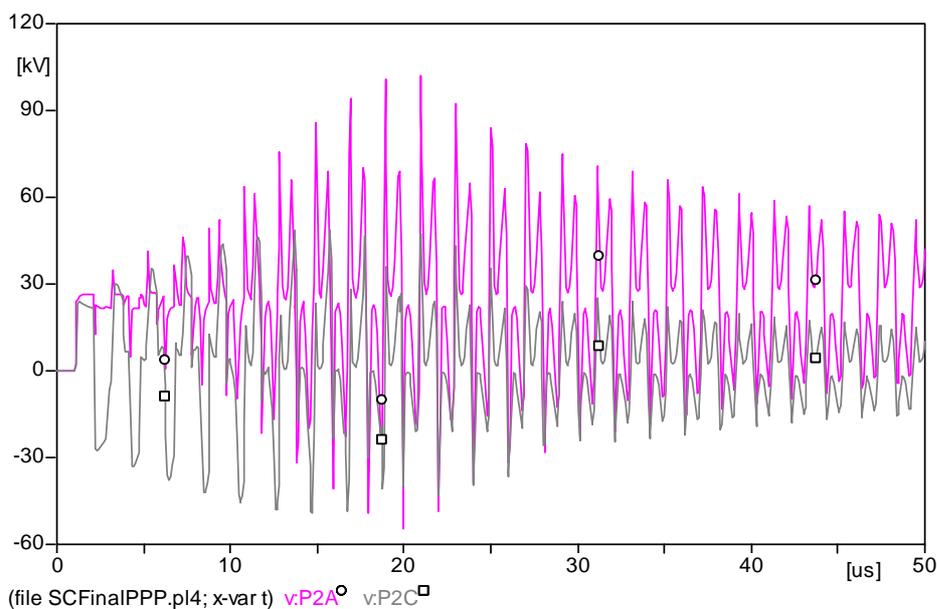


Figura 5.11 - Tensão no Ponto "2" para o Circuito 2.

No ponto “3”, Figura 5.12 obtém-se um comportamento aproximadamente igual ao do ponto “1”, pois existe neste ponto o sistema protetor. Embora, haja ocorrência das reflexões de ondas no final da linha, estas são minimizadas pela proteção, que reduz ainda mais o nível de tensão frente ao ponto “1”.

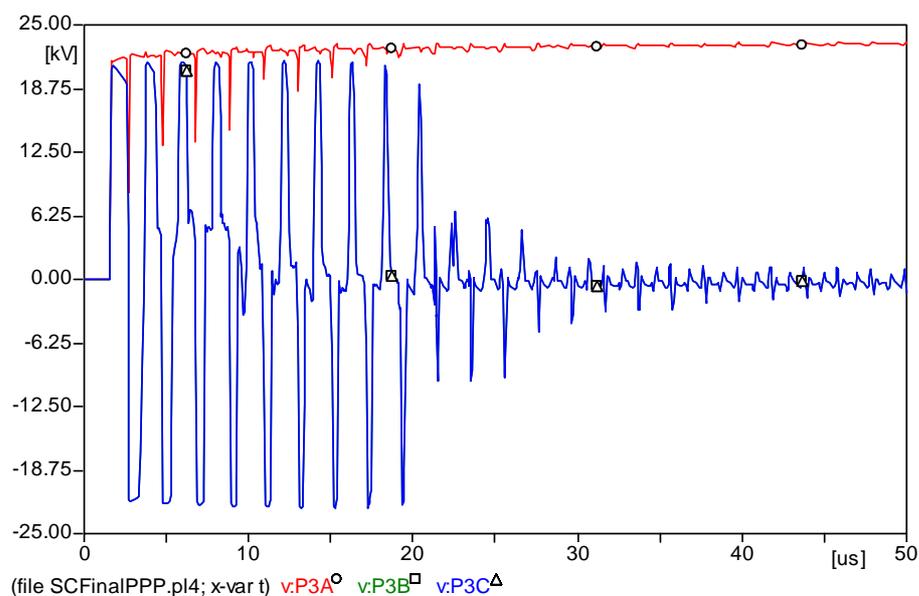
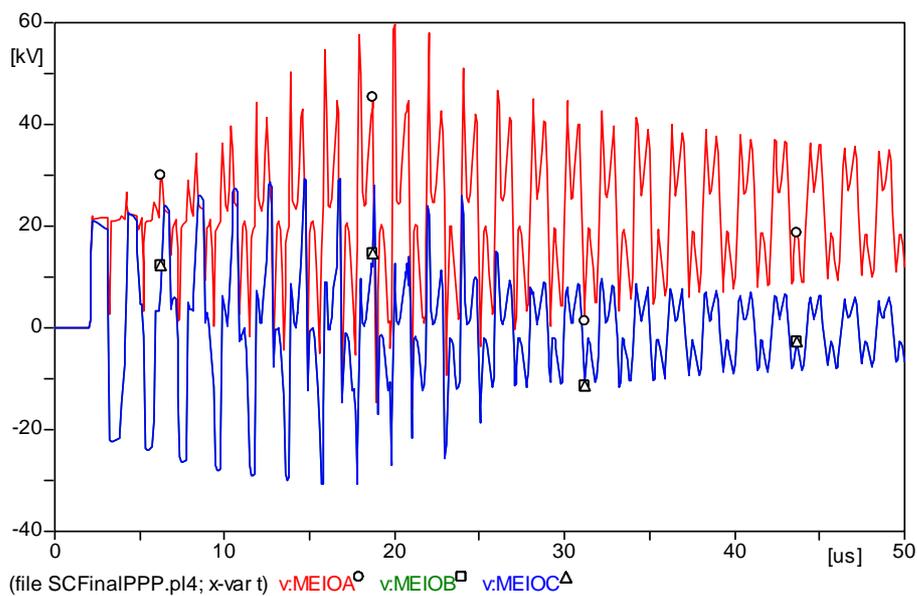


Figura 5.12 - Tensão no Ponto “3” para o Circuito 2.

A Figura 5.13 mostra a tensão na metade da linha de distribuição, ponto em que não há proteção, logo se tem um acréscimo no valor de pico da sobretensão gerada pela descarga. Este acréscimo devido à reflexão é menor que no ponto “2”, pois agora a onda de tensão já passou por dois pára-raios que cortam também o efeito das reflexões.



*Figura 5.13 - Tensão na Metade da Linha para o Circuito com Vários Para-Raios.*

Por fim, tem-se na Figura 5.14 a tensão no final da linha de distribuição. Neste ponto, todos os para-raios tiveram atuação nesta planta e como resultado disso, obtém-se uma menor sobretensão. Nota-se que este valor está muito próximo ao valor de pico da tensão nominal deste sistema, fator pelo qual minimiza os efeitos danosos.

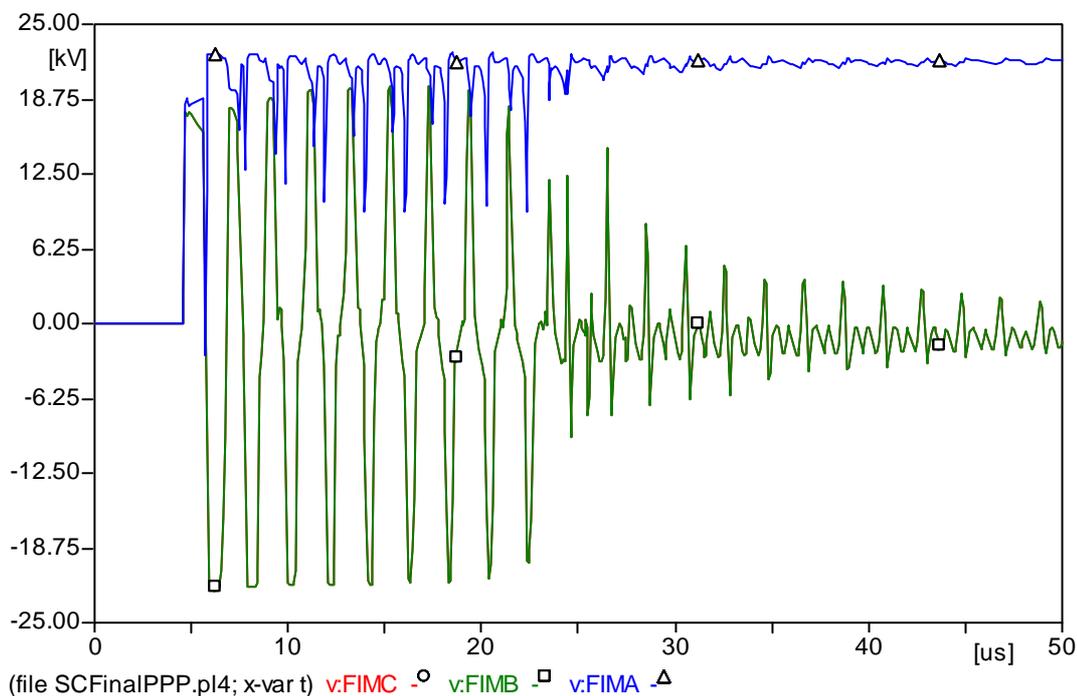


Figura 5.14 - Tensão no Final da Linha para o Circuito com Vários Pára-Raios.

### 5.1.2) CONCLUSÕES DAS SIMULAÇÕES COM DESCARGAS DIRETAS

As simulações são ótimas ferramentas para se analisar o desempenho do sistema de distribuição frente às descargas atmosféricas, tendo-se em vista que o sistema elétrico não pode falhar.

A análise em uma rede de distribuição real é muito complicada, pois a ocorrência de uma descarga está limitada aos fatores físicos e ambientais, além de requerer uma rede exclusiva para tais testes, equipamentos de análises, mão de obra à disposição, entre outros fatores que inviabilizam o estudo em loco.

Nestas simulações realizadas por meio do programa ATP, têm-se parâmetros importantíssimos para o estudo das descargas diretas, bem como parâmetros de comparações entre os níveis de sobretensões ocasionadas por descargas diretas e indiretas (item 5.2).

As simulações têm mostrado a alta capacidade dos pára-raios em ceifar as sobretensões geradas pelas descargas atmosféricas, bem como reduzir os efeitos

das reflexões de ondas que são anuladas pelos pára-raios. Pode-se constatar também o deslocamento da onda de sobretensão na linha e a atenuação das mesmas frente ao seu deslocamento.

Nota-se que os pára-raios além de proteger a linha pela eliminação da onda de sobretensão, ainda exerce um papel fundamental na proteção dos transformadores, que conseqüentemente estarão livres da continuidade deste evento, contribuindo para a proteção das linhas de distribuição secundárias de baixa tensão.

## **5.2.) SIMULAÇÕES DAS TENSÕES INDUZIDAS EM LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO**

No item 5.1 foram realizadas simulações em linhas de distribuição com descargas atmosféricas diretas e duas configurações preliminares. Neste tópico, realizaram-se simulações de descargas atmosféricas indiretas em linhas de distribuição sem proteções (ausência de pára-raios) e com proteções (com pára-raios).

Os parâmetros das simulações permaneceram iguais, a fim de se comparar o desempenho de linhas frente a uma descarga direta e indireta, protegida e desprotegida. Com esse intuito foram utilizadas as seguintes configurações para as simulações:

- Simulações sem pára-raios.
- Simulações com pára-raios a cada 150m.
- Simulações com pára-raios a cada 300m.
- Simulações com pára-raios nos extremos das linhas.

Desta forma é possível avaliar o comportamento da tensão induzida frente aos vários níveis de proteção e com isso avaliar qual configuração possui melhor

desempenho, quantificando numa segunda etapa, a relação custo-benefício de cada configuração simulada.

Nestas simulações foram analisadas e mostradas somente as tensões induzidas nas posições de  $x = -450$ ,  $-150$  e  $0$ m. devido à simetria existente, pois o comportamento das tensões induzidas é espelhado na posição  $x=0$  para as coordenadas positivas.

A Tabela 5.2 mostra um comparativo das configurações utilizadas nesta etapa, juntamente com a localização de cada ponto.

*Tabela 5.2 - Configuração dos circuitos quanto à presença de pára-raios.*

Posições x (m)	-750	-600*	-450	-300	-150	0**	150	300	450	600	750
Nome Ponto	Ini	P0	P1	P2	P3	Meio	P5	P6	P7	P8	Fim
<b>Pára-raios Circuito 1</b>											
<b>Pára-raios Circuito 2</b>	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
<b>Pára-raios Circuito 3</b>	X		X		X			X		X	
<b>Pára-raios Circuito 4</b>	X					X					X

\* Posição em que ocorre a descarga atmosférica nas simulações.

\*\* Posição em que é locado o transformador de distribuição.

### **5.2.1.) TENSÕES INDUZIDAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO SEM PROTEÇÃO**

Nesta simulação, a linha de distribuição utilizada não possui qualquer proteção (pára-raios) contra descargas atmosféricas. A Figura 5.15 mostra o comportamento da tensão no ponto  $x=-450$ m para as fases A, B e C.

É possível observar que o valor de pico da tensão induzida por uma descarga atmosférica a uma distância de 450m da linha considerada, aproxima-se de 40kV, valor considerado elevado, tendo-se em vista a classe de isolamento desta rede.

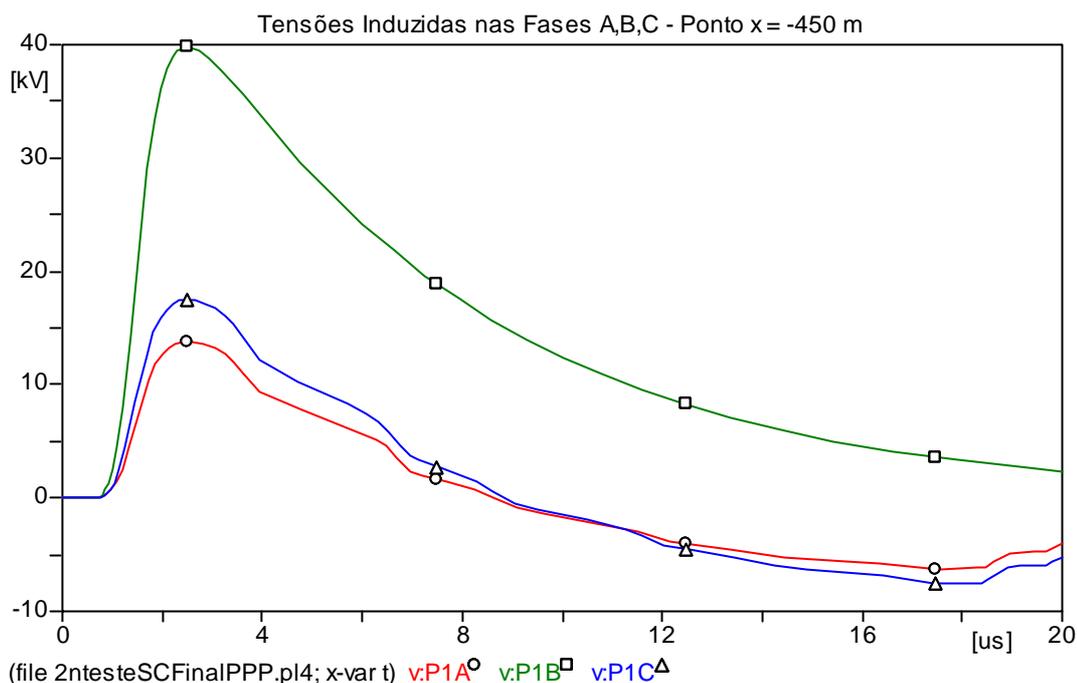


Figura 5.15 - Tensões induzidas nas Fases A, B, C para um ponto  $x=-450m$ .

De forma análoga ao comportamento da tensão induzida mostrada na simulação anterior, as Figuras 5.16, e 5.17 apresentam respectivamente as tensões induzidas nas posições  $x=-150m$  e  $0m$ , respectivamente.

Nota-se que a tensão induzida ao longo da linha mantém seu valor constante e elevado, pois não existem equipamentos destinados a dissipar essa energia gerada pela descarga, isso faz com que haja a transferência dessa onda de sobretensão para linhas de distribuição em baixa tensão, causando conseqüências danosas aos diversos consumidores atendidos por esta linha.

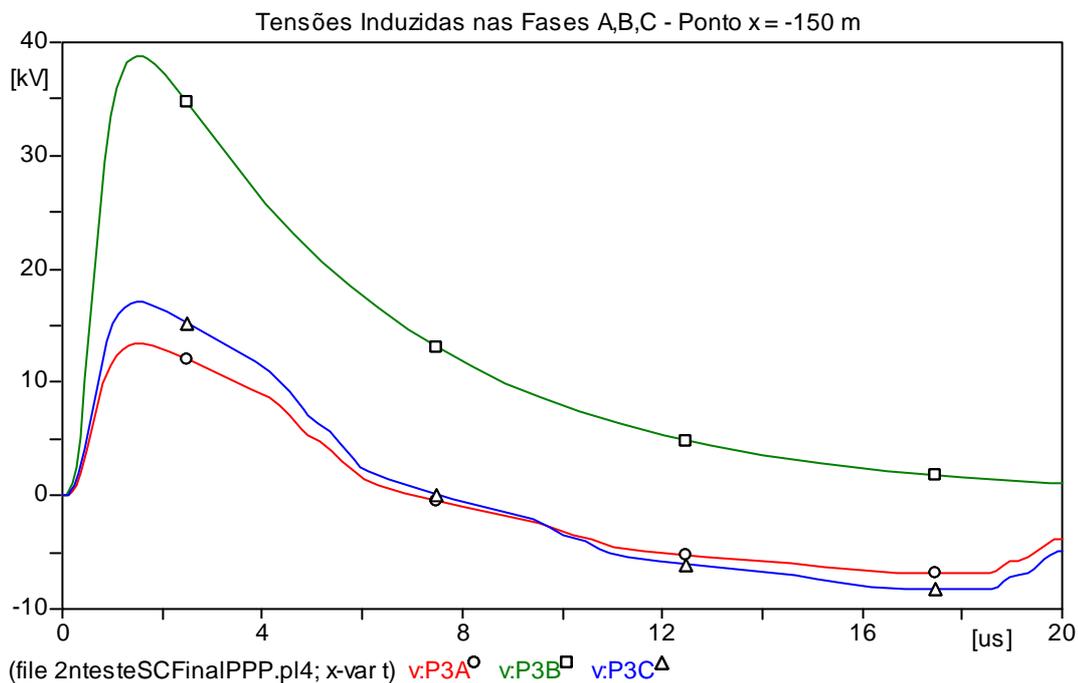


Figura 5.16 - Tensões induzidas nas fases A, B, C para um ponto x=-150m.

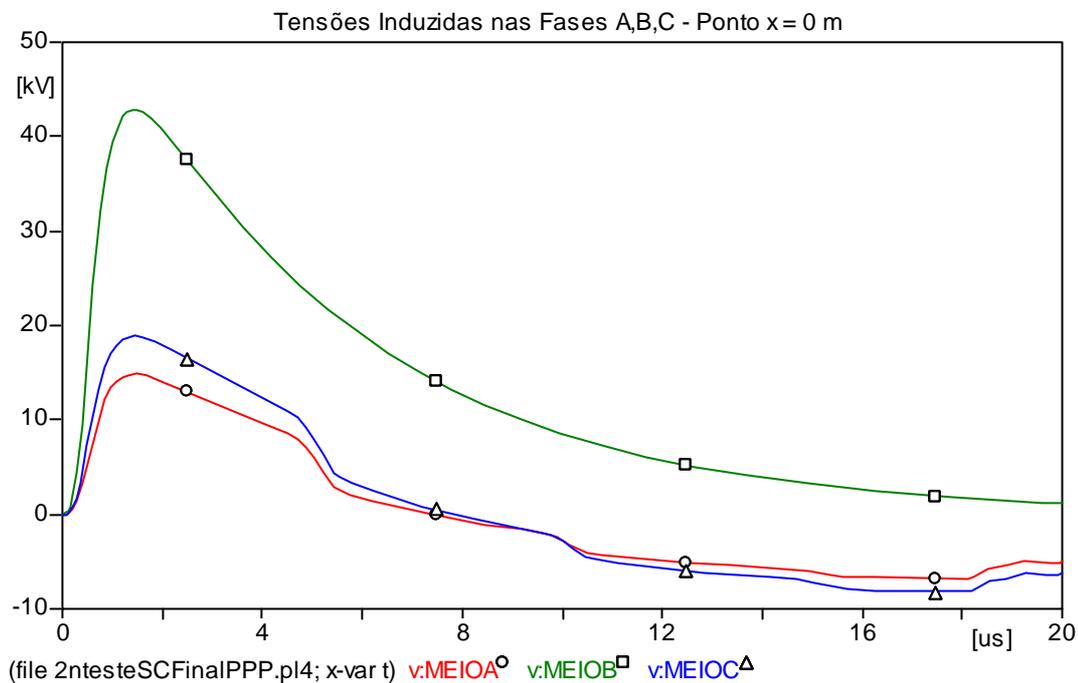


Figura 5.17 - Tensões induzidas nas fases A,B,C para um ponto x=0m.

A Figura 5.18 ilustra um comparativo das tensões induzidas ao longo da linha para uma das fases. Observa-se que o valor de pico da sobretensão induzida decresce com o aumento do módulo da distância em  $x$ . Esse decréscimo é muito pequeno comparado ao nível de tensão atingido por essa descarga e somente ocorre pelo aumento da distância entre a descarga e o cabo e também pela dissipação na resistência do cabo. Observa-se também a defasagem entre as curvas das tensões induzidas, tal defasagem ocorre devido à velocidade de propagação da onda de sobretensão na linha de distribuição.

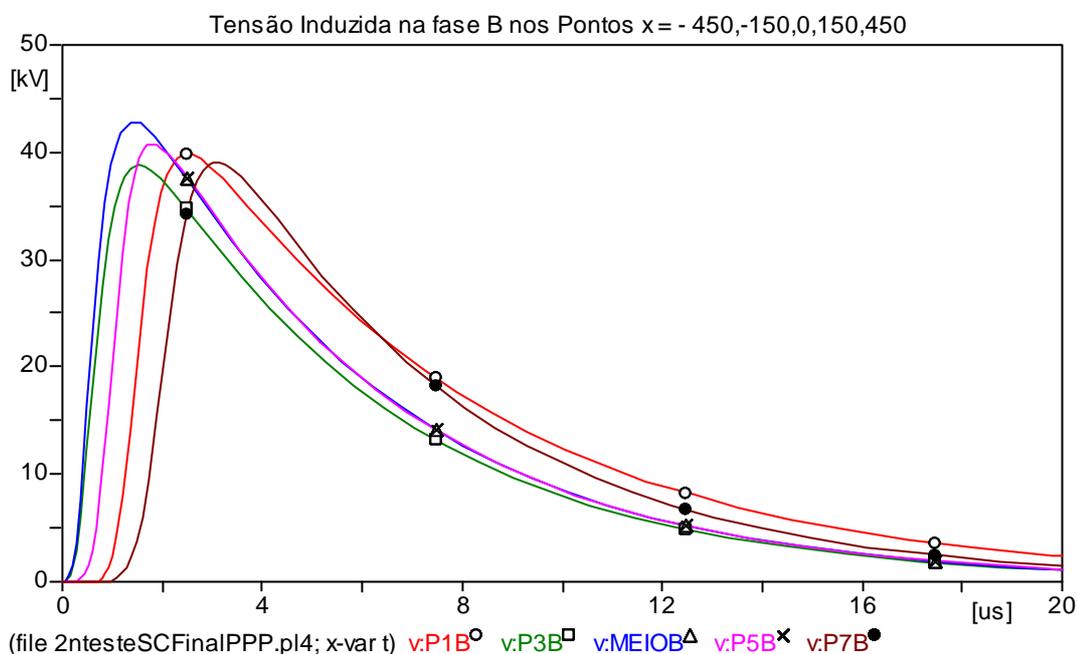


Figura 5.18 - Tensões induzidas nas Fases A, B, C para diversas posições.

### 5.2.2.) TENSÕES INDUZIDAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO COM PROTEÇÃO A CADA 150M.

Nas simulações subseqüentes, admite-se a existência de sistemas destinados à dissipação de energia (pára-raios), os quais são alocados a cada 150m, de acordo com a Tabela 5.2 supracitada.

Nesta simulação é possível verificar o nível de tensão na linha de distribuição após a atuação dos pára-raios, comparando-os com os resultados da primeira simulação.

A Figura 5.19 mostra o comportamento da tensão induzida a 450m da descarga. Observa-se que o nível de tensão é bem reduzido em comparação com as simulações apresentadas no item anterior, característica proporcionada pela atuação dos pára-raios.

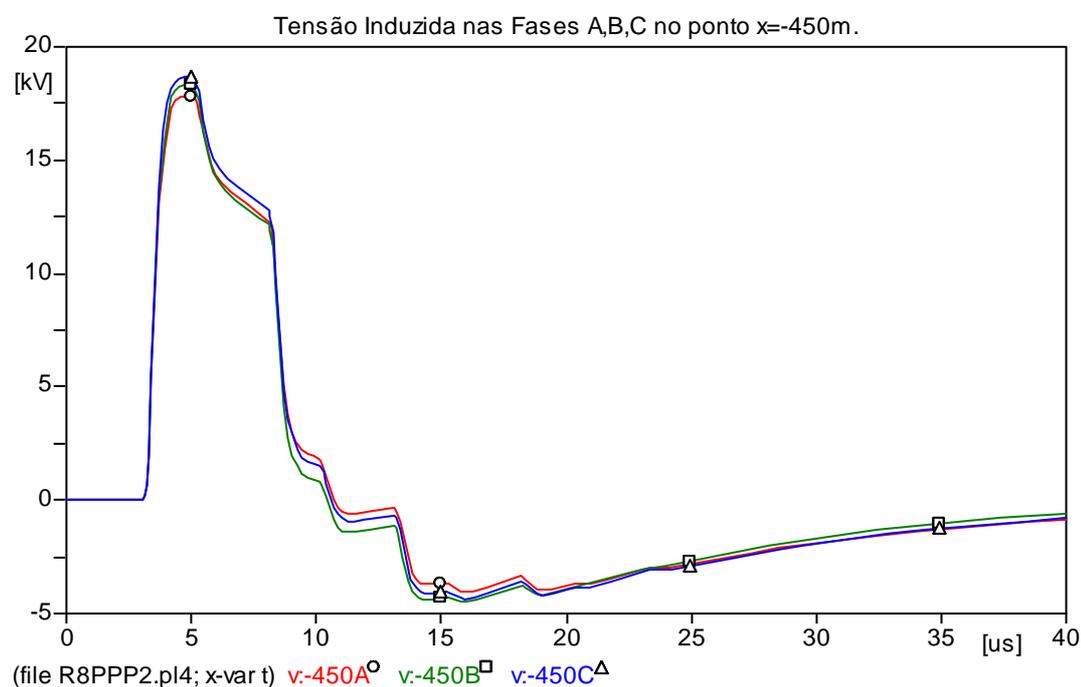


Figura 5.19 - Tensões induzidas nas fases A, B, C para um ponto  $x = -450m$ .

As Figuras 5.20 e 5.21 mostram respectivamente, o comportamento das tensões induzidas nas fases A, B e C para os pontos  $x = -150$  e  $0m$ .

Nota-se a propagação da onda de sobretensão na linha juntamente com sua defasagem temporal devido à propagação e indução da onda eletromagnéticas que as gerou. A tensão induzida mantém-se ao nível da classe de tensão utilizada nos pára-raios, mostrando assim sua atuação.

O acréscimo de tensão vista nestas figuras, deve-se a maior proximidade da descarga com os pontos observados na simulação.

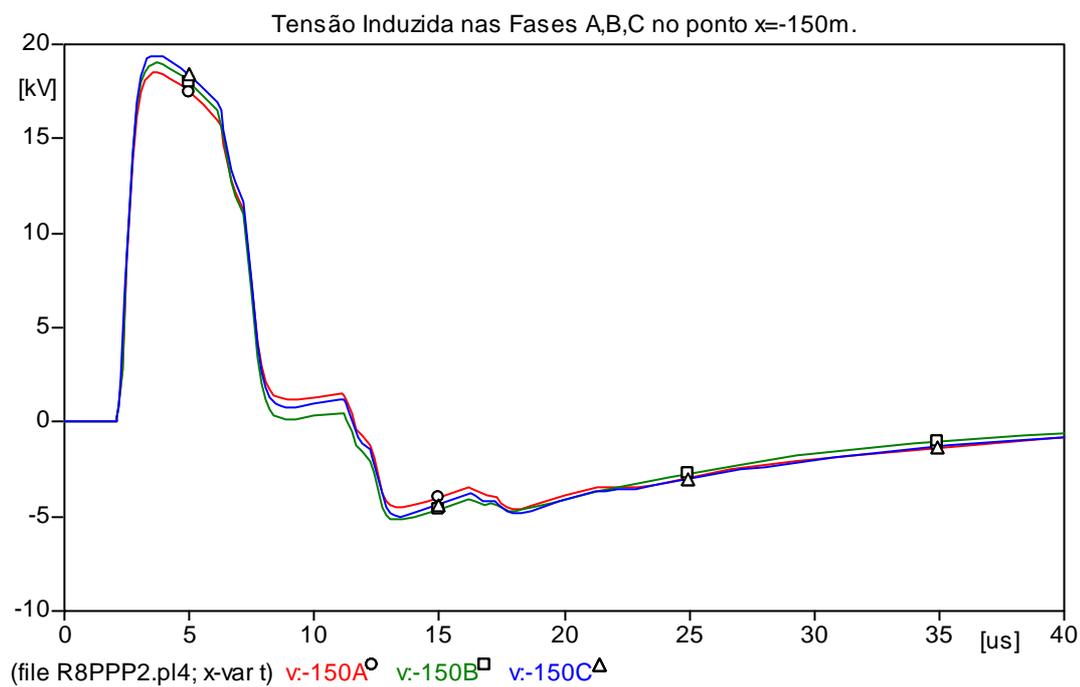


Figura 5.20 - Tensões induzidas nas fases A, B, C para um ponto  $x = -150m$ .

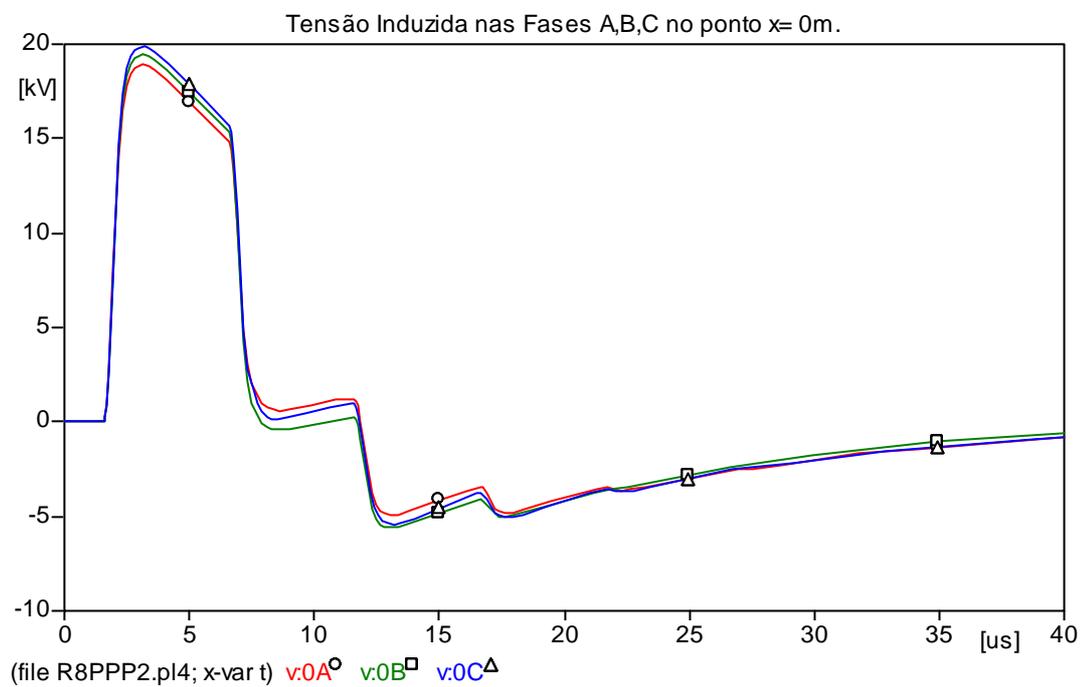


Figura 5.21 - Tensões induzidas nas fases A, B, C para um ponto  $x = 0m$ .

Na Figura 5.22, tem-se um comparativo das tensões induzidas na fase “A” desta linha de distribuição, para os pontos  $x = 0, 150, 450$  e  $750\text{m}$ . Desta forma é possível verificar que o nível da tensão induzida tem um decréscimo ocasionado por três fatores: as atuações dos pára-raios, maior distância entre os condutores e a descarga e a resistência do cabo.

Comparando-se com a Figura 5.18, nota-se que a influência dos pára-raios para esta redução é muito significativa, pois na Figura 5.18 também ocorre uma redução de tensão devido à distância e resistência do cabo.

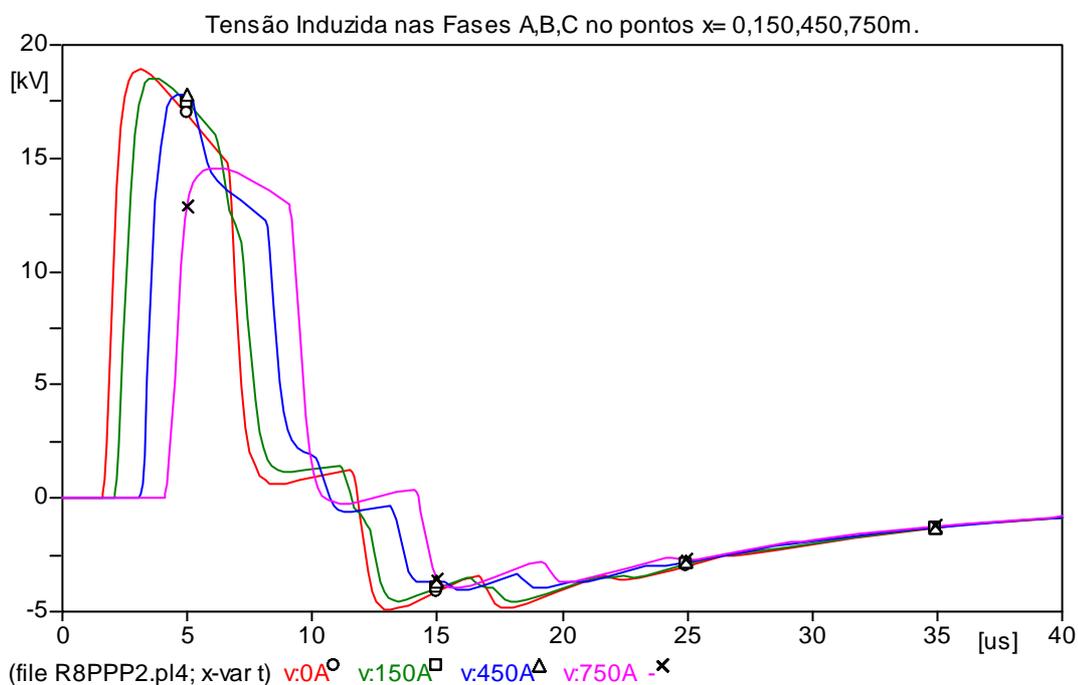


Figura 5.22 - Tensões induzidas nas fases A, B, C para um ponto  $x = 0, 150, 450, 750\text{m}$ .

### 5.2.3.) TENSÕES INDUZIDAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO COM PROTEÇÃO A CADA 300 M.

Nesta configuração a utilização de pára-raios a cada 300m proporciona também a redução do nível de tensão na linha de distribuição após uma descarga atmosférica.

As Figuras 5.23, 5.24 e 5.25 apresentam o comportamento da tensão induzida para as fases A, B e C para os pontos  $X=-450,-150$  e  $0m$ , respectivamente.

O comportamento desta configuração é análogo ao mostrado no item anterior, salvo a diferença no valor de pico da onda de sobretensão gerada, pois nesse caso, devido à redução dos pára-raios, o nível de sobretensão obteve um acréscimo. Porém este acréscimo não tem contribuição significativa no aumento desta sobretensão.

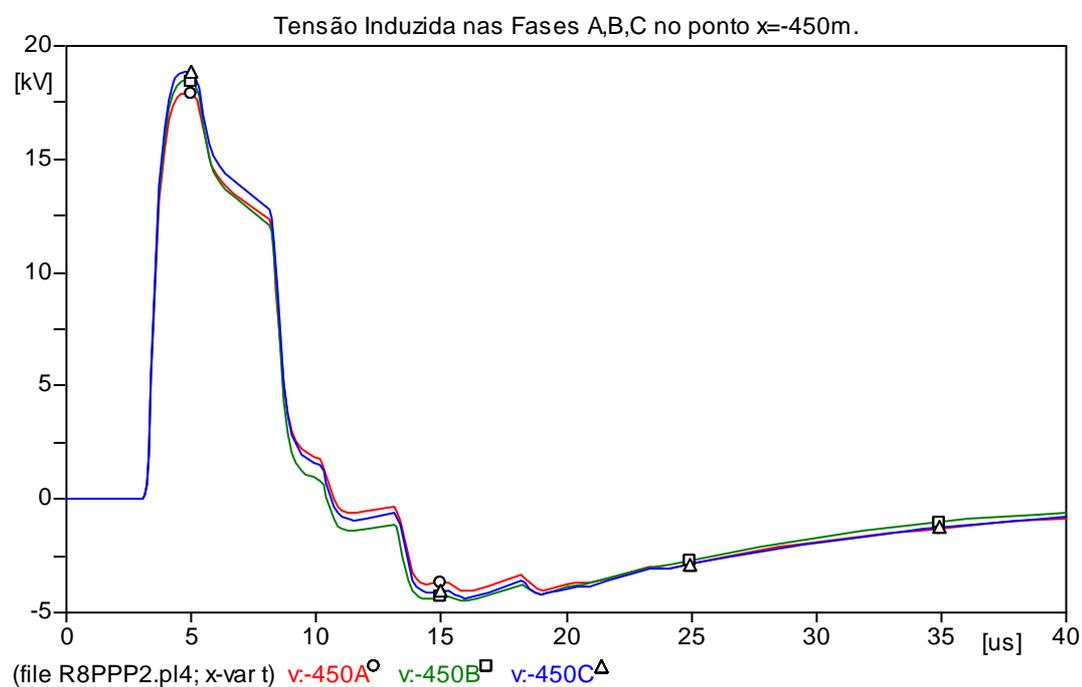


Figura 5.23 - Tensões induzidas nas fases A, B, C para um ponto  $x = -450m$ .

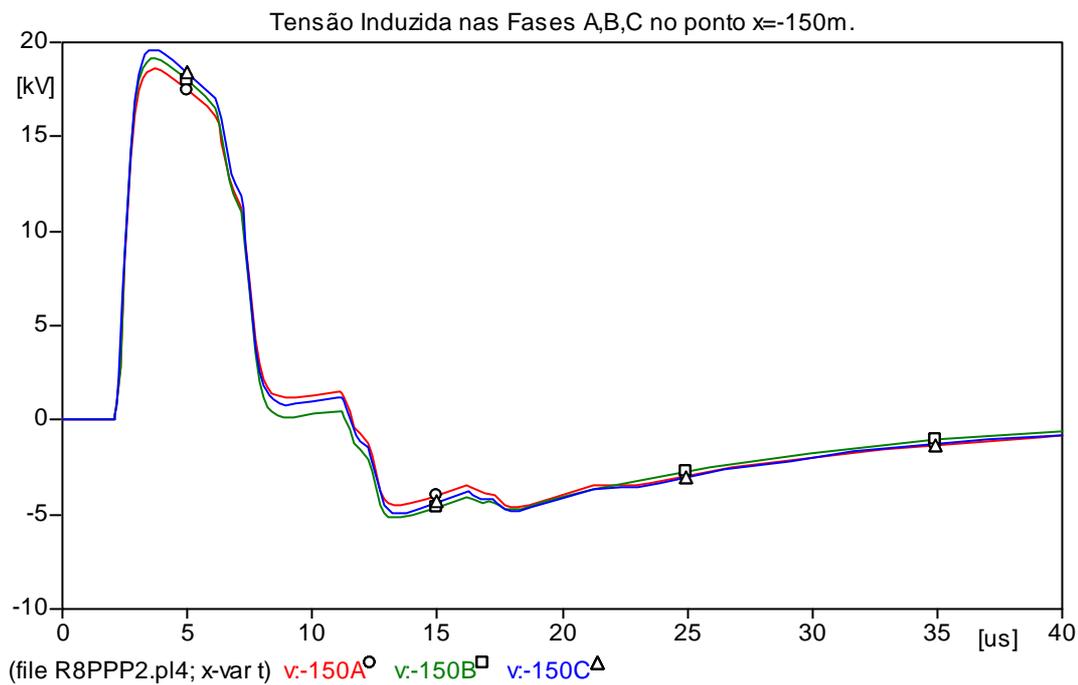


Figura 5.24 - Tensões induzidas nas fases A, B, C para um ponto  $x = -150m$ .

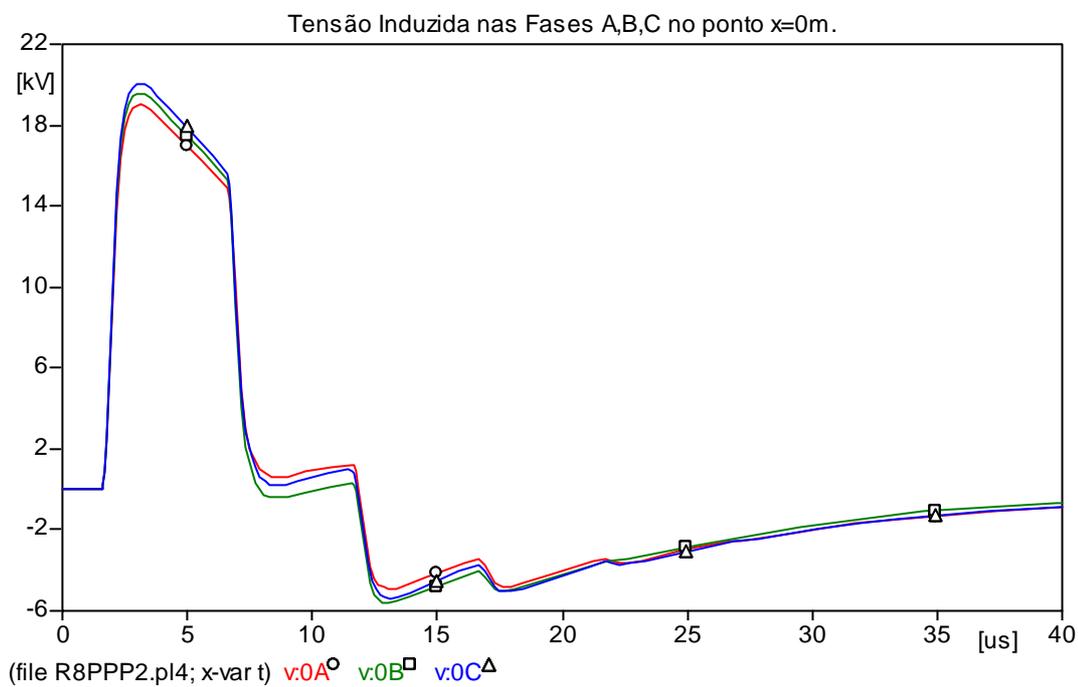


Figura 5.25 - Tensões induzidas nas fases A,B,C para um ponto  $x = 0m$ .

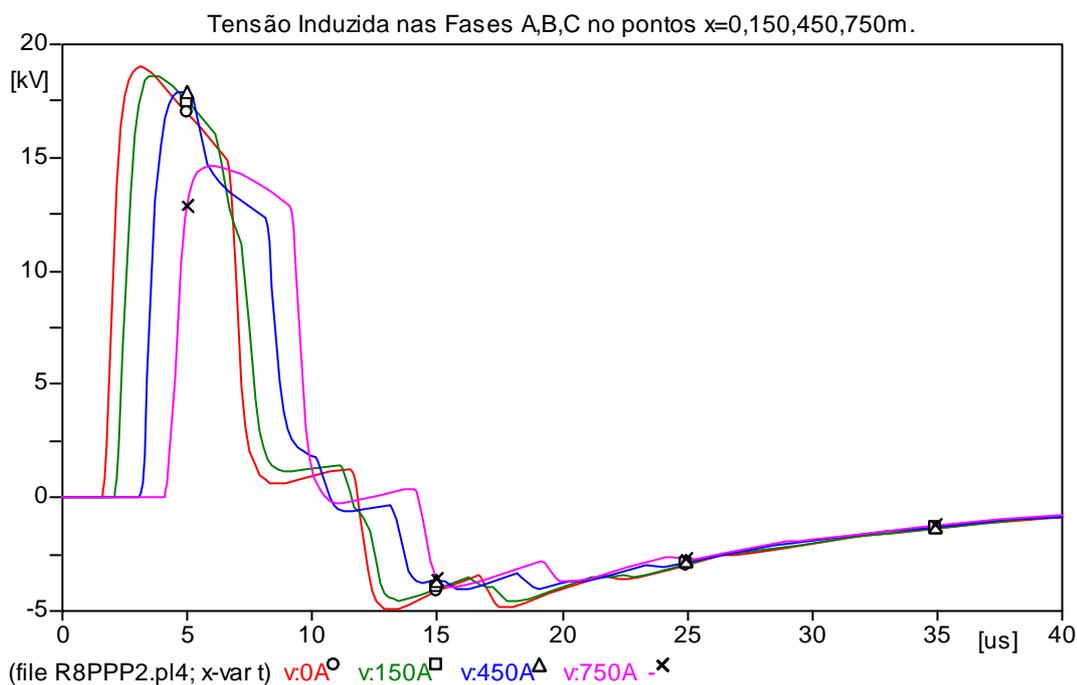


Figura 5.26 - Tensões induzidas nas fases A, B, C para um ponto  $x = 0, 150, 450, 750m$ .

Observa-se na Figura 5.25 um comportamento similar ao da Figura 5.22, ou seja, a redução do número de pára-raios não influenciou significativamente no aumento da tensão induzida, proporcionando assim um mesmo nível de tensão.

#### 5.2.4.) TENSÕES INDUZIDAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO COM PROTEÇÃO NOS EXTREMOS DA LINHA.

Outra configuração utilizada nas simulações foi o acréscimo de pára-raios somente nas terminações do alimentador, conforme a Tabela 5.2. Nesta configuração, há uma redução significativa no número de pára-raios empregados.

As Figuras 5.27, 5.28 e 5.29 apresentam o comportamento da tensão induzida para as fases A, B e C para os pontos  $x=-450,-150$  e  $0m$ , respectivamente.

Observa-se que com a redução do número de pára-raios o aumento da tensão induzida é significativo. Fato originado pela deficiência na drenagem de energia ao solo.

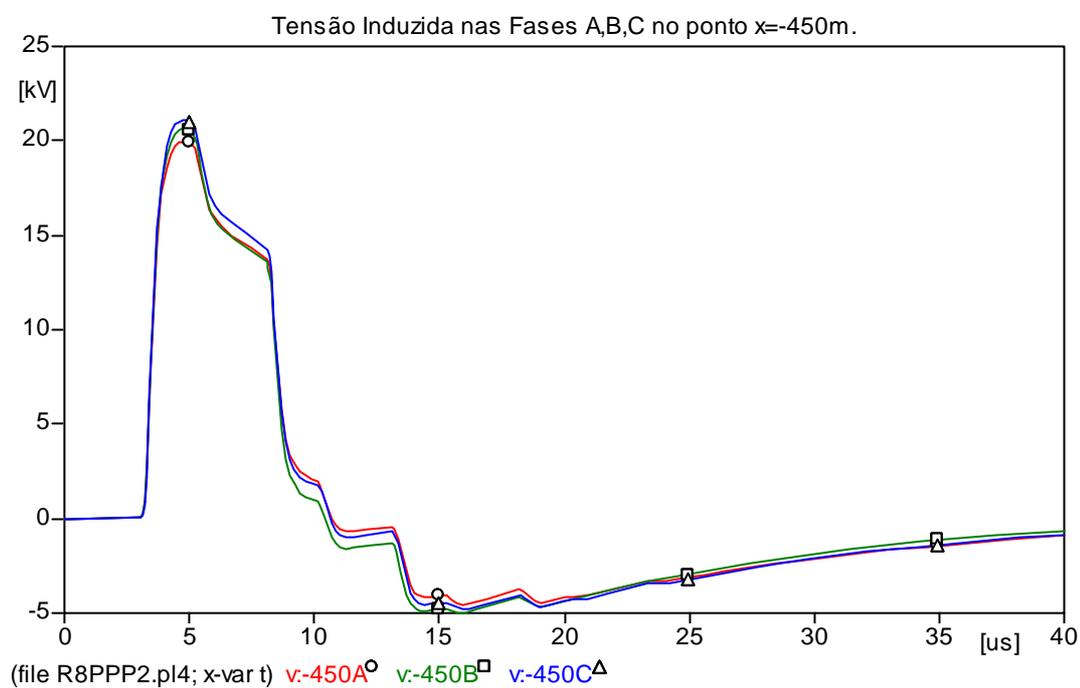


Figura 5.27 - Tensões induzidas nas fases A, B, C para um ponto  $x = -450m$ .

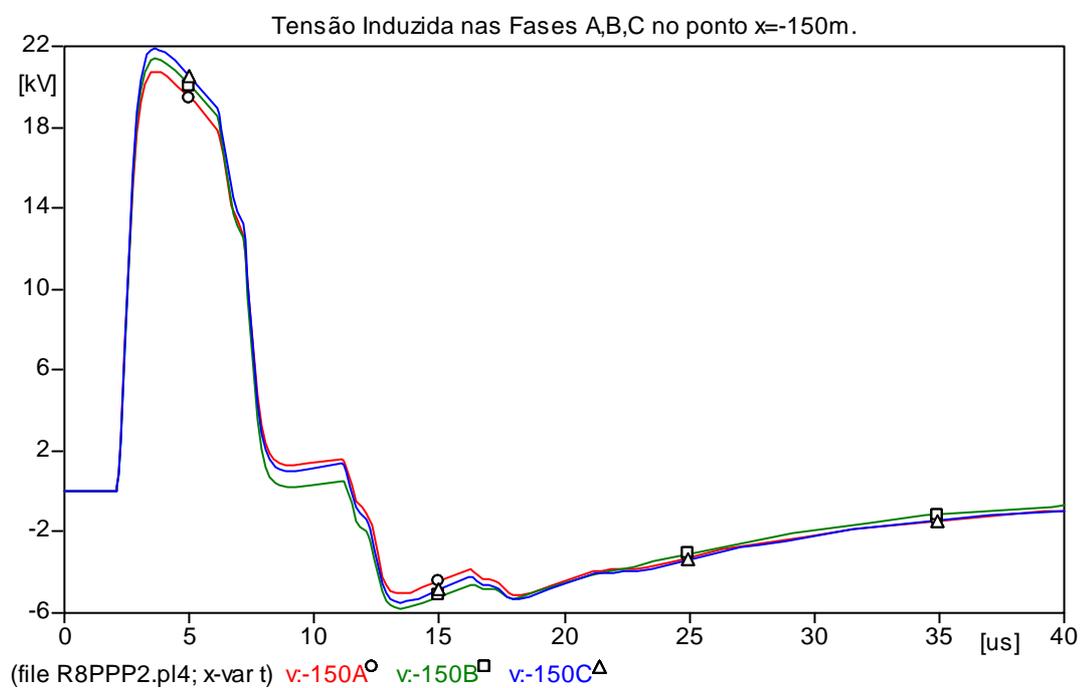
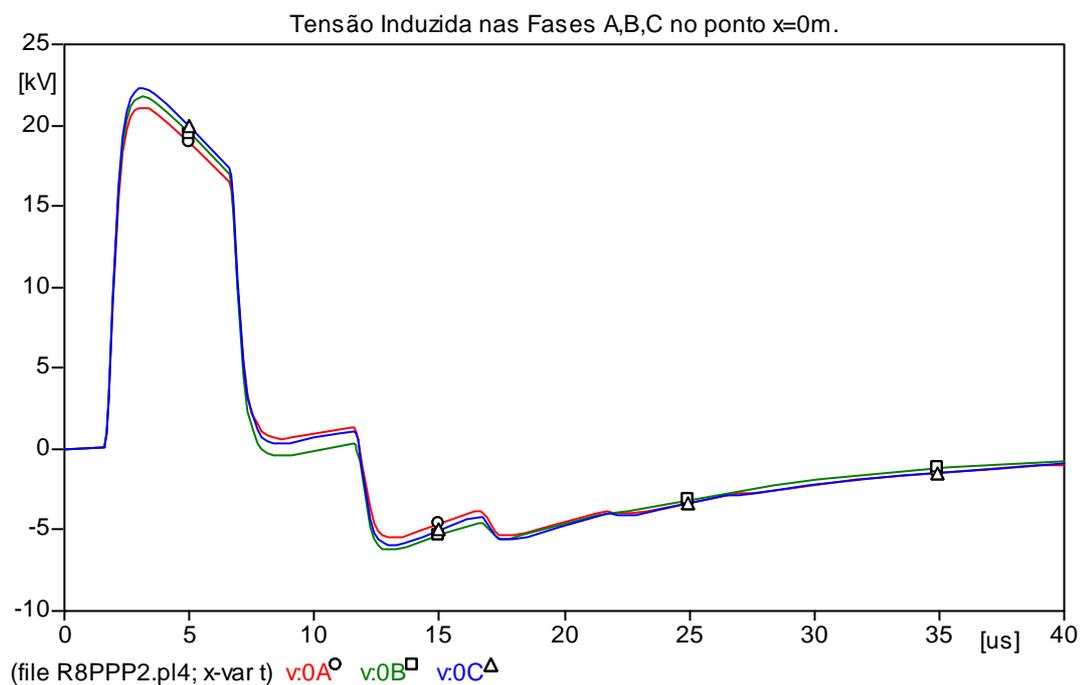


Figura 5.28 - Tensões induzidas nas fases A, B, C para um ponto  $x = -150m$ .



*Figura 5.29 - Tensões induzidas nas fases A, B, C para um ponto  $x = 0m$ .*

A Figura 5.30 mostra a forma de onda de sobretensão em um condutor nos diversos pontos da linha. Nesta Figura é possível notar com maior clareza a elevação do potencial na linha em relação a sistemas com maior número de pára-raios (Figuras 5.22 e 5.26). Neste caso há uma maior deficiência na dissipação de energia por parte dos pára-raios.

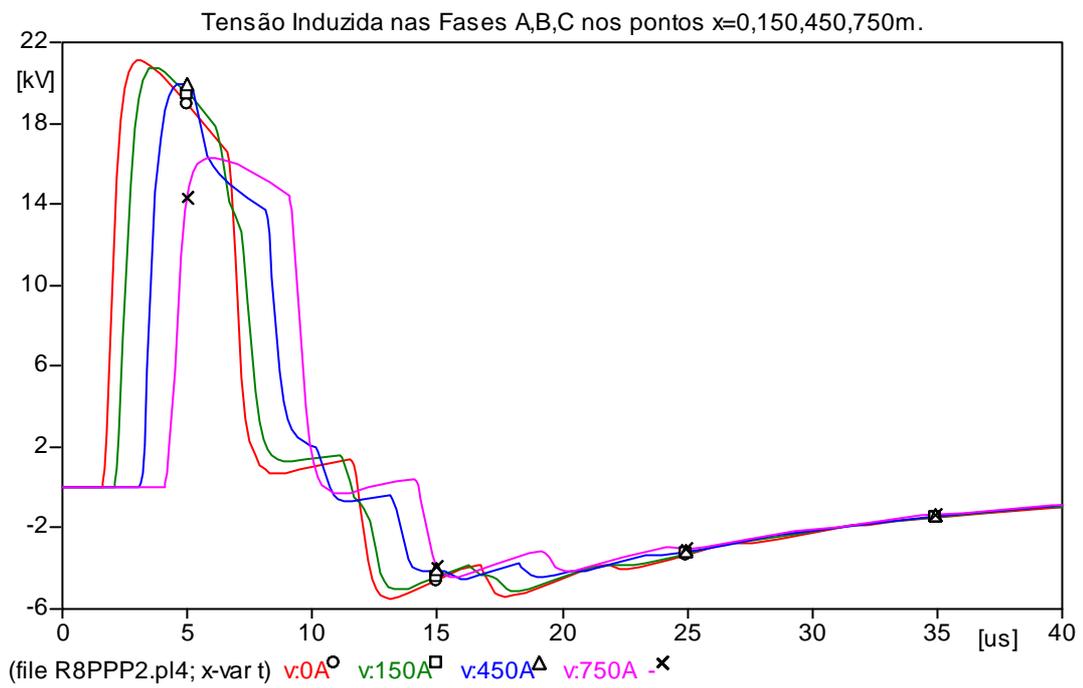


Figura 5.30 - Tensões induzidas nas fases A, B, C para um ponto  $x = 0, 150, 450, 750m$ .

## CAPÍTULO 6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento deste trabalho veio comprovar a importância do estudo das tensões induzidas em linhas de distribuição. A estimação (quantificação) e posterior análise dos dados obtidos por meio de simulações computacionais agiliza o processo de implantação de sistemas destinados à proteção da rede, bem como auxiliando o projeto de dimensionando da mesma.

Nas simulações apresentadas no capítulo 5 foi possível realizar-se um comparativo entre diversas configurações dos níveis de proteção de uma linha de distribuição. Tal comparativo proporciona a quantificação e o desempenho dessas linhas frente a uma descarga atmosférica próxima a seus condutores.

As tensões induzidas nas linhas simuladas decrescem com o aumento da distância entre seus condutores e a descarga (quantificada pela variável  $y$ ). Outro fator que ocasiona esta redução é a resistência do condutor elétrico utilizado na construção de tais linhas.

A redução da tensão induzida também pode ser implementada com o emprego de pára-raios. Estes últimos são responsáveis pela dissipação da energia gerada à terra. Desta forma, com o emprego dos pára-raios, consegue-se uma redução significativa no valor de pico da sobretensão induzida. Surge então, o problema do dimensionamento econômico destas proteções, visando uma boa proteção com um menor custo possível, logo as simulações comparativas tornam-se ferramentas indispensáveis para esta análise.

Um número elevado de pára-raios pode deixar o sistema financeiramente inviável, entretanto, um número reduzido pode ocasionar a vulnerabilidade do sistema frente às descargas atmosféricas. Dimensionar o número de pára-raios levando-se em conta as descargas indiretas (aquelas que ocorrem com maior frequência) pode contribuir para a otimização do sistema de proteção.

Nas simulações realizadas, observa-se que o emprego dos pára-raios é necessário para a redução das sobretensões. A topologia que obteve melhor desempenho na dissipação das tensões induzidas foi à colocação de pára-raios a cada 150m, porém, tal prática torna-se muito onerosa. Em vista disso, uma outra

topologia que obteve resultados muito bons foi à colocação de pára-raios a cada 300m. A topologia representada pelo circuito 4 da Tabela 5.2, cuja proteção somente vai existir nos extremos da linha e junto aos transformadores, mostrou-se uma opção mais econômica e capaz de reduzir aos níveis de tensão a padrões suportáveis aos dispositivos instalados na média tensão e propagados à baixa tensão.

Vale ressaltar que neste comparativo realizaram-se simulações somente em linhas de distribuição de 1.500m de comprimento, logo não pode-se estender estas conclusões a topologias diferentes (comprimento de linha, quantidade de pára-raios, altura, distância à descarga, etc), que deverão ser analisadas individualmente.

Os resultados apresentados mostram mais uma vez a importância do emprego dos pára-raios na proteção dos alimentadores de distribuição e a melhoria da qualidade de energia ofertada aos consumidores.

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados apresentados, permite-se vislumbrar algumas linhas de pesquisa como continuidade do que foi apresentado. Entre as linhas futuras de pesquisa, destacam-se:

Desenvolvimento de um sistema especialista capaz de calcular a contribuição de uma descarga em qualquer ponto da linha, definindo centenas de gráficos e por meio de algoritmos inteligentes ser capaz de interpolar dados e definir pontos ideais de posicionamento dos pára-raios, inclusive apresentando pontos vulneráveis que possam existir na planta englobando:

- Cálculo das tensões induzidas
- Particularidades da rede (topologias)
- Nível de proteção da linha (pára-raios)
- Densidade de descargas
- Interface Amigável

E ainda:

- Aplicação das técnicas até aqui desenvolvidas para a avaliação dos níveis de sobretensões em linhas de distribuições rurais.
- Estimção e análise do comportamento dos aterramentos frente aos vários níveis de tensões induzidas.
- Entre muitos outros trabalhos que se fundamentem neste para a sua realização.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ❖ AGRAWAL, A. K., PRICE, H. J. GURBAXARI, S. H. Transient Response of Multiconductor Transmission Lines Excited by a Nonuniform Electromagnetic Field. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. EMC-22, No. 2, pp. 119-129, May 1980.
- ❖ AGRAWAL, K., PRICE, H. J., GURBAXANI, S. H. Transient response of a multiconductor transmission line excited by a nonuniform electromagnetic field, IEEE Trans. on EMC, Vol. EMC-22, No. 2, 119-129, May 1980.
- ❖ ALUGARD II Station Arresters - Catalogue GEA 9139A - GE.
- ❖ ANDERSON, J. G. Lightning Performance of Transmission Lines. Transmission Line reference Book, 345kV and Above, Electric Power Research Institute, Ch. 12,1982.
- ❖ ANDERSON, J. G., SHORT, T. A. Algorithms for Calculation of Lightning Voltages on Distribution Lines. IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 8, No. 3, pp. 119- 129, May 1980.
- ❖ ANDRADE, D., et al. Cemig experience in ZnO arresters installation in transmission lines - Maintenance aspects, in XVI SNPTEE - Brazilian Conf. on Production and Transmission of Electric Energy. GSC/008, Campinas, Brazil, Oct.2001, pp. 1-6.
- ❖ ATP: Alternative Transients Program Rule Book: KU: Leuven, Leuven EMTP Center, 1987.
- ❖ ATPDRAW version 3, User Manual, TR A4389, EFI, Norway, 1996.
- ❖ ATP-EMTP Rule Book, Canadian-American EMTP Users Group, 1997
- ❖ BARROS, M. T. C. DE, SILVA, J. F. B. DA. A non-linear propagation algorithm for transmission lines. Proc. 8th PSCC, Helsinki, August 1984.

- ❖ BERGER, K. Novel Observations on Lightning Discharges: Results of Research on Mount San Salvatore. *J. Franklin Inst.*, No. 283, pp.478-525, 1967.
- ❖ BERGER, K. *The Earth Flash. Lightning*, Vol. 1, Academic Press, New York, 1977.
- ❖ BERGERON, L. *Du coup de belier en hydraulique qu coup de foudre en électricité* (in French). Paris, France, Dunod, 1949.
- ❖ BEWLEY, L.V. *Traveling Waves on Transmission Systems*, Dover Publications, New York, 1963.
- ❖ BOCCIPPIO, D. J., et al. Combined Satellite- and Surface-based Estimation of the Intracloud-Cloud-to-Ground Lightning Ratio Over the Continental United States. *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 129, pp. 108-122, 2001.
- ❖ BROOK, M. et al. Quantitative Study of Strokes and Continuing Currents in Lightning Discharges to Ground. *Journal of Geophysical Research*, No. 67, pp.649-659, 1962.
- ❖ CHERCHIGLIA, L. C., et al. Application of transmission line arresters in Cemig-Brasil. in *Cigré*, Paris, 1998, SC33/PS3.
- ❖ CHOWDHURI, P. Analysis of Lightning-Induced Voltages on Overhead Lines. *IEEE Trans. On Power Delivery* , Vol. PWRD-4, n° 9, pp.2502-2518, September 1984.
- ❖ CHOWDHURI, P. Estimation of Flashover Rates of Overhead Power Distribution Lines by Lightning Strokes to Nearby Ground. *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol. PWRD-04, n° 3, pp. 1982-1989, July 1989.
- ❖ CHOWDHURI, P. Lightning-Induced Voltages on Multiconductor Overhead Lines. *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol. PWRD-5, n° 2, pp. 658-667, 1990.

- ❖ CHOWDHURI, P. Parametric Effects on Induced Voltages Overhead Lines by Lightning Strokes to Nearby Ground. IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. PWRD-4, n° 2, pp. 1185-1194, April 1989.
- ❖ CHRISTIAN, H. J., et al. The Lightning Imaging Sensor. Proceedings of the 11th International Conference on Atmospheric Electricity, pp. 746-749, Guntersville, Alabama, June 1999.
- ❖ CIGRÉ Working Group 33.01. Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines; Outubro de 1991.
- ❖ CLFSC - Manual Técnico de Estruturas Aéreas, 2003
- ❖ COORAY, V. Lightning-Induced Overvoltages in Power Lines: A Comparison of Two Coupling Models. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol. 36, No.3, pp. 179-182, Aug. 1994.
- ❖ COORAY, V. Predicting the Spatial and Temporal Variation of the Electromagnetic Fields, Currents and Speeds of Subsequent Return Strokes. IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, Vol. 40, N. 4, November, 1998.
- ❖ CULMINS, K. L., MURPHY, M. L., A Combined TOA/MDF Technology Upgrade of the U.S. National Lightning Detection Network. Journal of Geophysical Research, Vol. 103, N. D8, pp. 9035-9044, April, 1998.
- ❖ DARVENIZA, M., Lightning Protection of Sub-Transmission and Distribution Systems. IV International Symposium on Lightning Protection (SIPDA), São Paulo, Brazil, 1997, pp. 263-300.
- ❖ DARVENIZA, M., POPOLANSKI, F., WHITEHEAD, E.R. Lightning Protection of Transmission Lines, Electra 41, 1975.
- ❖ DIENDORFER, G. Induced Voltages on Overhead Lines Due to Nearby Lightning, IEEE Trans on EMC, Vol. 32, No. 4, Nov, 1990, pp 292-299.

- ❖ DIENDORFER, G., SHULZ, W. Effects of Field Propagation on the Peak Current Estimates, Proceedings of International Lightning Detection Conference, Arizona, USA, pp. 17-18, November, 1998.
- ❖ DOMMEL, H. W. EMTP Theory Book, Second Edition. Microtran Power System Analysis Corporation, Vancouver, Canada, 1992.
- ❖ ERIKSSON, A. J., STRINGFELLOW, M. F., MEAL, D. V. Lightning Induced Overvoltages on Overhead Distribution Lines. IEEE Trans. Power App. Syst, Vol. PAS-101, Apr. 1982, pp 960-969.
- ❖ FIEUX, R. P., GARY, C. H. Research on Artificially Triggered Lightning in France. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-97, pp. 725-733, 1978.
- ❖ FIEUX, R. P., GARY, C. H. Research on Artificially Triggered Lightning Above Land. Nature, Vol. 257, 1975.
- ❖ FRANKLIN, B. Experiments and Observations on Electricity Made at Philadelphia. E. Cave, London, 1941.
- ❖ FURUKAWA, S., et al. Development and application of lightning arresters for transmission lines, IEEE Tran. Power Delivery, vol. 4, pp. 2121-2129, Oct. 1989.
- ❖ GELDENUYS, H. J. Insulation Co-ordination of Distribution Lines. Proceedings of the First International Conference on Power Distribution. Belo Horizonte. Brasil, November 11-14, 1990, Vol.2, sponsored by IEEE-ELETRÓBRÁS.
- ❖ GOLDE, R. H. Lightning Surges on Overhead Distribution lines Caused by Indirect and Direct Lightning Stroke, AIEE Trans., Vol. 61, pp. 916-930, 1942.
- ❖ GREENWOOD, Electrical Transients in Power Systems, New York:John Wiley & Sons, 1992.

- ❖ GUERRIERI, S. et al. Effet d'une impulsion électromagnétique sur des réseaux électriques à plusieurs branches. Modélisation et validation expérimentale. Proc. Of the 7ème Colloque Int. sur la CEM, pp. 475-480, Toulouse, March 1994.
- ❖ IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines, N. 1410, 1997.
- ❖ IEEE Standard for Performance of Low-Voltage Surge Protective Devices (Second Arresters), IEEE Std. C62.34-1996, Dec. 1996.
- ❖ IEEE Working Group on Lightning Performance of Distribution Lines, Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines, IEE Std 1410, 1997.
- ❖ KASTRUP, O. et al. Lightning performance assessments with line arresters, in Proc. IEEE Transmission and Distribution Conf. and Exposition, Los Angeles, CA, Sept. 1996, pp. 288-293.
- ❖ Lightning Arresters - General Information Catalogue 1\_13 80 E - ASEA - 1969.
- ❖ LUNDLHOLM, K. Induced Overvoltage Surges on Transmission Lines and their Bearing on Lightning Performance at Medium Voltage Networks, Trans. Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, n° 120, 1958.
- ❖ MASTER, M., UMAN, M. Lightning Induced Voltages on Power Lines: Theory. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No. 9, pp. 2502-2518, 1984.
- ❖ MASTER, M.J.; UMAN, M.A. Lightning Induced Voltages on Power Lines: Theory. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. Vol. 103, No. 9, pp.2502-2518, September 1984.

- ❖ MAZUR, V. Physical Processes During Development of Lightning Flashes. International Conference on Grounding and Earthling, Brazil, pp.79-84, 2002.
- ❖ MICROTRAN Power System Analysis Corporation. Transients Analysis Program Reference Manual, Vancouver, Canada, 1991.
- ❖ NEWMAN, M. M., et al. Triggered Lightning Strokes at Very Close Range. J. Geophys, Vol. 72, pp. 4761-4764, 1967.
- ❖ NUCCI, C. A. Lightning-Induced Voltages on Overhead Power Lines- Part II: Coupling models for the evaluation of the induced voltages. Electra, N. 162, October, 1995.
- ❖ NUCCI, C. A., et al. Coupling models for lightning-induced overvoltage calculations: a comparison and consolidation. 22nd Int. Conf. on Lightning protection, Budapest, 1994.
- ❖ NUCCI, C. A., et al. Lightning - Induced Voltages on Overhead Lines. IEEE Trans. On Eletromagnetic Compatibility, Vol. EMC-35, n° 1, pp. 75-86, Febrary 1993.
- ❖ NUCCI, C. A., et al. Lightning return-stroke models with channel-base specified current: a review and coparison. Journal of Geoph. Res., Vol. 95, No. D12, pp. 20395-20408, November 1990.
- ❖ NUCCI, C.A. et al. Comparison of Two Coupling Models for Lightning-Induced Overvoltages Calculations. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 1, pp. 330-9, Jan. 1995.
- ❖ Pára-Raios ASEA de Óxido de Zinco (ZnO) Tipo XAP - Manual de Aplicação – ASEA Elétrica Ltda, 1982.
- ❖ PAULINO, J. O. S., ARAÚJO, A. E. A., MIRANDA, G. C., Lightning Induced Voltage Calculation in Lossy Transmission Lines Using the EMTP. Proceedings of the International Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 695-700, vol.2, Rome, Italy, September 17-20, 1996.

- ❖ PAULINO, J. O. S., LOPES, I. J. S., BAVENTURA, W. C., PISSOLATO FILHO, J. Lightning Induced Overvoltages on Distribution Lines with Shield Wire. Proceedings of International Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 761-766, Vol.2, Rome, Italy. September 13-16, 1994.
- ❖ PHELPS, J. D. M. Selection of Surge Arresters: Tutorial Course on Surge Protection in Power Systems - IEEE - 1979.
- ❖ PINTO, I. R. C. A., PINTO Jr, O. Lightning Distribution in Brazil. J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2002.
- ❖ PORTELA, C. M. Sobretensões e Coordenação de Isolamento. Editora COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 1982.
- ❖ PORTO, E. W., PAULINO, J. O. S. Estudos de Proteção de Linhas de Distribuição contra Sobretensões Causadas por Descargas Atmosféricas. Proceedings of the First International Conference on Power Distribution. Belo Horizonte, Brasil, November 11-14, 1990, Vol. 2, sponsored by IEEE-ELETRÓBRÁS.
- ❖ RAKOV, V. Lightning Discharges Triggered Using Rocket and Wire Techniques. Recent Res. Devel. Geophysics, Vol. 2, pp 141-171, 1999.
- ❖ RAKOV, V., UMAN M. A., Review and Evaluation of Lightning Return Stroke Models Including Some Aspects of Their Application, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Vol 40, N. 4, November, 1998.
- ❖ ROSA, F. de la., Galván, A., Velázquez, R. Evaluation of surge arresters protection of electric power lines in Mexico. in Cigré Brazil Ce 33 Int., Workshop Line Surge Arresters and Lightning, 1996, pp. 3.1-8.
- ❖ RUSCK, S. Induced Lightning Over Voltages on Power-Transmission Lines with Special Reference to the Over-Voltage Protection of Low-Voltages Networks. Transactions of Royal Institute of Technology, Stockholm, No. 120, p 1-118, 1958.

- ❖ SAKSHAUG, E. C. Modern Arresters Characteristics and Tests: tutorial Course on Surge Protection in Power Systems. IEEE - 1979.
- ❖ SEKIOKA, S., YAMAMOTO, K., YOKOYAMA, K. Measurement of a concrete pole impedance with an impulse current source. in Proc. IPST Int. Conf. Power System Transients, Lisbon, Portugal, 1995, pp. 457-462.
- ❖ SHIH, H., et al. Application of special arresters on 138kV lines of Appalachian power company, IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-104, pp. 2857-2863, Oct. 1985.
- ❖ SILVA, I. N., MARCONDES, J., SOUZA, A. N., SANTOS, N. R. Uma Contribuição para o Estudo de Tensões Induzidas em Equipamentos e Linhas de Distribuição CITENEL, 2003.
- ❖ SILVEIRA, F. H., Application of a New Model for Evaluation of Lightning Induced Overvoltage (in Portuguese), M.Sc Dissertation, Supervisor: S. Visacro F., LRC/PPGEE - Federal University of Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil, July 2001.
- ❖ SILVEIRA, F. H., VISACRO S. F., MESQUITA C. R., Evaluation of the Influence of Lightning Channel and Return Current Characteristics on Induced Overvoltages, Proceedings of 26th International Conference on Lightning Protection (ICLP), Cracow, Poland, September 2002.
- ❖ SILVEIRA, F. H., VISACRO S. F., SOARES A. J., SCHROEDER M. A. O. Evaluation of Lightning-Induced Overvoltages for High Voltage Transmission Lines, VI International Symposium on Lightning Protection (SIPDA), Santos, Brazil, November 2001.
- ❖ SOARES, A. J. 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, Março de 2001.
- ❖ SOARES, A. J., SCHOROEDER, M. A. O., VISACRO, S. F., Prospective Evaluations about Electromagnetic Interaction Among Transmissions Line

- Tower, Cables and Grounding for Lightning Performance Study. Anais do GROUND' 2000 - International Conference on Grounding and Earthing, Belo Horizonte, Brasil, Junho de 2000.
- ❖ SOARES, A. J., VISACRO, S. F., CHERCHIGLIA, L. C. L., CARVALHO, A. M., Investigação de Configurações Otimizadas para o Aterramento das Torres do Sistema de Transmissão da CEMIG para Melhoria de Desempenho Frente a Descargas Atmosféricas; Anais do XIV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE), pp. FL/GSI/18, Belém, Brasil, Outubro de 1997.
  - ❖ STEIN, B., BARROS, M. T. C. A line model for the calculation of lightning induced voltage. Proc 9th PSCC, Cascais, Portugal, August 1984.
  - ❖ Surge Protective Devices Connected to Low-Voltage Power Distribution Systems. Part 1: Performance Requirements and Testing Methods, IEC Std. 61 643-1, 1998.
  - ❖ TRANQUELL Station Surge Arresters – Application Guide - General Electric Co, 1970.
  - ❖ UMAN, M. A. Lightning Return Stroke Electric and Magnetic Fields. Journal of Geophy. Res. Vol. 90, No. D4, pp 6121-6130, June, 1985.
  - ❖ UMAN, M. A., KRIDER, E. P. Natural and Artificially Initiated Lightning. The American Association for Advancement of Science, 1989.
  - ❖ VISACRO S. F., PORTELA, C. Modeling of Earthing Systems for Lightning Protection Applications, Including Propagation Effects; Anais do XXI ICLP (International Conference on Lightning Protection), Berlin, Alemanha, Setembro de 1992.
  - ❖ VISACRO, S. F., et al, An Iterative Computational Code for Simulation of Transient Behavior of Electric System Components for Lightning Currents. Proceedings of 26th International Conference on Lightning Protection (ICLP), Cracow, Poland, September 2002.

- 
- ❖ VISACRO, S. F., PORTELA C. M., Modelagem de Aterramentos Elétricos para Fenômenos Rápidos; Revista Eletroevolução: Sistema de Potência, Ed. CIGRE - Brasil, No. 3, pp. 47-54, Junho de 1995.
  - ❖ WAGNER, C., MACCANN, G. Induced Voltages on Transmission Lines. AIEE Trans., Vol. 61, pp. 916-930, 1942
  - ❖ WILLIAMS, P., BROOK, M. Magnetic Measurement of Thunderstorm Currents, pt. 1, Continuing Currents in Lightning. Journal of Geophysical Research, pp. 3234-3247, 1963.
  - ❖ YOKOHAMA, S. A Simultaneous Measurement of Lightning Induced Voltages with Associated Strokes Currents, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. 102, N. 8, pp. 2420-2427, August, 1983.