



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**SOBRETENSÕES DE ORIGEM ATMOSFÉRICA EM LINHAS DE
MÉDIA TENSÃO**

MARCO AURÉLIO MOREIRA SARAN

ITAJUBÁ – MINAS GERAIS

2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MARCO AURÉLIO MOREIRA SARAN

**SOBRETENSÕES DE ORIGEM ATMOSFÉRICA EM LINHAS DE
MÉDIA TENSÃO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Área de concentração:

Sistemas Elétricos de Potência

Orientador:

Prof. Dr. Manuel Luiz Barreira Martinez

ITAJUBÁ – MINAS GERAIS

FEVEREIRO DE 2009

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –
Bibliotecária Margareth Ribeiro- CRB_6/1700

S243s

Saran, Marco Aurélio Moreira

Sobretensões de origem atmosférica em linhas de média tensão /
Marco Aurélio Moreira Saran. -- Itajubá, (MG) : [s.n.], 2009.
116 p. : il.

Orientador: Prof. Dr. Manuel Luiz Barreira Martinez.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Sobretensão. 2. Surto. 3. Descarga atmosférica. 4. Distribuição
5. Média tensão. 6. Linhas aéreas. 7. Coordenação de isolamento. 8.
LIOV. I. Martinez, Manuel Luiz Barreira, orient. II. Universidade
Federal de Itajubá. III. Título.

CDU 621.3.016.34(043)

Aos meus pais, Antonio Luiz e Maria Luiza por todo o amor, dedicação, sacrifício, ensinamentos, apoio e exemplos em toda a trajetória de minha vida.

Aos meus irmãos, Rejane Maria, Luis Eduardo e Graciele por todo amor, carinho, apoio e paciência ao longo de todos estes anos.

A Deus, pois sem ele nada teria sido possível.

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Manuel Luiz Barreira Martinez por todos os ensinamentos, oportunidades, dedicação, paciência e orientação. Que, sempre fazendo muito mais que o necessário, se tornou para todos do LAT-EFEI não simplesmente um professor, mas um amigo e por vezes até um segundo pai.

A todos os colegas e amigos do Laboratório de Alta Tensão, LAT-EFEI, pelo apoio, companheirismo e colaboração inestimáveis.

Aos companheiros de república e a todos que lá tiveram como segunda casa, pela amizade e por terem compartilhado desta parte de minha vida.

A todos os familiares e amigos que, mesmo que longe, sempre apoiaram e ajudaram enormemente.

Aos grandes amigos de Itajubá: Juliana Rodrigues Pereira da Silva, Vitor Bataglia, Gustavo de Fáveri, William Oda de Moraes, Ricardo Mion do Nascimento, Mauro Tetsuo Yanase Jr., pela sua inestimável e imensurável amizade e por terem tornado toda a jornada de graduação e mestrado muito mais fácil e divertida.

Aos insubstituíveis amigos de Campinas: Fábio Minawa (*in memoriam*), Felício Chueiri Neto, Bauer Capelosi Jr., Alexsander Saciloto Capelosi, Samuel Salvi Vicentini, Antônio Aurélio Euzébio Jr., Maurício Mizuno para os quais devo muito.

Aos colegas de graduação, mestrado e laboratório: Ricardo Guedes de Oliveira Jr. e Isaac Gonçalves Campos Jr. pela amizade, ajuda e apoio sem os quais a batalha teria sido muito penosa.

Aos colegas de apartamento e grandes amigos Diego Lopes Coriolano e Thiago Torres Dias por todo companheirismo, apoio, amizade e ajuda neste final de batalha.

Aos Eng. M.Sc. e amigos do LAT-EFEI: Otávio Vicentini, Credson de Salles, Pedro Henrique Mendonça dos Santos e Alessandra de Freitas Picanço. Ao técnico João Cândido Corrêa por sempre ser prestativo e por toda a indispensável ajuda no LAT-EFEI. Ao Prof. Dr. Estácio Tavares Wanderley Neto pelo apoio, ajuda e paciência.

Um especial agradecimento ao Eng. M.Sc. Airton Violin pelas oportunidades, apoio e paciência durante o estágio e desenvolvimento dos projetos de pesquisa e desenvolvimento.

Ao Prof. Dr. Edson Guedes da Costa pelo empenho para trazer de volta o Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos e pelo apoio e agradável companhia no XV ISH em Ljubljana na Eslovênia.

Ao Eng. M.Sc. Herivelto de Souza Bronzeado pela divertida companhia, inestimável ajuda e apoio no simpósio TPLEPS em Zagreb na Croácia e pelo grande apoio no XII ERIAC em Foz do Iguaçu, Paraná.

Aos não menos importantes: Diego Ribeiro Pires, Bruno Bonini, Renan de Favéri, Eng. M.Sc. Anderson Rodrigo de Queiroz, Eng. Fábio Feletto, Eng. M.Sc. Jorge Luiz de Franco e a todos que, mesmo não citados, colaboraram direta ou indiretamente para a conclusão deste trabalho.

Obrigado a todos pela amizade tão valiosa e ajuda imprescindível.

*“Há três métodos para ganhar sabedoria:
primeiro, por reflexão, que é o mais nobre;
segundo, por imitação, que é o mais fácil;
e terceiro, por experiência, que é o mais amargo”*
Confúcio

“Labor improbus omnia vincit”

Resumo

As linhas de distribuição em média tensão devem ser projetadas para fornecer energia elétrica dentro de padrões de qualidade, confiabilidade e continuidade. No entanto, estão expostas a condições adversas e imprevisíveis que podem levar a situações de falha, sendo as descargas atmosféricas uma das principais causas, o que resulta em grandes prejuízos às empresas e à sociedade. Logo, o estudo das causas e efeitos das descargas atmosféricas pode ser considerado um item essencial.

A análise do desempenho dos sistemas de média tensão frente às descargas atmosféricas é muito dependente da sua modelagem. Quanto mais o modelo se aproxima da realidade mais ele se torna demasiadamente dispendioso e complexo, o que, geralmente, resulta na adoção de algumas simplificações e aproximações. Através da utilização de modelos mais precisos, simulações através de processos estocásticos, simulações de transitórios eletromagnéticos, utilização de dados reais das redes e análises estatísticas, o presente trabalho visa a estudar a ampla gama de efeitos das descargas atmosféricas, seus impactos e fatores preponderantes para análise em diferentes sistemas reais. Assim busca-se um equilíbrio entre a aproximação dos modelos e os erros dos resultados.

Com este estudo, é possível estabelecer os principais pontos de intervenção para a melhoria do desempenho dos sistemas de distribuição em média tensão frente às descargas atmosféricas.

Palavras-chave: sobretensão, surto, descarga atmosférica, distribuição, média tensão, linhas aéreas, alta tensão, coordenação de isolamento, Método de Monte Carlo, Código LIOV

“LIGHTNING OVERVOLTAGE’S IN MEDIUM VOLTAGE LINES”

Abstract

The medium voltage distribution lines must be projected to supply electric energy within the quality, reliability and continuity standards. However, they are exposed to adverse and unexpected conditions that can lead to failures, being the lightning discharges one of the main causes, consequently, resulting in major losses for the companies and society. Therefore, the lightning discharges causes and effects studies should be considered essential.

The medium voltage systems performance analysis front lightning discharges is very dependent on its modelling. As the model approaches the reality, more it becomes extremely complex and time expensive, as a result, it generally leads to the adoption of some sort of simplifications and approximations. The present work aims at the study of large variety of effects of the lightning discharges, its impacts and preponderant factors analysis in different real systems, as far as searching for a balance between the models approximation and the resultant errors. With the use of models that are more precise, stochastic process simulations, electromagnetic transients simulations, real information from the networks and statistical analysis.

With this study, it is possible to establish the main intervention points for the improvement of the medium voltage distribution systems performance front lightning discharges.

Keywords: overvoltage, surge, lightning, distribution network, high voltage, medium voltage, overhead lines, insulation coordination, Monte Carlo Method, LIOV Code

Sumário

Nomenclaturas e Simbologias.....	III
Lista de Figuras	VI
Lista de Tabelas	VIII
Capítulo I.....	1
1.1. Introdução.....	1
1.2. Objetivo	3
1.3. Estrutura.....	3
Capítulo II	5
2.1. Descarga Atmosférica.....	5
2.1.1. Pequeno Histórico.....	5
2.1.2. Resumo dos Mecanismos de Formação	6
2.1.3. Disrupção Atmosférica: Raio	7
2.2. Modelos para as Correntes de Retorno.....	10
2.2.1. Definições e Tipos	10
2.2.2. Modelo de Linha de Transmissão, MTL.....	12
2.2.3. MTLE: Uma Modificação do MTL	13
2.3. Aspectos Estatísticos das Descargas Atmosféricas	14
2.4. Parâmetros Utilizados nos Modelos para Simulação	19
2.5. Referências	19
Capítulo III.....	20
3.1. Fundamentos e Equacionamento	20
3.1.1. Descargas Diretas e Induzidas – Modelo Eletrogeométrico.....	20
3.1.2. Sobretensões nas Linhas – Equacionamento Geral.....	24
3.2. Modelos para Sobretensões Devido a Descargas Diretas.....	30
3.2.1. Distância Crítica.....	30
3.2.2. Modelo de Ondas Viajantes	32
3.2.3. Suportabilidade dos Isoladores	35
3.2.4. Critério das Áreas Iguais – Efeito Destrutivo	38
3.3. Modelos para Sobretensões Frente Descargas Induzidas.....	42
3.3.1. O Modelo de Rusck	42
3.3.2. O Modelo LIOV para Solos Perfeitamente Condutores.....	43
3.3.3. O Modelo LIOV – EFEI para Solos Perfeitamente Condutores	44
3.3.4. Suportabilidade dos Isoladores - Impulsos Induzidos.....	47

3.4. Modelos Estatísticos de Monte Carlo	47
3.5. Referências	48
Capítulo IV	51
4.1. Modelagem dos Sistemas de Média Tensão	51
4.1.1. Banco de Dados e Desenho Automático das Redes de Média Tensão.....	52
4.1.2. Modelagem Monofásica e os Surtos Incidentes às Redes de Média Tensão.....	55
4.2. Simulações de Desempenho	57
4.2.1. Análise e Comparação dos Resultados	59
4.3. Interface com Programa de Transitórios Eletromagnéticos para Detalhamento dos Surtos Incidentes.....	68
4.3.1. Programa de Simulações de Transitórios Eletromagnéticos - ATP (<i>Alternative Transient Program</i>).....	68
4.3.2. Parâmetros e Modelos para Simulação	70
4.3.3. Definições para as Simulações em Conjunto com o ATP.....	77
4.3.4. Resultados das Simulações em Conjunto com o ATP	78
4.4. Referências	87
Capítulo V	89
5.1. Conclusão	89
5.2. Recomendações de Práticas para as Concessionárias de Energia	94
5.3. Recomendações para Trabalhos Futuros	95
5.4. Artigos	95
5.5. Bibliografia Geral	97

Nomenclaturas e Simbologias

A	ampère: unidade de medição de intensidade de corrente elétrica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AES Sul	AES Sul Distribuidora Gaúcha de Energia S.A.
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI	<i>American National Standard Institute</i>
atm	Atmosfera: unidade de medida de pressão
ATP	<i>Alternative Transient Program</i>
BPA	<i>Bonneville Power Administration</i>
C	Capacitância ou coulomb: unidade de medição de carga elétrica
CFO	<i>Critical Flashover Overvoltage</i>
CIGRÉ	<i>Conseil International des Grands Réseaux Électriques</i>
<i>cte</i>	Constante
<i>d</i>	Distância
DA	Distância de Atração ou Descarga Atmosférica
<i>e</i>	Número de Euler
EFEI	Universidade Federal de Itajubá (antiga Escola Federal de Engenharia de Itajubá)
EGM	<i>Electro Geometrical Model</i>
EMTP	<i>Electromagnetic Transient Program</i>
EPRI	<i>Electric Power Research Institute</i>
F	faraday: unidade de medição de capacitância
FDTD	<i>Finite Difference Time Domain</i>
GIS	<i>Geographic Information System</i>
h	Altura
H	henry: unidade de medição de indutância
<i>i</i>	Intensidade de corrente elétrica

IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
K	kelvin: unidade de medição de temperatura
kA	Quiloampère = 1.000 A
km	Quilômetro
km²	Quilômetro quadrado
kV	Quilovolt = 1.000 V
kV/m	Quilovolt por metro
kV/mm	Quilovolt por milímetro
L	Indutância
LAT	Laboratório de Alta Tensão
LAT- EFEI	Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá
LEC	<i>Leuven EMTP Center</i>
LEMP	<i>Lightning Electro Magnetic Pulse</i>
LIOV	<i>Lightning Induced Over-Voltage</i>
ln	Logaritmo natural
m	Metro: unidade de medição de comprimento
m/s	Metro por segundo
mm	milímetro, milésimo de milímetro
ms	milissegundo, milésimo de segundo
MTL	Modelo de Linha de Transmissão
MTLE	MTL modificado com função de atenuação exponencial negativa
MTLL	MTL modificado com função de atenuação linear
MV	Megavolt = 1.000.000 V
NBI	Nível Básico de Isolamento

NBR	Norma Brasileira
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology</i>
PCA	Programa de cálculo da Confiabilidade de Alimentadores de distribuição
pF	Picofaraday, trilionésimo de faraday = 10^{-12} F
r	Raio
RINDAT	Rede Integrada Nacional de detecção de Descargas Atmosféricas
RLC	Circuito composto por uma resistência, uma indutância e uma capacitância
SEP	Sistemas Elétricos de Potência
SiC	Carboneto de silício
SQL	<i>Structured Query Language</i>
Std.	<i>Standard</i>
TL	Linha de transmissão (<i>Transmission Line</i>)
U	Tensão elétrica (diferença de potencial)
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá
v	Velocidade
V	volt: unidade de medição de tensão elétrica
Y	Admitância
Z	Impedância
ZnO	Óxido de zinco
σ	Condutividade
μ	Micro ou Permeabilidade
μs	Microsegundo, milionésimo de segundo
Ω	ohm: unidade de medição de resistência elétrica
ϵ	Permissividade

Lista de Figuras

Capítulo II

Figura 2.1 – Diagrama do processo de descarga	8
Figura 2.2 – Ilustração dos diferentes tipos de descargas.....	10
Figura 2.3 – Corrente versus altura z' acima do solo e um instante de tempo arbitrário $t=t_l$ para o modelos TL.....	13
Figura 2.4 – Mapa isoceráunico do Brasil.....	15
Figura 2.5 – Composição para o número de descargas ao solo de 1998 a 2001, elaborado pelo INPE	15
Figura 2.6 – Descrição dos parâmetros da descarga atmosférica	18

Capítulo III

Figura 3.1 – Ilustração da semi-esfera rolante.....	23
Figura 3.2 – Distâncias críticas de atração para diferentes casos.....	23
Figura 3.3 – Geometria do Acoplamento Eletromagnético da Linha Monofásica em Solo Perfeitamente Condutor.....	27
Figura 3.4 – Circuito Equivalente do modelo de Agrawal et al.	28
Figura 3.5 – Distância Crítica entre Linha e Solo para a Descarga Atmosférica	31
Figura 3.6 – Curva de Distância Crítica para Determinar Impactos Diretos à Linha.....	32
Figura 3.7 – Ilustração das Ondas Viajantes dos Surtos de Tensão e Corrente após Impacto de Descarga Atmosférica Direta.....	33
Figura 3.8 – Forma de Onda de um Impulso de Tensão, Conforme NBR 6936	37
Figura 3.9 – Formas de Onda dos Impulsos Atmosféricos: Íngreme, Cortado e Pleno .	38
Figura 3.10 – Exemplo de Curva Tensão-Tempo Evidenciando as Áreas Formativas Iguais	40
Figura 3.11- Comparativo entre uma Medição Experimental em Campo e o Resultado Calculado pelo Código LIOV-EMTP	44

Capítulo IV

Figura 4.1 – Exemplo de topologia de um circuito real de distribuição em média-tensão urbano	55
Figura 4.2 - Histograma das Intensidades de Corrente de Descarga Atmosférica	58
Figura 4.3 - Topologia da Rede Urbana de Distribuição em Média Tensão.....	60
Figura 4.4 - Topologia da Rede Rural de Distribuição em Média Tensão.....	61
Figura 4.5 - Topologia da Rede Urbana Simulando Estruturas Elevadas	61
Figura 4.6 - Histograma das Intensidades de Correntes de Descarga Atmosférica de Intercepção Direta.....	62

Figura 4.7 - Histograma das Sobretensões Induzidas na Rede Rural por Descargas Atmosféricas.....	63
Figura 4.8 - Histograma das Intensidades de Corrente de Descarga Atmosférica de Interceptação Direta à Rede Urbana.....	64
Figura 4.9 - Histograma das Sobretensões Induzidas à Rede Urbana por Descargas Atmosféricas.....	64
Figura 4.10 - Histograma das Intensidades de Corrente de Descargas com Interceptação Direta à Rede.....	67
Figura 4.11 - Histograma das Sobretensões Induzidas à Rede Urbana com Estruturas Elevadas.....	68
Figura 4.12 – Fonte de Tensão Equivalente para Injeção de Surto.....	71
Figura 4.13 – Forma de Onda da Fonte Dupla-Rampa, Tipo 13.....	71
Figura 4.14 – Modelo de Parâmetros R-L-C Concentrados.....	72
Figura 4.15 – Característica Não-Linear Tensão x Corrente para os Pára-Raios de Média Tensão.....	74
Figura 4.16 – Modelo para transformadores sugerido pelo CIGRÉ.....	75
Figura 4.17 – Modelo de Transformador por Circuito π -Capacitivo.....	75
Figura 4.18 – Gráfico da função $p(1-p)$ para $0 \leq p \leq 1$	78
Figura 4.19 – Comparativo das Probabilidades de Ocorrência de Corrente nos Pára-Raios.....	82
Figura 4.20 – Característica Não-Linear Tensão x Corrente para os Pára-Raios de Média Tensão a Carboneto de Silício.....	83
Figura 4.21 – Comparativo das Probabilidades de Ocorrência de Corrente nos Pára-Raios com o uso de Pára-Raios a Carboneto de Silício.....	87

Capítulo V

Figura 5.1 – Comparativo das Probabilidades de Ocorrência de Corrente nos Pára-Raios.....	93
---	----

Lista de Tabelas

Capítulo II

Tabela 2.1 – Modelos tipo linha de transmissão para $t \geq z^2/vf$ 14

Tabela 2.2 – Compilação de parâmetros estatísticos levantados pelo CIGRÉ..... 18

Capítulo III

Tabela 3.1 – Níveis de Isolamento Normalizado e Respectivos NBI 37

Capítulo IV

Tabela 4.1 – Exemplo de código de consulta SQL 53

Tabela 4.2 - Exemplo de cálculo para as simulações de sobretensões em um circuito trifásico 56

Tabela 4.3 – Resultados para os Casos de Sobretensão Gerada por Indução Eletromagnética 80

Tabela 4.4 – Resultados para os Casos de Sobretensão Gerada por Impacto Direto 81

Tabela 4.5 – Resumo das Probabilidades de Queima de Equipamento e Abertura de Arco 82

Tabela 4.6 – Resumo das Probabilidades de Queima de Equipamento e Abertura de Arco com o uso de Pára-Raios a Carboneto de Silício 84

Tabela 4.7 – Resultados para os Casos de Sobretensão Gerada por Indução Eletromagnética com o uso de Pára-Raios a Carboneto de Silício 85

Tabela 4.8 – Resultados para os Casos de Sobretensão Gerada por Impacto Direto com o uso de Pára-Raios a Carboneto de Silício 86

Capítulo V

Tabela 5.1 – Resumo do Desempenho dos Sistemas Elétricos para as Descargas Atmosféricas 91

Tabela 5.2 – Resumo dos Resultados das Simulações de Transitórios Eletromagnéticos 92

Tabela 5.3 – Resumo das Probabilidades de Falha de Equipamento e Abertura de Arco 92

Capítulo I

*“Uma educação superior deveria preparar-nos para produzir três coisas:
um amigo, uma idéia e uma personalidade.”*
Thomas Ehrlich

1.1. Introdução

Os sistemas elétricos de potência (SEP) englobam a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, sendo projetados para fornecê-la dentro de padrões de qualidade, confiabilidade e continuidade. No entanto, estão expostos a condições adversas e imprevisíveis que podem levar o sistema a situações de falha ou má operação.

A coordenação de isolamento é um conjunto de técnicas e estudos que buscam o projeto dos SEP para condições de isolamento adequadas às sobretensões esperadas, levando-se em conta a característica de possíveis equipamentos protetores.

Contudo, seria extremamente dispendioso economicamente projetar sistemas que suportem todas as sobretensões possíveis. Desta forma, a escolha do isolamento deve ser realizada de forma que minimize o custo e se obtenha um desempenho satisfatório, com uma determinada probabilidade de falha que é expressa como um risco de falha aceitável. O progresso dos computadores tem auxiliado nesta tarefa, permitindo aos engenheiros o refinamento dos cálculos de sobretensões, através de programas de simulações de transitórios eletromagnéticos e de procedimentos de análise estatística.

As descargas atmosféricas estão entre as principais causas de distúrbios, provocando sobretensões e ocasionando uma parcela significativa das interrupções e danos, muitas vezes permanentes, nos sistemas elétricos. Tais situações podem resultar em grandes prejuízos às empresas do setor e à sociedade.

As descargas podem injetar surtos nos sistemas elétricos basicamente por duas maneiras: por indução, através do acoplamento dos campos eletromagnéticos com os condutores; ou impacto direto nos condutores.

Para os sistemas de distribuição de energia elétrica, as descargas possuem grande impacto devido à configuração predominantemente aérea das linhas e sua grande extensão. Assume-se que cerca de um terço dos desligamentos sejam causados por descargas atmosféricas. No Brasil, pela localização entre os trópicos, temos uma das maiores incidências de raios do mundo, estima-se que podem chegar à ordem de 70 milhões de raios atingindo o solo a cada ano, o que pode levar a prejuízos da ordem de R\$ 500 milhões.

Esse é um dos motivos pelos quais os efeitos das descargas atmosféricas nos SEP vêm sendo pesquisadas há vários anos, contudo ainda existem sérias divergências nas teorias sobre os fenômenos, não havendo um consenso entre os especialistas mundiais e que tem motivado o desenvolvimento de inúmeros estudos experimentais. No Brasil podem-se citar os desenvolvidos no Morro do Cachimbo pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e os desenvolvidos pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), além do desenvolvimento da Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas (RINDAT).

Com a privatização das concessionárias, resultando em flexibilização e regulamentação dessas, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), órgão regulador do governo, vem exigindo que as mesmas busquem cada vez mais melhorar seus padrões de qualidade, confiabilidade e continuidade no fornecimento de energia elétrica. Os consumidores também estão mais exigentes, de modo que para atender os anseios desse ascendente mercado faz-se necessário um aumento nos investimentos em pesquisas e desenvolvimentos de novas técnicas e tecnologias visando melhorar o fornecimento de energia.

Logo, o estudo dos efeitos das descargas atmosféricas nos sistemas elétricos de potência pode ser considerado um item essencial.

1.2. Objetivo

O objetivo desta dissertação é estudar a ampla gama de efeitos das descargas atmosféricas a sistemas reais de distribuição de energia elétrica, seus impactos e fatores preponderantes para análise em diferentes sistemas reais.

E, com isto, estabelecer os principais pontos de intervenção para a melhoria do desempenho dos sistemas de distribuição em média tensão frente às descargas atmosféricas, em razão da análise dos impactos e respostas dos equipamentos instalados na rede, como transformadores, isoladores e pára-raios.

Para esta finalidade, toda uma metodologia de análise e simulação será desenvolvida, gerando um procedimento válido para inferir o comportamento do sistema e dos equipamentos instalados na ocasião de um surto atmosférico.

O desenvolvimento desta metodologia envolve desde a elaboração de um programa computacional para o tratamento, exibição e utilização das informações de bancos de dados geoposicionais do sistema, assim como simulação e análise estocástica, probabilística e estatística da ocorrência e geração de surtos causados por descargas atmosféricas.

Logo, finalizando com o desenvolvimento de um módulo de interface com um programa para simulações de transitórios eletromagnéticos, onde toda a dinâmica da distribuição e dissipação do surto no sistema serão detalhadas e analisadas, assim como o impacto e as respostas dos equipamentos e elementos que o constituem.

1.3. Estrutura

O capítulo II tratará das descargas atmosféricas, onde será apresentado um resumo dos mecanismos de formação, princípio da disrupção atmosférica, modelos utilizados para tratar os efeitos físicos principais e os aspectos estatísticos das descargas.

No capítulo III serão abordados os aspectos teóricos para a análise do impacto das descargas nos sistemas elétricos, onde serão abordados os modelos de interceptação, geração de sobretensões, modelos para os surtos nas linhas, aspectos de coordenação de isolamento, indução eletromagnética e princípios estatísticos utilizados.

O capítulo IV apresentará como foi abordado o modelamento dos sistemas de média tensão, simulações de desempenho frente às descargas atmosféricas, interface com o programa de simulação de transitórios eletromagnéticos e os seus resultados.

Já no capítulo V serão apresentadas as conclusões e proposições de estudos posteriores.

Capítulo II

“A imaginação é mais importante que a ciência, porque a ciência é limitada, ao passo que a imaginação abrange o mundo inteiro.”
Albert Einstein

2.1. Descarga Atmosférica

2.1.1. Pequeno Histórico

As descargas atmosféricas sempre existiram na Terra, tendo sido mais violentas e numerosas durante a sua evolução até o resfriamento global. Após este, as tempestades se estabilizaram, tornando as descargas atmosféricas mais brandas até entrar em um equilíbrio natural.

Possuem papel fundamental na evolução do planeta e, principalmente, no desenvolvimento da vida na Terra. Pois, através da energia dissipada pelas descargas, numerosos processos químicos se desenvolveram, dando origem a diversos compostos que colaboraram enormemente para o surgimento das primeiras formas de vida.

Para os seres humanos, por causa dos seus efeitos, sempre foram temidas, observadas e associadas a forças sobrenaturais, estando também intimamente ligadas à descoberta e início da utilização do fogo.

No desenvolvimento das civilizações sempre estiveram associadas a deuses e divindades. Datam do ano 2000 a.C. os primeiros registros relativos às descargas atmosféricas, encontrados na Mesopotâmia. Sendo abundantemente encontrados relatos na literatura grega, a qual associa os raios ao deus Zeus, assim como a romana associa ao deus Júpiter, a chinesa às divindades Tien Mu e Lien Tsu, na egípcia pelo deus Typhon, também estando presentes em inúmeras outras culturas em todos os continentes.

Por causa das descargas, muitas construções foram danificadas, destruídas ou abandonadas, pois se admitia que o local tivesse sido amaldiçoado. Por exemplo: o campanário da igreja de São Marcos em Veneza foi danificado ou destruído nove vezes entre 1388 e 1762. Um dos piores acidentes associados às descargas atmosféricas foi o ocorrido em Bréscia, Itália, em 1769 onde a Igreja de São Nazário, a qual armazenava 100 toneladas de pólvora, foi atingida por uma descarga que ocasionou a explosão da pólvora. Com isso um sexto da cidade foi destruída, causando a morte de mais de 3.000 pessoas.

Contudo muitas construções históricas nunca foram seriamente danificadas por descargas atmosféricas, algumas com mais de mil anos, aparentemente por possuírem um equivalente a um sistema de pára-raios, com a presença de metais na cobertura e paredes.

Somente no século XVIII as descargas atmosféricas começaram a ser associadas a fenômenos elétricos, datando de 1708 as primeiras tentativas de relacionar as descargas atmosféricas com cargas elétricas. Benjamin Franklin fazendo experimentos com capacitores sugeriu que os raios poderiam possuir características elétricas. Com base nessa sugestão o pesquisador francês Thomas François D’Alibard realizou em 1752, um mês antes do experimento de Franklin com a pipa, pesquisas utilizando uma haste metálica elevada e isolada e um fio condutor aterrado.

A partir deste ponto inúmeros estudos se desenvolveram, confirmando a eletricidade atmosférica, até se chegar aos níveis atuais com descargas provocadas para medições e sistemas de localização e inferência de descargas atmosféricas.

2.1.2. Resumo dos Mecanismos de Formação

Para que ocorra uma descarga atmosférica são necessárias condições específicas, como a presença de pelo menos uma nuvem cumulonimbus, um processo de eletrificação, separação de cargas, ionização e ruptura da atmosfera.

As nuvens cumulonimbus possuem características próprias, são formadas em condições especiais de alta umidade e alta taxa de convecção, ventos fortes ou algum fator externo que faça esta alta umidade alcançar grandes altitudes. Possuem diâmetro entre 3 e 50 km, tem sua base a 2 km de altitude e seu topo de 15 a 20 km de altitude,

podem até alcançar a base da estratosfera, mas não passam deste ponto, pois nesse nível ocorre a absorção do ultravioleta pela camada de ozônio, elevando a temperatura e impedindo que a nuvem suba mais.

Existem muitas teorias para explicar a formação e separação de cargas elétricas dentro das nuvens, porém nenhuma delas explica com exatidão todos os processos que ocorrem, pois estes são muitos e complexos, sendo vários deles fracamente compreendidos.

Resumindo a teoria mais aceita, tem-se que o processo é composto de duas partes: primeiro a eletrificação das partículas e em seguida a separação espacial destas. A geração de íons baseia-se nos movimentos cíclicos ascendentes e descendentes que ocorrem dentro das nuvens, os quais forçam a água condensada e os cristais de gelo a se movimentarem nas nuvens, provocando colisões, o que faz com que os cristais e a água condensada se dividam, gerando íons, que também são gerados pela ação dos raios cósmicos no topo da nuvem.

Com os contínuos processos de ascensão dentro da nuvem, as gotas ascendentes entregam íons negativos à base da nuvem e sobem com carga elétrica positiva. Como os íons negativos possuem menor energia cinética que os íons positivos, estes acabam descendo e se acumulando na parte inferior da nuvem, o que faz com que os íons positivos se acumulem em cima.

Aproximadamente 95% das nuvens ficam carregadas como descreve o processo acima. Porém, os mecanismos de eletrificação das nuvens são muito mais complexos que este simples resumo, envolvendo vários fenômenos não descritos aqui.

2.1.3. Disrupção Atmosférica: Raio

A descarga atmosférica, comumente conhecida como raio, é um fenômeno totalmente aleatório e perigoso, caracterizada por um transiente de descarga elétrica de alta corrente com percurso de alguns quilômetros. Este perigo advém do fato de possuir grande quantidade de energia a qual é dissipada em um tempo muito curto, de até alguns milissegundos (ms).

Como o solo possui carga elétrica oposta à base da nuvem cumulonimbus, e a atmosfera entre ambos pode ser considerada como quase isolante, forma-se uma

estrutura como um capacitor, capaz de armazenar grandes cargas. Contudo, esse meio dielétrico tem uma limitação no gradiente de campo elétrico, com uma rigidez dielétrica de, aproximadamente, 3 kV/mm, vindo a iniciar um arco elétrico de descarga quando este valor é ultrapassado.

Este dielétrico pode inclusive ser deteriorado pela presença de estruturas elevadas, pontas, partículas em suspensão, poluição, umidade, pressão atmosférica, entre outros fatores, fazendo com que ocorra a descarga atmosférica com valores menores de campo elétrico. A maioria dos raios ocorre entre nuvens e dentro de uma mesma nuvem, somente uma pequena parcela, em torno de 20%, parte para o solo.

O processo da descarga ao solo começa com a elevação do campo elétrico acima do valor de rigidez da atmosfera presente, quando então ocorre o surgimento e expansão de caminhos ionizados de pontos da nuvem. Estes líderes descendentes caminham em passos de aproximadamente 10 metros em poucos microssegundos (μs), carregando o canal com cargas negativas retiradas da nuvem, quando estes começam a se aproximar do solo provocam o aparecimento de caminhos ionizados que partem deste carregando um canal com carga elétrica positiva. Quando estes dois líderes se encontram ocorre a primeira descarga atmosférica, denominada descarga de retorno, como pode ser visto no diagrama da Figura 2.1.

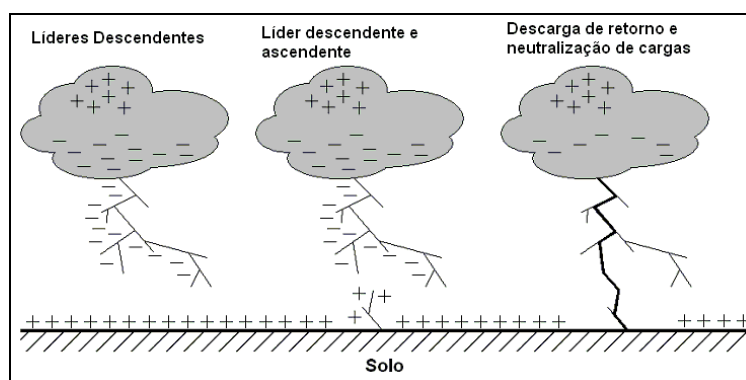


Figura 2.1 – Diagrama do processo de descarga

Uma descarga atmosférica pode terminar após a descarga de retorno, a qual descarrega o canal e a nuvem. Porém pode ser sucedida por outras descargas subsequentes, de uma a até mais de 15 descargas, dependendo da quantidade de cargas de que a nuvem ainda dispõe, com intervalos de poucos ms entre cada uma.

O processo da descarga subsequente é muito similar ao da primeira descarga, porém se inicia com o chamado “*dart leader*”, o qual tem a mesma função da descarga líder, contudo não caminha em passos, sendo um processo contínuo. Esta se aproveita do canal quente e ionizado formado pela primeira descarga para descarregar eventuais cargas que venham a se deslocar na nuvem, após a nova junção dos líderes ocorre novamente uma descarga de retorno.

No processo de ionização a descarga líder caminha em passos com velocidade de $2 \cdot 10^5$ m/s, de 100 a 1000 ampères (A) e carga negativa de 10 coulomb (C) ou mais.

A descarga de retorno é um dos mais importantes componentes da descarga atmosférica, pois possui alta energia e tempo de trânsito baixo. Possui tempo de frente de poucos μ s e tempo até meio valor de pico (cauda) em torno de 50 μ s.

A descarga líder subsequente, “*dart leader*”, possui velocidade média de $3 \cdot 10^6$ m/s, 1 C de carga e aproximadamente 1 kA de corrente.

Esse montante de energia dissipando em pouco tempo aquece o ar a temperaturas em torno de 30.000 kelvin (K), o que gera uma alta pressão, da ordem de 10 atmosferas (atm), causando uma onda de choque, a qual produz o ruído caracterizado pelo trovão, e luz na forma do relâmpago. Além de interferências em rádio frequência causadas pelo alto fluxo de corrente e campo eletromagnético.

Porém esta explanação corresponde a somente uma das possíveis configurações de descargas atmosféricas, pois na verdade existem quatro tipos de descarga nuvem-solo:

1. Descarga com líder negativo sendo iniciado pela nuvem;
2. Descarga com líder positivo sendo iniciado pela nuvem;
3. Descarga com líder positivo sendo iniciado pelo solo;
4. E descarga com líder negativo sendo iniciado pelo solo.

Estes quatro tipos podem ser observados na ilustração da Figura 2.2.

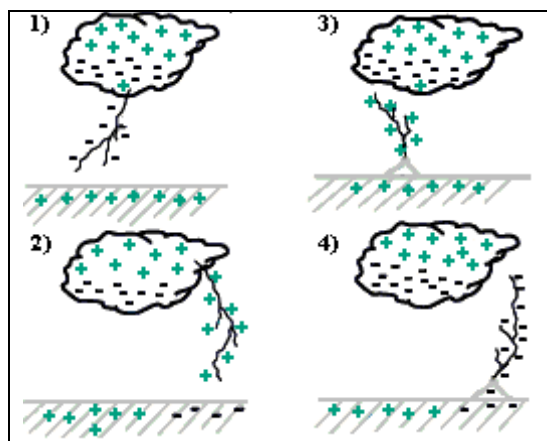


Figura 2.2 – Ilustração dos diferentes tipos de descargas

O primeiro tipo responde por 90% das descargas ao solo, o tipo 2 responde por quase 10%, e os tipos 3 e 4 são específicos de descargas que somente ocorrem com a presença de estruturas elevadas aterradas, acima de 100 m, ou de objetos localizados no alto de montanhas.

2.2. Modelos para as Correntes de Retorno

2.2.1. Definições e Tipos

A definição de modelos para as correntes de retorno é um detalhe muito importante para o estudo das descargas atmosféricas, com eles busca-se estimar os parâmetros das descargas e também os seus efeitos. Muitos modelos estão disponíveis, contudo nenhum é completamente preciso, pois todos levam em consideração algumas simplificações e aproximações para se atingir um determinado objetivo.

Existem quatro grandes classes de modelos: os baseados na dinâmica dos gases ou físicos, os eletromagnéticos, os de parâmetros distribuídos e os de engenharia.

Os modelos baseados na dinâmica dos gases, ou físicos, são pautados por parâmetros termodinâmicos, leis de conservação e equações de estado. Conseguem descrever detalhadamente a pressão, temperatura e densidade de massa do canal, porém possuem a desvantagem de não considerar o campo eletromagnético, o efeito corona e o aquecimento do ar próximo.

Estes modelos foram baseados nos desenvolvidos para descrever o comportamento de descargas elétricas no ar em laboratório, sendo então adaptados ou alterados para descrever descargas atmosféricas. Modelam o comportamento do canal

como um pequeno segmento de uma coluna cilíndrica de plasma, causado pelo fluxo de uma corrente em um meio resistivo, o qual gera aquecimento.

Já os modelos eletromagnéticos consideram meios reais de propagação das correntes, aproximando o canal a uma antena reta, vertical, e constituída por um fio fino com perdas. Estes modelos partem da solução numérica das equações de Maxwell, obtendo a distribuição da corrente ao longo do canal, da qual se podem obter os campos elétricos e magnéticos remotos.

Uma aproximação dos modelos eletromagnéticos são os modelos de parâmetros distribuídos, mais simples e que podem ser vistos como um modelo de linha de transmissão com circuitos RLC (resistivo – indutivo – capacitivo) distribuídos. Podem ser usados para determinar a corrente no canal em função do tempo e altura, de maneira mais simples e com menor quantidade de parâmetros se comparados aos modelos eletromagnéticos. Neste, podem ser utilizados parâmetros calculados pelos modelos de dinâmica de gases.

Para as aplicações em sistemas elétricos faz-se uso, principalmente, dos modelos de engenharia, pela sua simplicidade e eficiência. Estes são desenvolvidos com base em observações das características da corrente na base do canal, na velocidade de propagação da frente de onda e no padrão de luminosidade do canal.

Neles a física assume uma menor importância sendo substituída por uma técnica que busca a concordância entre os valores calculados e as observações, possuindo a vantagem de utilizar uma pequena quantidade de parâmetros que podem ser estimados ou medidos. Os modelos, então, são definidos como simples equações relacionando a corrente longitudinal do canal a uma dada altura pelo tempo com a corrente na base do canal.

Os modelos eletromagnéticos, de parâmetros distribuídos e os de engenharia podem ser utilizados para o cálculo direto do campo eletromagnético, enquanto que os modelos baseados na dinâmica dos gases podem ser utilizados para calcular a variação da resistência elétrica do canal em função do tempo.

Um modelo de engenharia genérico é simplesmente uma equação relacionando a corrente do canal longitudinal, em qualquer altura e qualquer tempo, a partir da corrente

na base do canal. Isto se deve ao fato de a corrente na base do canal ser a única passível de medição direta e da qual existem muitos dados experimentais.

Os modelos mais utilizados para simulações em sistemas elétricos são os modelos de engenharia abaixo:

- Modelo de linha de transmissão, MTL, proposto por Uman e MacLain (1969);
- MTLL, proposto por Rakov e Dulzon (1987), que é o MTL modificado com a incorporação da variação linear da corrente com a altura;
- E o MTLE, proposto por Nucci et al. (1988), modificação do MTL com a incorporação da variação exponencial da corrente com a altura.

Rakov expressou diversos modelos de engenharia pela equação de corrente generalizada:

$$I(z', t) = u(t - z'/v_f) \times P(z') \times I(0, t - z'/v) \quad (2.1)$$

Onde u é a função “*Heaviside*”, unitária para $t \geq z'/v_f$ e zero para $t < z'/v_f$, $P(z')$ é o fator de atenuação da corrente dependente da altura introduzido por Rakov e Dulzon (1991), v_f é a velocidade de frente da descarga de retorno, e v é a velocidade de propagação da onda de corrente.

2.2.2. Modelo de Linha de Transmissão, MTL

A corrente no nível do solo e em qualquer ponto do canal, abaixo da frente de onda de corrente da descarga de retorno, pode ser determinada pela radiação do campo elétrico a longas distâncias do canal. Com base em medições desta, o modelo foi definido para representar a corrente no canal.

No MTL, a corrente propaga-se pelo canal como se o fizesse em uma linha de transmissão ideal sem perdas, ou seja, a onda de corrente caminha para cima, sem distorção ou atenuação e com a velocidade constante.

O modelo permite que a carga seja transferida da ponta inferior para o topo do líder e assim não remove nenhuma carga do canal - o fato de que as cargas estão

presentes no canal foi determinado através de medições remotas das variações de campo elétrico feitas por Beasley et al. (1983). Neste modelo $P(z')$ é definido com sendo unitário e v como sendo a própria v_f . Na Figura 2.3 é mostrado um diagrama do modelo TL.

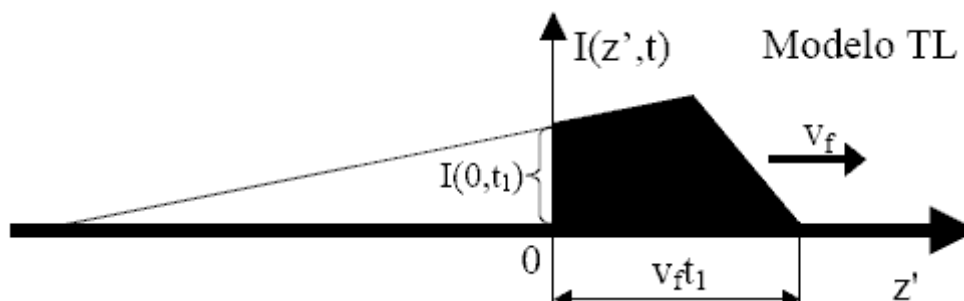


Figura 2.3 – Corrente versus altura z' acima do solo e um instante de tempo arbitrário $t=t_1$ para o modelos TL

2.2.3. MTLE: Uma Modificação do MTL

Como o modelo MTL não permite a remoção de carga do canal, não produzindo como conseqüência, campos que sejam realistas ao longo de um período de tempo considerado, algumas modificações foram propostas neste modelo.

No modelo MTLE, Nucci et al. propuseram um fator de atenuação que considera a contribuição da carga corona durante a fase da descarga de retorno, cuja forma funcional é exponencial negativa.

Isto permite que a carga seja removida do canal através do termo divergente ou eletrostático da corrente de descarga de retorno com a altura. A constante de decaimento λ foi proposta para considerar o efeito da distribuição vertical da carga do líder, removida durante a fase da descarga de retorno, e seu valor foi determinado por Nucci e Rachidi (1989) como $\lambda=2$ km, a partir dos resultados experimentais publicados por Lin et al. (1979).

Neste modelo $P(z')$ é definido como sendo $e^{-z'/\lambda}$ e v como sendo a própria v_f , onde λ é a constante de redução da corrente, estimado por Nucci et al. (1998) como sendo 2000 m. O valor de v_f é considerado constante se não for especificado de outra forma.

Tabela 2.1 – Modelos tipo linha de transmissão para $t \geq z'/v$

MTL (Uman e McLain, 1969)	$I(z', t) = I(0, t - z'/v)$ $\rho_L(z', t) = \frac{I(0, z'/v)}{v}$
MTLL (Rakov e Dulzon, 1987)	$I(z', t) = (1 - z'/H) \times I(0, t - z'/v)$ $\rho_L(z', t) = (1 - z'/H) \times \frac{I(0, t - z'/v)}{v} + \frac{Q(z', t)}{H}$
MTLE (Nucci et al., 1988)	$I(z', t) = e^{-z'/\lambda} \times I(0, t - z'/v)$ $\rho_L(z', t) = e^{-z'/\lambda} \times \frac{I(0, t - z'/v)}{v} + \frac{e^{-z'/\lambda}}{\lambda} \times Q(z', t)$

Onde:
$$Q(z', t) = \int_{z'/v}^t I(0, \tau - z'/v) d\tau ;$$

$v = v_f$, H e e são constantes.

Os modelos tipo linha de transmissão podem ser vistos como a incorporação de uma fonte de corrente na base do canal que injeta uma onda de corrente especificada no canal. Esta onda propaga para cima no modelo TL sem distorção ou atenuação e nos modelos MTLL e MTLE sem distorção, porém com atenuação especificada, como visto das equações de corrente correspondente dado na Tabela 2.1. Baba e Rakov (2003), usando o método das diferenças finitas para resolver as equações de Maxwell, argumentam que o modelo TL é propriamente representado por uma matriz vertical de fontes de corrente, que é o oposto a uma representação por um condutor vertical excitado na sua parte superior por uma fonte de corrente agrupada.

2.3. Aspectos Estatísticos das Descargas Atmosféricas

Um conhecimento mais exato dos parâmetros das descargas atmosféricas é essencial para a predição da severidade dos surtos que poderão atingir o sistema elétrico, causados tanto por descargas diretas como por sobretensões induzidas.

Uma idéia da distribuição da quantidade de descargas ao solo por regiões pode ser dada pelos mapas ceráunicos, que ilustram a quantidade de tempestades com raios por ano, como pode ser visto na Figura 2.4. Mapas mais precisos das distribuições das descargas podem ser obtidos hoje em dia através da utilização dos dados da rede nacional de localização de descargas atmosféricas, RINDAT, que conta com equipamentos espalhados pelo país monitorando e registrando dados de descargas,

como: intensidade, luminosidade, campo elétrico e direção. Com o cruzamento dos dados de pelo menos três destes sensores é possível inferir com precisão adequada a localização da descarga e sua real intensidade. A Figura 2.5 mostra um mapa da densidade de descargas atmosféricas ao solo elaborado pelo INPE [14].

Entretanto, como não existem duas descargas iguais, as variações estatísticas dos parâmetros de cada descarga devem ser levadas em conta para avaliar o grau de severidade com que um sistema elétrico específico está sujeito.

A corrente da descarga de retorno, sua forma de onda e a carga anulada pela descarga são os parâmetros mais importantes de análise. A descarga de retorno é caracterizada por uma ascensão rápida ao pico, dentro de alguns microssegundos, e um decaimento relativamente mais lento, da ordem de algumas dezenas de microssegundos.

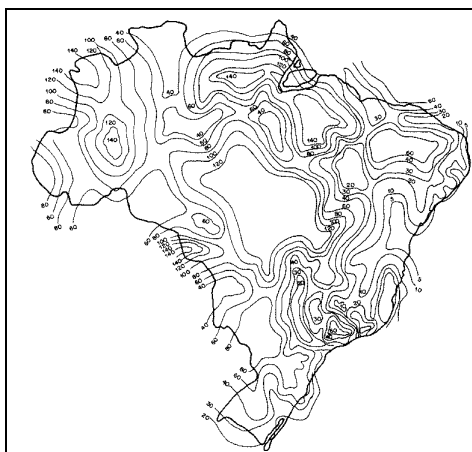


Figura 2.4 – Mapa isoceráunico do Brasil

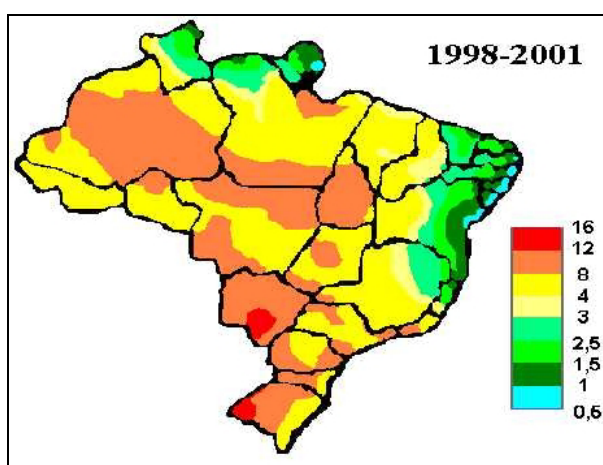


Figura 2.5 – Composição para o número de descargas ao solo de 1998 a 2001, elaborado pelo INPE

A tensão gerada ou induzida pela descarga é tão maior quanto menor for o tempo de frente da descarga de retorno. Os tempos da forma de onda e a carga transferida são as características de maior influência para o cálculo da suportabilidade dos equipamentos. Assim, a velocidade da descarga de retorno afeta diretamente a componente da tensão induzida pelo campo eletromagnético provocado pela descarga.

Os dados estatísticos para a primeira descarga de retorno com polaridade negativa são: a mediana das intensidades de correntes é de 31,1 kA com desvio padrão de 0,48, o tempo de frente de 3,83 μ s com desvio padrão de 0,55 e o tempo de cauda possuindo 77,5 μ s com desvio padrão de 0,58 [1,2].

A probabilidade de uma descarga ter corrente superior a um determinado valor, uma aproximação da distribuição log-normal determinada por Anderson, é calculada pela Equação 2.2.

$$P_C(> I_P) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_P}{31}\right)^{2,6}} \quad (2.2)$$

Onde:

- P_C é a probabilidade de a descarga possuir uma corrente superior a um determinado valor I_P ;
- I_P é o valor de corrente ao qual se deseja obter a probabilidade.

A distribuição log-normal é uma distribuição contínua de probabilidade de cauda única, especialmente para variáveis aleatórias cujo logaritmo é normalmente distribuído. Sua função densidade de probabilidade é definida pela Equação 2.3.

$$f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(x)-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.3)$$

Onde:

- χ é o valor ao qual se deseja analisar;

- μ é o valor da média aritmética da amostra ou população;
- σ é o valor do desvio padrão da amostra ou população.

Uma descarga atmosférica na maioria dos casos é composta por múltiplas descargas, porém as descargas subseqüentes não possuem relação direta com a primeira descarga de retorno. Os valores de pico de corrente são significativamente menores, possuindo mediana de 12,3 kA com um desvio padrão de 0,53.

Por outro lado, para as descargas positivas, as quais constituem em torno de 10% do total de descargas ao solo, possuem a mediana do pico de corrente da ordem de 35 kA com desvio padrão de 1,21, um tempo de frente da ordem 22 μ s com desvio padrão de 1,23 e um tempo de cauda de 230 μ s com desvio padrão de 1,33. Nota-se que as descargas positivas possuem um pico de corrente ligeiramente superior ao das descargas negativas, e com um tempo de descarga muito superior.

Na Tabela 2.2 são exibidos os dados estatísticos levantados pelo CIGRÉ, Comitê Internacional dos Grandes Sistemas Elétricos, uma compilação de dados levantados por diversos autores, grupos e torres instrumentadas de captação e medição das descargas atmosféricas [13].

Assim como pode ser verificado na ilustração da Figura 2.6, temos as seguintes descrições dos parâmetros:

- I_{10} = 10% do valor de pico da onda;
- I_{30} = 30% do valor de pico da corrente;
- I_{90} = 90% do valor de pico da corrente;
- $T_{10/90}$ = tempo entre I_{10} e I_{90} ;
- $T_{30/90}$ = tempo entre I_{30} e I_{90} ;
- S_m = Máxima taxa de subida da frente da onda – Maior valor de tangente;
- S_{10} = taxa de subida em I_{10} ;
- $S_{10/90}$ = taxa média de crescimento entre I_{10} e I_{90} ;

- $S_{30/90}$ = taxa média de crescimento entre I_{30} e I_{90} ;
- Q_I = Carga do Impulso [C].

Tabela 2.2 – Compilação de parâmetros estatísticos levantados pelo CIGRÉ

Parâmetros da distribuição log-normal para descargas descendentes negativas				
Parâmetro	Primeira descarga		Descarga subsequente	
	Média	Desvio padrão logarítmico (β)	Média	Desvio padrão logarítmico (β)
Frente [μs]				
$t_{d10/90} = T_{10/90} / 0,8$	5,63	0,576	0,75	0,921
$t_{d30/90} = T_{30/90} / 0,6$	3,83	0,553	0,67	1,013
$t_m = I_F / S_m$	1,28	0,611	0,308	0,708
Inclinação [kA/μs]				
S_m , Máximo	24,3	0,599	39,9	0,852
S_{10} , em 10%	2,6	0,921	18,9	1,404
$S_{10/90}$, 10-90%	5	0,645	15,4	0,944
$S_{30/90}$, 30-90%	7,2	0,622	20,1	0,967
Crista da corrente [kA]				
I_I , inicial	27,7	0,461	11,8	0,53
I_F , Final	31,1	0,484	12,3	0,53
Inicial / Final	0,9	0,23	0,9	0,207
Tempo de Calda, t_n [μs]	77,5	0,577	30,2	0,933
Carga, Q_I [C]	4,65	0,882	0,938	0,882
$\int I^2 dt$ [(kA) 2 s]	0,057	1,373	0,0055	1,366
Intervalo entre descargas [ms]	-	-	35	1,066

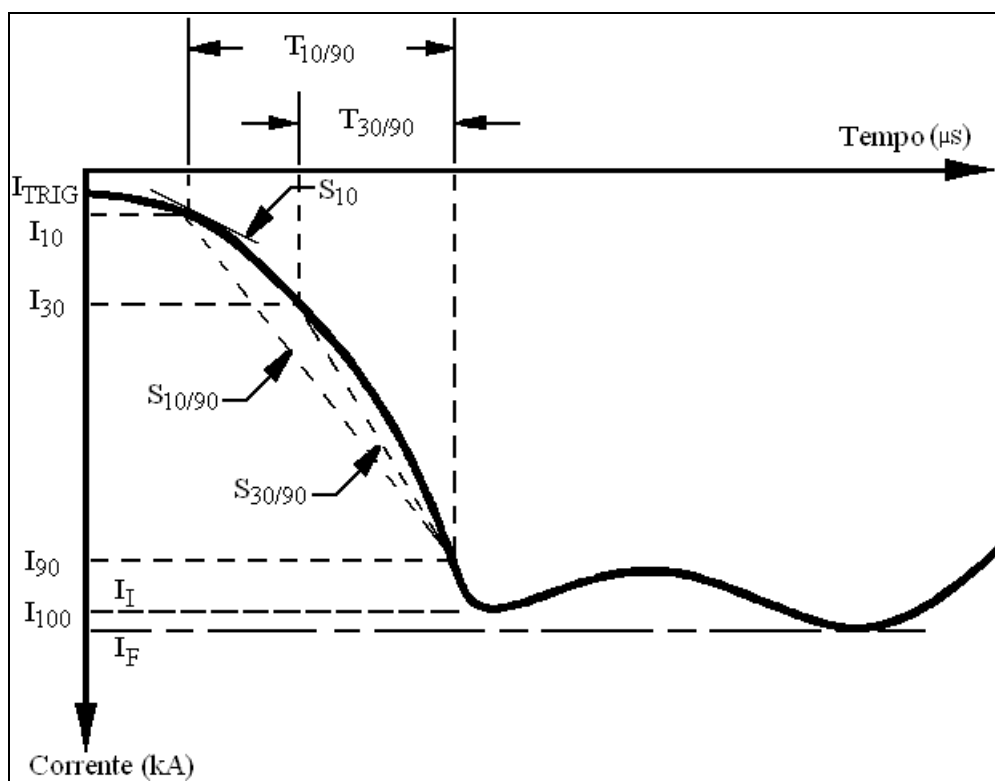


Figura 2.6 – Descrição dos parâmetros da descarga atmosférica

2.4. Parâmetros Utilizados nos Modelos para Simulação

Para todas as simulações os parâmetros utilizados foram tomados como base os definidos na norma 1410 do IEEE, “*Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines*” [11], os quais já foram apresentados nos itens anteriores.

Nesta norma os parâmetros das descargas atmosféricas, da suportabilidade dos sistemas de distribuição e uma metodologia para estudo e melhoria do desempenho destes são definidos. Sendo esta norma amplamente citada, utilizada e confirmada por resultados e medições práticas, assim como é compatível com outras normas sobre o mesmo tema.

Porém também foram considerados os parâmetros citados pelo CIGRÉ [13], outros grupos e trabalhos citados na referência.

2.5. Referências

1. Vladimir A. Rakov, Martin A. Uman, “Lightning: Physics and Effects”, Cambridge University Press, 2006;
2. R. H. Golde, “Lightning”, Vol. 1, Academic Press, 1977;
3. Odem Mendes Jr, Margarete Oliveira Domingues, “Introdução à Eletrodinâmica Atmosférica”, Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 24, no. 1, Março de 2002;
4. Christian Bouquegneau, “Lightning and Mythologies”, VIII International Symposium on Lightning Protection, São Paulo, Novembro de 2005;
5. Hélio Eiji Sueta, “Uso de Componentes Naturais de Edificações Como Parte Integrante do Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas – Uma Visão Relativa aos Danos Físicos”, Universidade de São Paulo, 2005;
6. Marcelo M. F. Saba, “A Física das Tempestades e dos Raios”, Revista Física na Escola, vol. 2, no. 1, 2001;
7. Sérgio W. G. da Silveira, “Um Estudo Sobre os Dispositivos de Localização de Descargas Atmosféricas”, Universidade Federal de Mato Grosso, 2003
8. Maria E. B. Frediani, “Tempestades Severas”, Universidade de São Paulo, 2003;
9. Dailton G. Guedes, “Modelagem Matemática de Correntes na Torre da Estação Morro do Cachimbo”, INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2004;
10. “Parameters of Lightning Strokes: A Review”, Lightning and Insulator Subcommittee of T&D Committee, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 1, Janeiro de 2005;
11. “IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines”, IEEE Std 1410-2004, T&D Committee, IEEE Power Engineering Society;
12. Jens Schoene, “Analysis of Parameters of Rocket-Triggered Lightning Measured During the 1999 and 2000 Camp Blanding Experiment and Modeling of Electric and Magnetic Field Derivatives Using the Transmission Line Model”, Universidade da Flórida, 2002;
13. Working Group 01 (Lightning) of Study Committee 33 (Overvoltages and Insulation Co-ordination), “Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines,” CIGRÉ, 1991;
14. Grupo de eletricidade atmosférica, ELAT, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE;
15. Crow, E. L. e Shimizu, K., “Lognormal Distributions: Theory and Applications”, Dekker. 1988;

Capítulo III

“Se eu vi mais longe, foi por estar de pé sobre ombros de gigantes.”
Isaac Newton

3.1. Fundamentos e Equacionamento

3.1.1. Descargas Diretas e Induzidas – Modelo Eletrogeométrico

Para analisar o desempenho das redes de distribuição aéreas em média tensão, frente às descargas atmosféricas, ou mesmo linhas de transmissão, é de suma importância separar as descargas em duas classes:

- As descargas diretas, que porventura incidirem sobre os condutores, ou equipamentos do sistema;
- E as descargas induzidas, as quais ao atingir pontos ou objetos que não pertencem ao sistema, induzem neste uma sobretensão pelo acoplamento eletromagnético.

Porém quanto maior o nível de tensão do sistema, menor será a probabilidade deste vir a sofrer uma falta ocasionada pelas descargas atmosféricas. Para sistemas com tensões superiores a 200 kV o nível de isolamento é capaz de suportar as sobretensões induzidas por descargas atmosféricas e, dependendo do nível de tensão, descargas diretas. Pois, para os níveis classificados como extra alta tensão, o surto de maior impacto é o proveniente de manobras do sistema.

Isto se deve ao fato de que nos sistemas de tensão muito elevada, acima de 200 kV, por possuírem um alto nível de isolamento é propiciada uma maior suportabilidade em relação às descargas atmosféricas, o que se resume a uma menor sobre-solicitação do isolamento com um surto proveniente de descarga atmosférica.

Também, para estes sistemas de tensão elevada, as próprias características elétricas, apresentando uma capacitância elevada, provocam o surgimento de grandes sobretensões em situações de manobra, ocasionadas, principalmente, pelo Efeito Ferranti, estas ultrapassam as sobretensões ocasionadas por descargas atmosféricas. Sendo assim, para os sistemas de tensões superiores a 200 kV, os quais são projetados para suportar as sobretensões com origem em energizações e manobras, são naturalmente capazes de suportar as sobretensões ocasionadas por descargas atmosféricas.

Porém, para os sistemas de distribuição, onde os níveis de tensão se encontram geralmente na faixa de 13,8 kV, qualquer impacto direto de uma descarga atmosférica implica em falha dielétrica do sistema, com possíveis queimas de equipamentos. No entanto, existem muitos fatores que podem fazer com que uma descarga não venha a atingi-lo diretamente, como a proximidade de prédios, construções, árvores, torres, entre outras estruturas elevadas que possam estar presentes, desviando as descargas e fornecendo uma blindagem à rede. Porém, mesmo ao não atingir diretamente a rede os surtos induzidos são capazes de provocar falhas dielétricas, podendo ocasionar o desligamento de partes, ou até mesmo de toda a rede.

Um dos métodos mais utilizados para a identificação do ponto de impacto da descarga, separando-as entre diretas ou surtos induzidos, é o chamado Modelo Eletrogeométrico, EGM na sigla inglesa.

Wagner [42, 44, 45] usou seu modelo de velocidade de descarga de retorno, junto com a suposição de que o processo de abertura de arco entre o líder e o solo é guiado pelo gradiente de abertura de arco do impulso de 600 kV/m, para obter estimativas da distância de atração da descarga pela velocidade da descarga de retorno.

Esta aproximação forma a base para o EGM, onde a distância de atração da descarga é relacionada com a corrente de pico desta. Armstrong e Whitehead [43] atualizaram o EGM pela introdução da hipótese de que o processo da descarga entre o líder e o solo é guiado pela resistência à abertura de arco de polaridade negativa entre duas hastes, como descrito por Paris [40, 41]. Assim o EGM pode ser melhorado igualando os níveis de probabilidade das distribuições de carga e corrente das descargas de retorno negativas. Estas suposições, junto com o valor de 440 kV/m de gradiente de

abertura de arco, da ponta do líder ao solo no início do salto final, conduziram à relação entre distância de atração da descarga e a corrente de pico, da seguinte forma mostrada na Equação 3.1.

$$DA = 9 \cdot I_p^{0,63} \quad (3.1)$$

Este resultado é notavelmente similar a outras expressões de EGM sugeridas por Armstrong, Whitehead e Love [1 - 3, 23, 43, 46 - 48], Equação 3.2. O EGM foi adaptado em muitas normas de proteção contra descarga atmosférica usando o conceito de esfera rolante. O modelo foi também modificado com fatores empíricos, para aumentar a atratividade de estruturas e para reduzir a atratividade do solo comparado a condutores aéreos. Essas modificações podem fazer com que o EGM possa prever melhor o ponto de impacto, mas não possuem uma boa fundamentação física.

Muitos outros modelos e expressões de cálculo para distância de atração, ou raio crítico, são descritas na literatura, porém a mais utilizada e também especificada na norma IEEE Std. 1410 [1] é a mostrada na Equação 3.2.

$$DA = 10 \cdot I_p^{0,65} \quad (3.2)$$

Durante o processo de descida dos líderes escalonados da descarga atmosférica, ele alcança o chamado ponto de impacto, onde começam a surgir diversos líderes ascendentes de pontos no solo e, dependendo da carga e características dos pontos no solo, se iniciará o processo de ligação, o qual unirá dois líderes, um ascendente e um descendente, iniciando a descarga de retorno.

No EGM, assumindo-se a descarga líder descendente como vertical, adota-se a chamada semi-esfera rolante, esta tem sua base e centro na ponta da descarga líder de retorno, raio como calculado pela equação da distância de atração e direção vertical para baixo com velocidade da descarga líder descendente. Assim que um ponto do solo interceptar a semi-esfera, este será definido como ponto de impacto, onde a probabilidade de um líder ascendente deste ponto unir com o líder descendente é assumida como sendo muito alta, como mostrado na Figura 3.1.

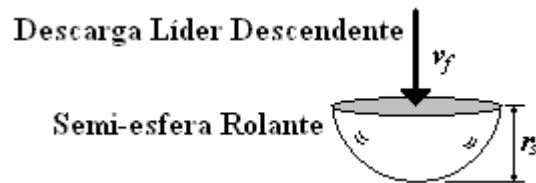


Figura 3.1 – Ilustração da semi-esfera rolante

A partir do cálculo da distância de atração podemos obter três valores, respectivamente o raio de blindagem, r_s , raio de atração lateral, r_l , e o raio de atração do solo, r_g .

Onde:

- $r_s = DA$, distância de atração;
- $r_g = k \cdot r_s$
- $r_l = \sqrt{r_s^2 - (r_g - h)^2}$ para $h < r_g$, ou
- $r_l = r_s$ para $h \geq r_g$
- h é a altura em metros de um ponto no solo;
- E k é uma constante adotada, igual a 0,9 pela norma IEEE Std. 1410 para redes de distribuição em média tensão.

Destes valores podemos verificar a interceptação ou não de pontos no solo, separando entre descargas diretas ou indiretas, também chamadas de induzidas, como mostrado na Figura 3.2, onde somente ocorrerá uma descarga direta ao ponto em estudo se a descarga líder descendente atingir a linha tracejada e não a contínua, área correspondida pelos limites dentro do raio de blindagem, r_s , e fora do raio de atração lateral, r_l .

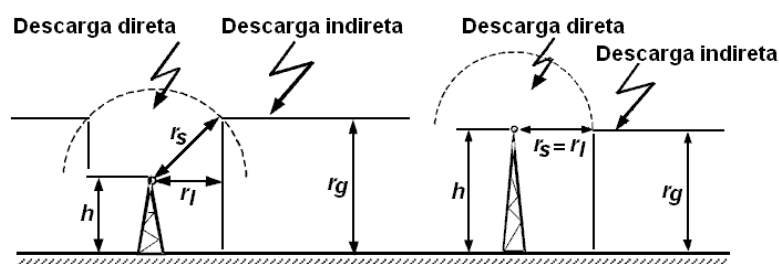


Figura 3.2 – Distâncias críticas de atração para diferentes casos

3.1.2. Sobretensões nas Linhas – Equacionamento Geral

3.1.2.1. SOBRETENSÕES FRENTE ÀS DESCARGAS DIRETAS

Para sistemas de distribuição urbanos, as descargas diretas não seriam o evento mais comum, pois estas acabam sendo desviadas e interceptadas por estruturas elevadas nas proximidades das linhas como: torres, prédios, construções altas, árvores, entre outros. Sendo, então, as descargas diretas, mais prováveis de ocorrer em zonas rurais ou urbanas de baixa densidade, onde a presença de estruturas elevadas é significativamente menor.

Contudo, é a que possui piores efeitos para o sistema, pois, a menos que a rede possua um cabo guarda, ou pára-raios, a quase totalidade implica em falha dielétrica do sistema, com grande probabilidade de queima de equipamentos e também danos físicos e materiais. Isto se deve ao fato das descargas diretas provocarem um surto de sobretensão de taxa de subida de tensão elevada e com um nível entre alguns a até dezenas de mega volts.

Uma maneira rápida e prática para o cálculo da sollicitação ao isolamento de um sistema, quando da incidência de uma descarga direta, pode ser facilmente obtida a partir da intensidade de corrente da descarga e da impedância de surto do sistema. Como a corrente se divide em duas, no ponto de impacto, gerando duas ondas viajantes de sobretensão que se afastam do ponto de incidência, utilizamos a Equação 3.3 para este cálculo aproximado da sobretensão.

$$V = \frac{I}{2} \cdot Z \quad (3.3)$$

Onde:

- I = Intensidade da corrente da descarga direta;
- Z = Impedância de surto do sistema.

Por exemplo, no caso de uma descarga da ordem de 12 kA atingindo diretamente uma rede de distribuição e assumindo uma impedância de surto da ordem de 400 Ω para esta rede, teríamos uma sobretensão da ordem de 2.400 kV, com uma frente de onda de alguns microssegundos, valores estes muito superiores à suportabilidade do sistema de distribuição.

Contudo esta equação somente apresenta uma primeira aproximação da sobretensão desencadeada na rede, pois o fenômeno das ondas viajantes estabelecido vai provocar a atenuação e distorção da mesma, causado pela impedância da rede e efeito corona. Assim também como qualquer ponto onde ocorra uma falha dielétrica dos isoladores, a presença de equipamentos, pára-raios, presença e pontos de aterramento do condutor neutro, entre outras descontinuidades na linha vão provocar uma maior atenuação, com refração e reflexão destas ondas.

A presença de equipamentos pára-raios reduz o nível da sobretensão, teoricamente protegendo o sistema, porém esta redução vai depender da qualidade e estado dos pára-raios, assim como da impedância de aterramento dos mesmos. Porém, para que se atinja uma redução sensível da sobretensão a um nível abaixo da suportabilidade dos equipamentos, seriam necessários pára-raios com energia superior aos usualmente instalados nas redes de distribuição e com um intervalo bem menor de espaçamento entre eles no sistema, virtualmente em todas as fases de todos os postes, o que elevaria enormemente o custo do sistema.

Outra solução seria a instalação de um cabo guarda acima dos condutores da rede, onde as descargas diretas poderiam ser interceptadas e conduzidas à terra. Porém, para que este seja eficiente, é necessário que seja aterrado em todos os postes, encarecendo significativamente o sistema, o que exige uma análise econômica para verificar a validade da solução.

Outro problema técnico é que com a corrente do surto fluindo através da impedância de aterramento, onde nos sistemas de distribuição nem sempre um valor baixo é atingido, aparece no condutor guarda e, possivelmente, no condutor neutro, uma sobretensão que poderá ser capaz de causar a abertura de um arco para os condutores de fase. Essa possibilidade de arco é elevada nas redes de distribuição, pelas características de distanciamento dos cabos e nível básico de isolamento dos isoladores, o que reduz sensivelmente a eficácia do cabo guarda.

3.1.2.2. SOBRETENSÕES FRENTE A DESCARGAS INDUZIDAS

As sobretensões frente a descargas induzidas são fenômenos complexos, onde uma descarga atmosférica atingindo um ponto próximo da rede induz um surto por acoplamento eletromagnético.

Para os sistemas de distribuição, sua frequência de ocorrência é muito maior que a das descargas diretas, pela rede contar com a blindagem natural oferecida por estruturas elevadas nas proximidades das linhas, sendo então a indução responsável por uma grande quantidade de desligamentos e falhas.

O pulso eletromagnético gerado pela descarga atmosférica e o campo magnético criado pela circulação da corrente da descarga de retorno captada por um ponto próximo à rede, fazem com que seja induzida uma corrente em condutores próximos, gerando uma onda de surto de sobretensão.

Estas sobretensões são de intensidade bem menor que as causadas por descargas diretas e possuem tempo de subida ao pico de tensão menor, porém ainda podem chegar à ordem de centenas de kV em poucas dezenas de microssegundos. A magnitude do surto e sua forma de onda vão depender dos parâmetros da descarga, como corrente e velocidade da descarga de retorno, distância e posição relativa à rede de distribuição, características do solo, configuração e parâmetros da rede.

A aproximação do solo como um condutor perfeito leva a níveis menores de sobretensões no sistema, ou seja, quanto menor a condutividade do solo, maior será a magnitude da sobretensão que irá aparecer no sistema.

O grande número de fatores envolvidos confere ao problema um grau de dificuldade elevado. Como resultado disto uma série de procedimentos complexos vem sendo propostos, os quais cobrem alguns aspectos do problema.

3.1.2.3. LINHAS MONOFÁSICAS E SOLO PERFEITAMENTE CONDUTOR

Para solucionar o problema da indução de sobretensões nas linhas de média tensão, vários modelos podem ser utilizados. Uma das possíveis soluções envolve o uso da teoria de antenas, através da abordagem geral pelas equações de Maxwell.

Porém, este tipo de abordagem implica um longo tempo de resolução, causado pelos longos comprimentos das linhas envolvidas, o que torna impraticável um estudo estatístico. Para tanto, foi proposto o modelo de linha de transmissão, onde é assumida uma seção transversal da linha como sendo eletricamente pequena e a propagação do campo eletromagnético acontece somente ao longo do eixo da linha. Desta maneira a linha pode ser representada como uma estrutura de parâmetros distribuídos.

Vários estudos mostraram uma boa aproximação entre os resultados obtidos com os modelos de linha de transmissão e resultados obtidos utilizando tanto a teoria de antenas como experimentos práticos [22].

Existem vários modelos baseados na teoria da linha de transmissão, cada qual com sua particularidade, entre eles os de Agrawal, Price e Gurbaxani, o de Taylor Satterwhite e Harrison, o de Rachidi, o de Rusck, o de Chowdhuri e Gross, entre outros.

A Figura 3.3 mostra a linha para os modelos em questão, onde será estudado o problema do acoplamento, mostrando o caminho de integração.

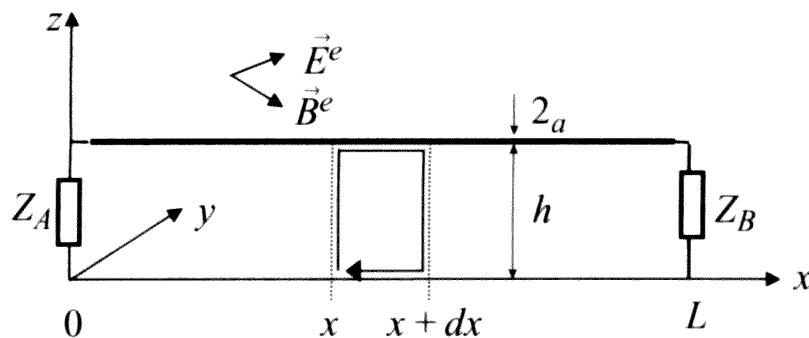


Figura 3.3 – Geometria do Acoplamento Eletromagnético da Linha Monofásica em Solo Perfeitamente Condutor

Onde: Z_A e Z_B indicam as impedâncias terminais da linha, h a altura da linha, L o seu comprimento, E^e o campo elétrico, B^e o campo magnético e $2a$ o diâmetro do condutor.

Os modelos de Agrawal et al., Taylor et al. e Rachidi são equivalentes, todos baseados na integração das equações de Maxwell e usando a aproximação da teoria da linha de transmissão, somente levando em consideração o acoplamento do campo eletromagnético de diferentes formas, porém, todos obtendo valores bem aproximados nos resultados totais.

No modelo de Agrawal et al., foram derivadas as equações de acoplamento, podendo ser escritas no domínio da frequência como na Equação 3.4.

$$\begin{aligned} \frac{dV^s(x)}{dx} + j\omega L'I(x) &= E_x^e(x, h) \\ \frac{dI(x)}{dx} + j\omega C'V^s(x) &= 0 \end{aligned} \quad (3.4)$$

Onde L' e C' são, respectivamente, a indutância e a capacitância por unidade de comprimento da linha, $I(x)$ é a corrente induzida e $V^S(x)$ é a tensão dispersa, relativa à tensão total $V(x)$ pela Equação 3.5.

$$V^S(x) = V(x) - V^e(x) \tag{3.5}$$

$$V^e(x) = -\int_0^h E_z^e(0, z) dz$$

Onde $V^e(x)$ é a tensão de excitação e $E_x^e(x, h)$ e $E_z^e(z, h)$ são, respectivamente, a componente horizontal (ao longo do condutor) e vertical do campo elétrico de excitação.

Neste modelo, a função forçante é o campo elétrico de excitação tangencial ao condutor da linha, representado por fontes de tensão distribuídas ao longo da linha no circuito equivalente, Figura 3.4.

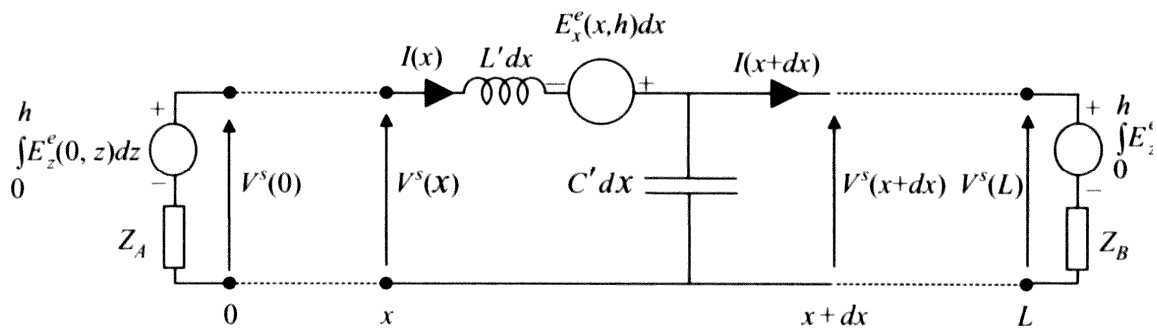


Figura 3.4 – Circuito Equivalente do modelo de Agrawal et al.

3.1.2.4. LINHAS MONOFÁSICAS E SOLO COM PERDAS

Em princípio, as perdas no solo como também no condutor devem ser levadas em consideração para o cálculo das tensões induzidas. Porém, as perdas devido à condutividade finita do solo são as mais importantes, e afetam tanto o campo eletromagnético como a propagação do surto pela linha [22]. Entretanto, as influências sobre o campo eletromagnético são de maior importância, sendo preponderantes.

A resistividade do solo é um dos parâmetros que causam alterações no processo de indução, afetando a tensão induzida em amplitude, polaridade e, mais importante, forma de onda, mesmo para o caso de uma descarga bem próxima à linha, onde o campo eletromagnético poderia ter uma menor influência.

Tomando como base a Figura 3.3 e incluindo a condutividade (σ_w) e permissividade relativa (ϵ_{rw}) do condutor, e a condutividade (σ_g) e permissividade relativa (ϵ_{rg}) do solo, no modelo de Agrawal et al., chegamos às equações de acoplamento estendidas 3.6.

$$\begin{aligned} \frac{dV^s(x)}{dx} + Z'I(x) &= E_x^e(x, h) \\ \frac{dI(x)}{dx} + Y'V^s(x) &= 0 \end{aligned} \quad (3.6)$$

Onde Z' e Y' são a impedância longitudinal e admitância transversal por unidade de comprimento, respectivamente, e são definidas pelas equações 3.7.

$$\begin{aligned} Z' &= j\omega L' + Z'_w + Z'_g \\ Y' &= \frac{(G' + j\omega C')Y'_g}{G' + j\omega C' + Y'_g} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Onde são definidos:

- L' , C' e G' : são a indutância longitudinal, capacitância transversal e condutância transversal, respectivamente, por unidade de comprimento, calculada para o caso de um condutor sem perdas sobre um solo perfeitamente condutor, como mostram as equações 3.8, para o caso em que $h \gg a$;

$$\begin{aligned} L' &\cong \frac{\mu_0}{2\pi} \cosh^{-1}\left(\frac{2h}{a}\right) \\ C' &\cong \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{2h}{a}\right)} \\ G' &= \frac{\sigma_{ar}}{\epsilon_0} C' \end{aligned} \quad (3.8)$$

- Z'_w : é a impedância interna do condutor por unidade de comprimento, assumindo um cabo redondo e simétrico, calculada pela Equação 3.9. I_0 e I_1 são as funções modificadas de Bessel de ordem 0 e 1, respectivamente;

$$Z'_w = \frac{\gamma_w I_0(\gamma_w a)}{2\pi a \sigma_w I_1(\gamma_w a)} \quad (3.9)$$

- ♦ γ_w : é a constante de propagação do condutor, dada pela Equação 3.10;

$$\gamma_w = \sqrt{j\omega\mu_0(\sigma_w + j\omega\varepsilon_0\varepsilon_w)} \quad (3.10)$$

- ♦ Z'_g : é a impedância do solo por unidade de comprimento, definida por Sunde [22] na Equação 3.11, onde B_y^s é a componente distribuída do campo magnético de indução;

$$Z'_g \cong \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{1 + \gamma_g h}{\gamma_g h}\right) \quad (3.11)$$

- ♦ γ_g : é a constante de propagação do solo, dada pela Equação 3.12;

$$\gamma_g = \sqrt{j\omega\mu_0(\sigma_g + j\omega\varepsilon_0\varepsilon_g)} \quad (3.12)$$

- ♦ Y'_g : é a admitância do solo, dada pela Equação 3.13.

$$Y'_g \cong \frac{\gamma_g^2}{Z'_g} \quad (3.13)$$

3.2. Modelos para Sobretensões Devido a Descargas Diretas

3.2.1. Distância Crítica

Uma linha de distribuição possui uma área ao seu redor em que ela irá atrair as descargas atmosféricas para si, ou seja, uma descarga que normalmente atingiria o solo a certa distância, se não houvesse a linha, é atraída a essa.

Esta área é dependente da intensidade da corrente da descarga de retorno, uma descarga com uma maior intensidade de corrente irá ser atraída de uma distância maior. Isto é baseado na idéia de que o líder escalonado atinge um ponto crítico onde é igualmente provável atingir o solo ou a linha, como mostrado na Figura 3.5.

A distância S é definida pela Equação 3.14.

$$S^2 = (\beta S - h)^2 + x^2 \quad (3.14)$$

Onde:

- ◆ x – distância horizontal entre a linha e a descarga atmosférica;
- ◆ h – altura da linha;
- ◆ S – distância crítica à descarga;
- ◆ β - fator de multiplicação para levar em consideração a diferentes atratividades do cabo condutor aéreo.

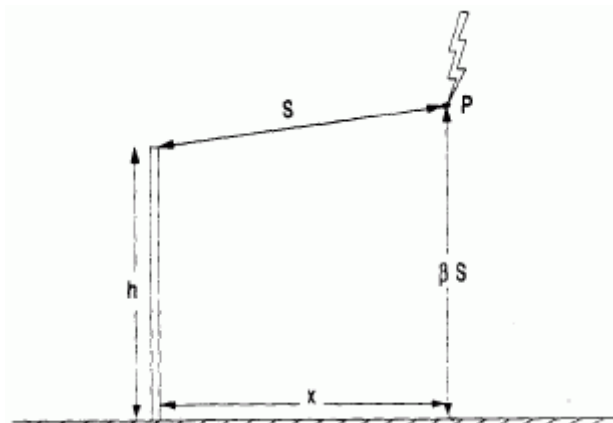


Figura 3.5 – Distância Crítica entre Linha e Solo para a Descarga Atmosférica

O comprimento do deslocamento final do ponto crítico ao condutor poder ser aproximado pela equação de Whitehead, Equação 3.15.

$$S = 8I^{0,65} \quad (3.15)$$

Onde:

- ◆ S – distância crítica à descarga;
- ◆ I – intensidade de corrente da descarga atmosférica.

Esta equação de distância crítica foi uma primeira tentativa de desenvolvimento executada por Whitehead, a qual, com a colaboração de Armstrong, Love, entre outros, resultou na equação para a distância de atração exposta anteriormente na equação 3.2.

Na falta de dados confiáveis, o valor de β pode ser aproximado a 1, sendo um valor aceitável para linhas de distribuição, entretanto existem muitas incertezas envolvidas. Árvores, torres, edificações, prédios e equipamentos nos postes podem

afetar este valor. Assim, usando o valor de $\beta=1$, temos que a distância crítica em função da intensidade de corrente da descarga atmosférica e altura da linha será definida pela Equação 3.16.

$$x = \sqrt{16hI^{0,65} - h^2} \quad (3.16)$$

A curva de distância crítica é apresentada na Figura 3.6, como função da intensidade de corrente da descarga atmosférica para a altura padrão de linhas de distribuição em 11 metros. A área preenchida mostra a região onde a distância crítica foi atingida, ou seja, onde a descarga atmosférica atingiria o condutor da linha ao invés do solo.

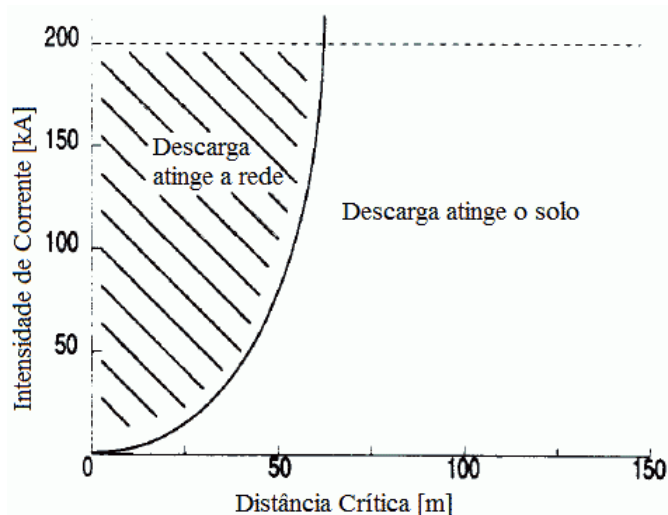


Figura 3.6 – Curva de Distância Crítica para Determinar Impactos Diretos à Linha

3.2.2. Modelo de Ondas Viajantes

Se uma rede for atingida diretamente em seus condutores por uma descarga atmosférica a uma grande distância de um pára-raios ou subestação, o surto originado fluirá ao longo da linha em ambos os sentidos, podendo provocar arcos, trincas em isoladores e até mesmo destruir postes, até que toda a sua energia seja gasta.

Porém, se a descarga ocorrer em um ponto da rede imediatamente junto a uma subestação então é quase certo que ocorrerão danos à planta, já que a capacidade dos pára-raios em desviar esta grande energia à terra, sem permitir que uma parte seja transmitida aos terminais dos equipamentos, é limitada.

Quando uma descarga atmosférica atinge um condutor de fase aéreo, a intensidade da corrente e a natureza de alta frequência dos surtos provocam o

surgimento de surtos de tensão em ondas viajantes, que se propagam em ambos os sentidos a partir do ponto de impacto, Figura 3.7.

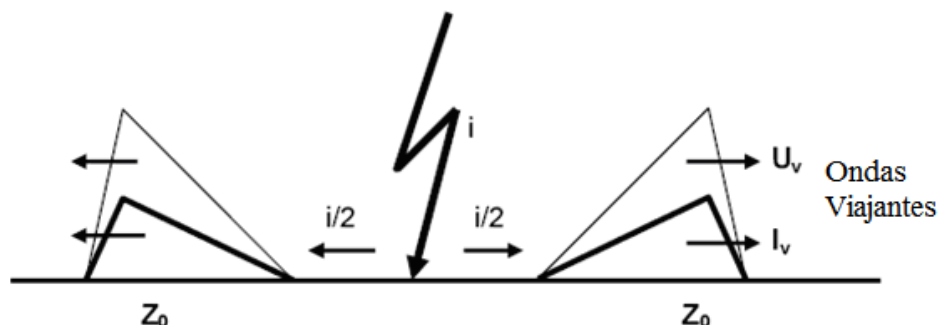


Figura 3.7 – Ilustração das Ondas Viajantes dos Surtos de Tensão e Corrente após Impacto de Descarga Atmosférica Direta

Para determinar os surtos de tensão e corrente resultantes em várias partes do sistema, uma análise de ondas viajantes é requerida. Redes simples com impedâncias lineares podem ser analisadas manualmente, já redes mais complexas, características de sistemas de potência práticos, requerem a análise computacional ou simulação.

Para as ondas que viajam em cada sentido, a corrente e a tensão serão relacionadas entre si pela impedância de surto, Z_0 , da rede de distribuição. Z_0 é puramente resistiva, sendo assim a forma de onda da tensão e corrente possuem a mesma forma. A impedância de surto pode ser calculada pelas indutâncias e capacitâncias distribuídas do sistema de distribuição, como na Equação 3.17.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (3.17)$$

Valores típicos para sistemas de linhas aéreas variam entre 300 e 500 Ω , e para cabos entre 30 e 60 Ω . A velocidade das ondas de surto é dada pela Equação 3.18.

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3.18)$$

Onde, para linhas aéreas esse valor se situa muito próximo ao valor da velocidade da luz, $3 \cdot 10^8$ m/s, já para cabos essa velocidade fica, tipicamente, entre metade e dois terços deste valor.

A forma de onda destes surtos de tensão é similar àquela da corrente de descarga atmosférica, e sua magnitude U é dada pela Equação 3.19.

$$U = Z_0 \frac{i}{2} (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (3.19)$$

Usando os valores típicos de $400 \, \Omega$ para a impedância de surto da rede de distribuição e $20 \, \text{kA}$ de intensidade de corrente para a descarga atmosférica, obtemos uma magnitude do valor de crista do surto de tensão na ordem de $4 \, \text{MV}$.

A impedância de surto depende principalmente da magnitude da capacitância fase-terra da rede, que por sua vez é afetada pela altura do condutor acima do solo. Para linhas aéreas a impedância de surto resultante pode ser calculada através da relação da Equação 3.20, onde h descreve a altura de suspensão dos condutores acima do solo, e r é o raio equivalente do condutor.

$$Z_0 = 60 \ln \left(\frac{2h}{r} \right) \quad (3.20)$$

Como as ondas viajantes de corrente e tensão se movem através da rede de distribuição, elas encontrarão pontos de descontinuidade, locais onde a impedância de surto muda, tais pontos incluem terminações, extremidades abertas, conexão de diferentes cabos, pára-raios, conexão com cabos subterrâneos, transformadores, entre outros. Em tais pontos, estas ondas viajantes são refletidas de volta à origem e transmitidas adiante com polaridades e intensidades que dependem dos valores relativos das impedâncias de surto envolvidas. Mesmo para uma rede de distribuição relativamente pequena, estes processos de reflexão e transmissão podem conduzir ao estabelecimento de um sistema muito complexo de ondas viajantes, que se somam ou subtraem, possivelmente produzindo tensões muito elevadas em alguns locais.

Felizmente estas ondas viajantes são amortecidas rapidamente enquanto se espalham pela rede devido às perdas associadas com a rede de distribuição (resistências), cargas conectadas, pára-raios, abertura de arcos, entre outros fatores que dissipam a energia.

Um ponto a se notar é que os componentes da rede e equipamentos conectados respondem diferentemente aos surtos, estes caracterizados por transitórios oscilatórios impulsivos de alta frequência, muito acima da normal de operação do sistema em $60 \, \text{Hz}$. Reatores e transformadores responderão como capacitâncias e capacitores responderão

como indutâncias a tais transitórios, devido às indutâncias de ligação e capacitâncias dispersas. Para uma primeira aproximação, estes efeitos podem ser modelados usando circuitos de elementos discretos.

3.2.3. Suportabilidade dos Isoladores

Um impulso é caracterizado por uma tensão transitória aperiódica aplicada intencionalmente, que cresce muito rapidamente até o valor de crista e depois decresce mais lentamente até zero. Geralmente é representado pela soma de duas funções exponenciais, ou, por aproximação, por duas triangulares.

Os impulsos são aplicados para verificar a capacidade da isolação do equipamento, ou sistema, suportar um surto, sendo este aplicado em condições laboratoriais que simulam as condições nas quais estará sujeito quando em operação normal, seguindo padrões e procedimentos definidos em normas pertinentes a cada equipamento. O termo impulso deve ser diferenciado do termo surto, o qual define fenômenos transitórios que ocorrem em equipamentos e sistemas elétricos em serviço, fora do controle dos operadores e das condições laboratoriais.

Os impulsos podem ser divididos em impulsos de manobra (ou transitórios de frente lenta) e impulsos atmosféricos (ou transitórios de frente rápida). Os impulsos atmosféricos possuem tempo de frente de até 20 μs , sendo os com tempo superior a este, considerados como impulsos de manobra.

Segundo a norma ABNT NBR 6936 [35], tempo de frente T_f é um parâmetro virtual definido como 1,67 vezes o intervalo de tempo T entre os instantes correspondentes a 30% (ponto A) e 90% (ponto B) do valor de crista. Também, tempo até meio valor, ou tempo de cauda T_c é um parâmetro virtual definido como o intervalo de tempo entre a origem virtual e o instante no qual a tensão atinge a metade do valor de crista, na cauda, onde origem virtual é o instante que precede o tempo correspondente ao ponto de $0,3.T_f$.

Como indicam os nomes, os impulsos atmosféricos possuem parâmetros que simulam a ocorrência de um surto ocasionado por uma descarga atmosférica. Assim como os impulsos de manobra possuem parâmetros para simular a ocorrência de surtos causados, principalmente, pela energização ou chaveamentos no sistema. Onde, pela

ocorrência do fenômeno de ondas viajantes no sistema, com reflexões e transmissões destas nos pontos de descontinuidade, causam o surgimento das sobretensões que podem atingir valores de até quatro vezes a tensão nominal. São caracterizadas por fenômenos eletromagnéticos, com a troca de energia entre as indutâncias e capacitâncias do sistema.

Para sistemas de até 230 kV de tensão nominal, pelos parâmetros elétricos característicos destes sistemas (como baixas capacitâncias e maiores resistências que os sistemas de tensão mais elevada), os surtos atmosféricos possuirão níveis maiores de sobretensão, pois os surtos de manobra serão atenuados pelas resistências e não atingirão grandes valores de sobretensão pelas baixas capacitâncias presentes. Assim sendo, para sistemas de distribuição, os surtos causados por descargas atmosféricas serão preponderantes, causando maiores solicitações à isolação.

Através da análise de vários registros de formas de onda de tensão de surtos atmosféricos, alguns padrões de impulsos de tensão foram estabelecidos para simular a solicitação do dielétrico ocasionado por um surto nos equipamentos e isoladores.

3.2.3.1. IMPULSOS PADRÃO

O impulso padrão normalizado é também conhecido como impulso 1,2/50, ou impulso pleno, este possui tempo de frente, T_f , de 1,2 μ s e tempo de cauda, T_c , de 50 μ s, os quais são padronizados em normas nacionais [35, 37, 39] e internacionais por diversos comitês, como IEEE [38], IEC, CIGRÉ, ANSI, entre diversos outros. Na Figura 3.8 é apresentada a forma de onda do impulso de tensão padronizado, impulso pleno.

A Tabela 3.1 mostra os valores de crista para os impulsos de tensão, em kV, mais comuns em sistemas de distribuição, padronizados pela norma ABNT NBR 6939/2000 [37], em **negrito** estão indicados os valores mais comuns para redes de distribuição em média tensão.

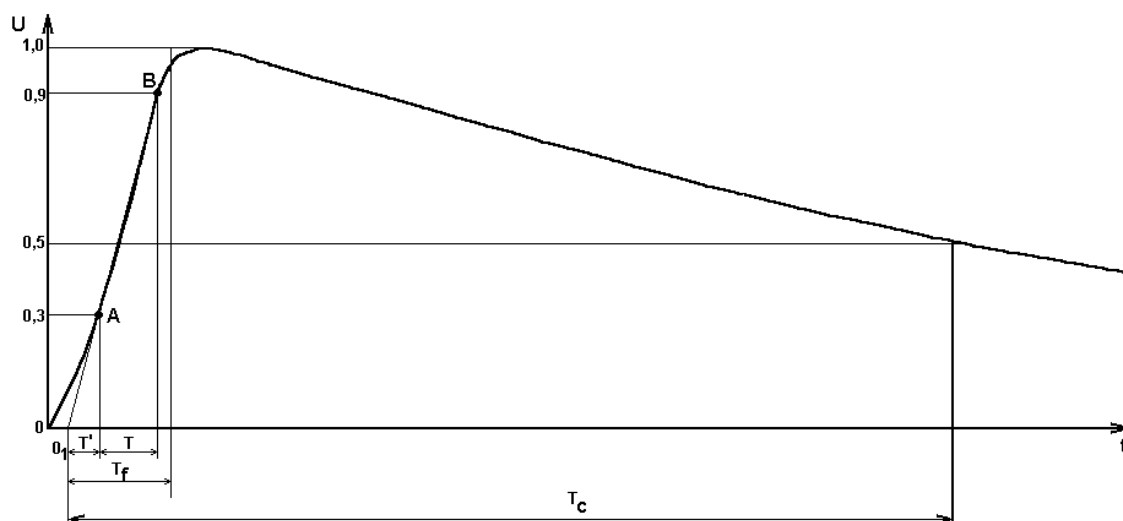


Figura 3.8 – Forma de Onda de um Impulso de Tensão, Conforme NBR 6936

Tabela 3.1 – Níveis de Isolamento Normalizado e Respectivos NBI

Tensão Máxima do Equipamento U_m [kV]	NBI: Tensão Suportável de Impulso Atmosférico [kV]
7,2	40
	60
12	60
	75
	95
15	95
	110
17,5	75
	95
24	95
	125
	145
36	145
	170
	200
52	250
72,5	325
	350

3.2.3.2. IMPULSOS ÍNGREMES

O impulso íngreme é classificado como um impulso atmosférico especial, onde a taxa de crescimento da tensão até o valor de crista é muito elevada.

É, geralmente, utilizado para a realização de ensaios de perfuração elétrica em meios isolantes e simula uma condição onde uma descarga atmosférica severa atinge o

sistema diretamente ou muito próximo de um componente de isolamento, causando a disrupção do isolamento e colapso de tensão.

Na Figura 3.9 (a) é exibido o impulso íngreme (frente de impulso), (b) impulso cortado e (c) impulso pleno. O impulso cortado é definido como a aplicação de um impulso pleno com valor de pico 10% superior ao pleno padronizado, mas com a atuação de um corte para zero após alguns μs de seu pico, da ordem de 2 a 3 μs . Esta forma de onda é utilizada para simular um surto que, ao viajar pelo sistema, atinge um equipamento, sendo que um arco-elétrico é aberto em um isolador, assim a energia é direcionada a terra, provocando o colapso da tensão.

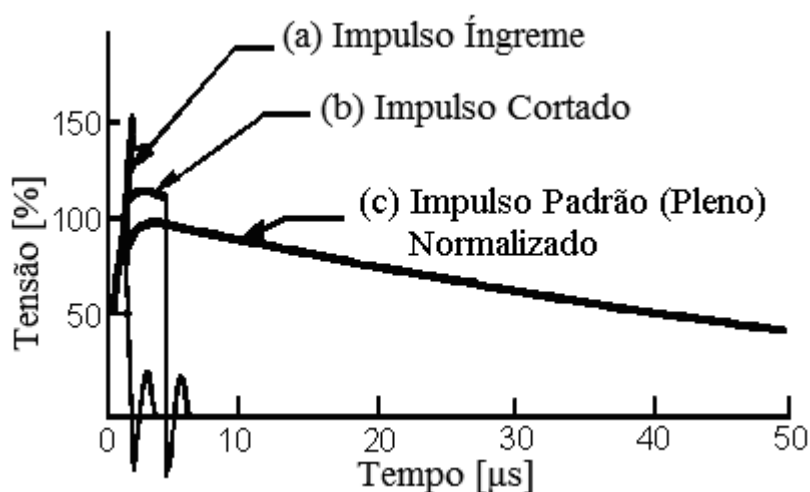


Figura 3.9 – Formas de Onda dos Impulsos Atmosféricos: Íngreme, Cortado e Pleno

3.2.4. Critério das Áreas Iguais – Efeito Destrutivo

Para que ocorra a abertura de um arco elétrico em um meio dielétrico alguns pré-requisitos são necessários:

- ♦ Existência de, no mínimo, um elétron livre para iniciar o processo de ionização;
- ♦ Tensão suficiente para causar a ionização e formar o efeito avalanche;
- ♦ E tempo suficiente para completar o processo de abertura de arco elétrico.

Quando um dielétrico é estressado por um impulso de tensão com certa forma de onda, e possuindo valor de pico superior ao necessário para abertura de arco elétrico,

então este é chamado de impulso de tensão de sobre disparo. Em testes, ao aumentar o valor de pico do impulso, com a mesma forma de onda do impulso pleno não cortado, menor será o tempo necessário até a abertura do arco elétrico.

A abertura de arco ocorre somente quando a tensão aplicada supera a denominada de tensão estática de abertura de arco por um determinado tempo. Temos também outro fator de influência na abertura de arco, que é a taxa de crescimento até o valor de pico, onde, como a forma de onda é mantida padronizada, sempre possuindo o mesmo tempo até a crista, temos que quanto maior o valor de pico, maior será, também, o valor da taxa de crescimento da tensão.

Assim temos que a curva tensão-tempo, a qual apresenta característica intrínseca a um determinado sistema e para uma determinada forma de onda de tensão aplicada. Cada curva tensão-tempo de um sistema deve ser caracterizada pela forma de impulso utilizada e polaridade [9].

Muitos autores tentaram determinar a curva tensão-tempo por cálculos, baseados em suposições através da racionalização física do problema. Testes e validações posteriores mostraram que estas suposições são válidas para um número limitado de casos. Portanto, podemos, dentro de certas condições limitadoras, ter a possibilidade de traçar curvas tensão-tempo diferentes baseadas em uma única medição, de configuração similar, dentro das suposições e limitações.

Dentro desta suposição, temos que a área definida pelo intervalo de tempo entre o pico e o corte provocado pela abertura do arco, e entre os intervalos de tensão entre a estática de abertura de arco e o valor no qual houve o corte e abertura do arco, chamada de área formativa, mantém-se constante mesmo para diferentes formas de onda de tensão aplicada. O que indica o montante de solitação dielétrica necessária para ocasionar a abertura do arco. Esta área formativa pode ser definida pela Equação 3.21 e é mostrada na Figura 3.10 para diferentes casos.

$$F = \int_{t_e}^{t_d} [u(t) - U_e] dt = cte \quad (3.21)$$

Onde:

- ♦ F: área formativa;
- ♦ U_e : tensão estática de abertura de arco;

- ♦ t_e : tempo onde a forma de onda de tensão aplicada supera U_e ;
- ♦ t_d : tempo onde ocorre a abertura do arco elétrico.

Se a área formativa de um sistema é conhecida por medições com uma particular forma de onda, a tensão de abertura de arco pode ser calculada para qualquer outra forma de onda. Para casos com taxa de crescimento da tensão linear, é simples fazer a transposição da área formativa para outra forma de onda, descrito na Equação 3.22.

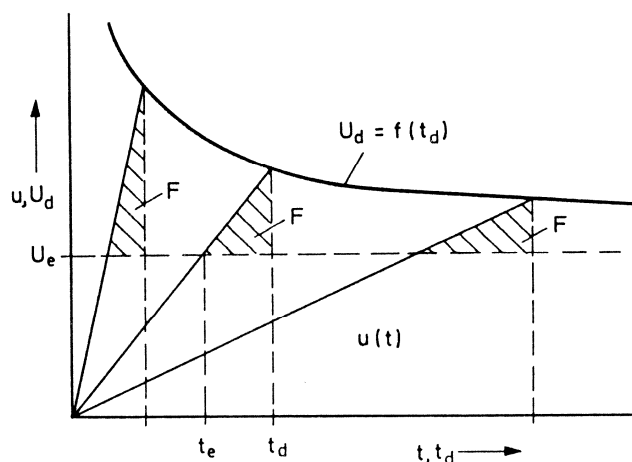


Figura 3.10 – Exemplo de Curva Tensão-Tempo Evidenciando as Áreas Formativas Iguais

$$F = \frac{(U_d - U_e)^2}{2S} \quad (3.22)$$

$$U_d = U_e + \sqrt{2FS}$$

Onde:

- ♦ F : área formativa;
- ♦ U_e : tensão estática de abertura de arco;
- ♦ U_d : tensão onde ocorre a abertura do arco elétrico;
- ♦ S : taxa de crescimento da tensão.

Podemos, partindo-se do Nível Básico de Isolamento (NBI) de um equipamento, o qual define o nível de tensão com 10% de probabilidade de causar falha a este, característica definida e normalizada de todo equipamento elétrico, chegar à tensão estática de abertura de arco.

Tendo, por definição, que o NBI é equivalente ao U_{10} , e utilizando a Equação 3.23, chegamos à Equação 3.24 [34].

$$U_{10} = U_{50}(1 - z\sigma) \quad (3.23)$$

$$U_{50} = \frac{U_{10}}{1 - z\sigma} \quad (3.24)$$

Onde:

- ♦ U_{10} : NBI, nível básico de isolamento, tensão com 10% de probabilidade de causar falha ao equipamento;
- ♦ U_{50} : U_e , tensão estática de abertura de arco, tensão com 50% de probabilidade de causar falha ao equipamento;
- ♦ z : Valor da distribuição normal padronizada para uma dada probabilidade;
- ♦ σ : Desvio padrão.

A partir desta, por definição, temos que o U_e é equivalente ao U_{50} , sendo assim chegamos à Equação 3.25, a qual define a tensão estática de abertura de arco a partir do NBI.

$$U_e = \frac{U_{10}(1 - 3\sigma)}{1 - z\sigma} \quad (3.25)$$

Normalmente z é assumido para o valor de 90% de probabilidade, isto é, utilizando-se uma tabela de distribuição normal, temos que para a probabilidade de 0,9015 o valor de z será de 1,29. Também é assumido, para condições a seco e isolamento em ar, um desvio padrão com o valor de 0,03, definido em norma ABNT NBR 6936/1992 [35]. Substituindo na Equação 3.25, teremos a Equação 3.26.

$$U_e = \frac{NBI(1 - 3 \cdot 0,03)}{1 - (1,29 \cdot 0,03)} = 0,947 \cdot NBI \approx 0,95 \cdot NBI \quad (3.26)$$

Tendo em mão o valor de U_e e um ensaio de impulso de tensão onde houve corte por abertura de arco, é fácil obter a área formativa e , com ela, obter a tensão de abertura de arco para qualquer forma de onda de aplicação de tensão para aquele equipamento.

3.3. Modelos para Sobretensões Frente Descargas Induzidas

3.3.1. O Modelo de Rusck

Um dos modelos mais usados para o cálculo de sobretensões induzidas em linhas aéreas é o modelo de Rusck e suas variações, como o modelo estendido de Rusck. Este modelo difere dos modelos de Agrawal e variações, o que causa diversas discussões e controvérsias no meio científico.

Os modelos baseados em Rusck são escritos em termos de potencial, também, de acordo com Nucci [22], os modelos baseados em Rusck omitem alguns parâmetros, não sendo rigoroso com os limites do modelo de linha de transmissão.

O modelo proposto por Rusck aplica-se a uma linha infinitamente longa, composta por um único condutor aéreo, sobre um solo perfeitamente condutor e sua formulação é capaz de indicar a máxima sobretensão induzida no ponto da linha mais próximo à descarga, segundo a Equação 3.27.

$$V_{\max} = Z_0 \frac{Ih}{d} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{2}} \beta \frac{1}{\sqrt{1-0.5v^2}} \right) \quad (3.27)$$

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

Onde: I é a amplitude de corrente da descarga atmosférica, h é a altura da linha, d é a distância da linha ao ponto de impacto da descarga e β a relação entre a velocidade da descarga de retorno e a velocidade da luz.

Nota-se neste modelo que a formulação inclui não somente o acoplamento entre o campo eletromagnético e a linha, como também o modelo da descarga de retorno para o cálculo do campo eletromagnético irradiado pela descarga.

Também de acordo com Nucci [22], os modelos baseados em Agrawal são os únicos que foram validados por resultados experimentais. Porém, pela sua simplicidade, rapidez de cálculo e razoável aproximação, o modelo de Rusck é ainda hoje largamente utilizado para prever a amplitude de surtos, sendo uma excelente ferramenta de engenharia.

3.3.2. O Modelo LIOV para Solos Perfeitamente Condutores

O código LIOV (*Lightning Induced Over-Voltage*), método de cálculo das sobretensões que são induzidas em uma linha de distribuição aérea, ocasionada por uma descarga atmosférica, desenvolvido em parceria pela Universidade de Bologna, Itália, Instituto Federal de Tecnologia, Suíça, e Universidade de Roma “*La Sapienza*”, Itália, é executado em duas fases subseqüentes.

Na primeira fase, as variações do campo eletromagnético gerado por uma descarga atmosférica de retorno são calculadas em um número de pontos ao longo de uma linha, empregando um modelo de corrente para a descarga de retorno, que descreve a forma da corrente como função da altura e do tempo ao longo do canal vertical. Para esta finalidade, o canal da descarga de retorno é geralmente considerado como uma antena vertical reta.

Em seguida, o campo eletromagnético gerado pela descarga atmosférica (LEMP – *Lightning Electro Magnetic Pulse*) é então avaliado e utilizado para calcular a sobretensão induzida, através de um modelo de acoplamento que descreve a interação entre o campo e os condutores de linha.

O código LIOV é baseado na formulação de acoplamento entre o campo e a linha de transmissão de Agrawal et al. [12], adaptado apropriadamente para o caso de uma linha aérea sobre um solo com perdas. No presente estudo foi utilizada a versão simplificada, disponível no LAT-EFEI (Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá), a qual faz as considerações sobre um solo perfeitamente condutor.

As equações são resolvidas numericamente por uma abordagem de diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD) no qual um esquema de integração de 2ª ordem (FDTD) foi aplicado [13,14] a fim de melhorar a estabilidade numérica do código. Uma rotina específica é executada para calcular o campo eletromagnético originado por uma descarga atmosférica [15], adotando o “Modelo de Engenharia” para a descarga de retorno, MTLE [16,17].

O código LIOV permite o cálculo de tensões induzidas ao longo de uma linha aérea de multicondutores como uma função da forma de onda da corrente da descarga atmosférica (amplitude, tempo de frente e duração), velocidade da descarga de retorno,

geometria da linha (altura, comprimento, quantidade e posição dos condutores), valores das resistências terminais e permissividade relativa.

Um exemplo de comparação entre o cálculo do código LIOV-EMTP completo e medição experimental em campo é apresentado na Figura 3.11, onde foi utilizada uma linha de 270 metros e a descarga atmosférica atingiu o solo a uma distância de 70 metros da linha e 130 metros do início da linha, bem próximo ao meio desta.

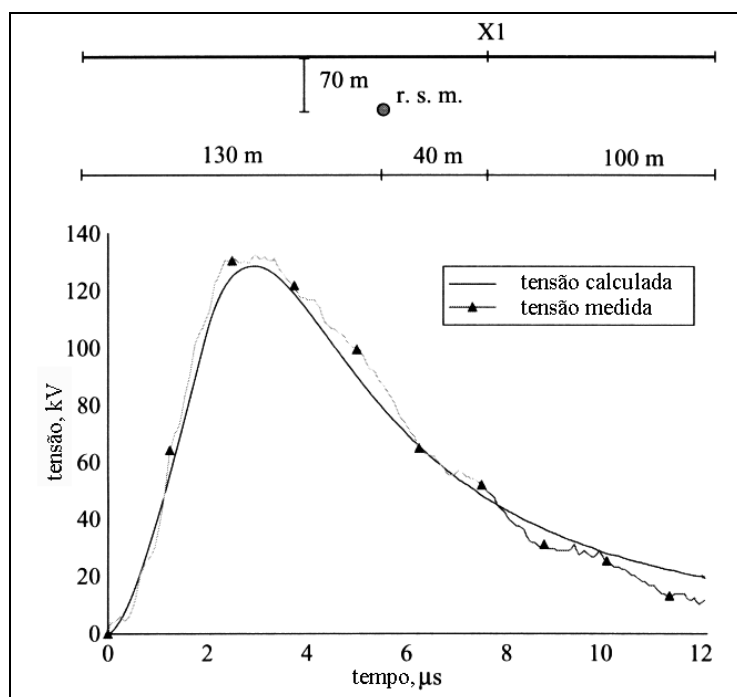


Figura 3.11- Comparativo entre uma Medição Experimental em Campo e o Resultado Calculado pelo Código LIOV-EMTP

3.3.3. O Modelo LIOV – EFEI para Solos Perfeitamente Condutores

O Modelo LIOV-EFEI é um método de cálculo de sobretensões induzidas, este baseado no Código LIOV e adaptado no Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá (LAT-EFEI), sendo desenvolvido e aplicado por Pedro Henrique Mendonça dos Santos [20].

Neste modelo simplificado somente são considerados surtos íngremes e o solo é modelado como sendo perfeitamente condutor. Comentários poderiam ser feitos com relação à precisão do procedimento, porém, como o método maximiza a amplitude das sobretensões induzidas, considera-se que os erros introduzidos compensem as simplificações adotadas, chegando-se a um método de cálculo eficiente e aproximado,

extremamente útil para análises de engenharia, principalmente com relação à coordenação de isolamento e confiabilidade.

Para se definir este modelo simplificado, na forma de uma equação que relacione intensidade de corrente da descarga atmosférica e distância à linha para se obter a amplitude da tensão induzida, foram realizadas simulações utilizando o Método de Monte Carlo. Neste processo, várias simulações foram realizadas, nas quais foi utilizada uma linha monofásica, sobre um solo perfeitamente condutor, com a intensidade e forma da corrente de descarga assumidas como fixas, onde os pontos de impacto não diretos à linha são sorteados aleatoriamente, para, então, o conjunto de dados ser analisado com o Código LIOV Reduzido.

Com base neste procedimento, foram definidas funções que relacionam os valores da intensidade de corrente de descarga e distância do ponto de impacto à linha para a amplitude do surto induzido. Deste modo, as características de surto induzido versus probabilidade de descarga, relacionadas com a suportabilidade estatística do isolamento, definem uma taxa de risco de falha do sistema.

O Modelo LIOV-EFEI buscou determinar os parâmetros “*a*” e “*b*” da Equação geral simplificada 3.28. Porém, ambos os parâmetros variam em função das distâncias envolvidas.

$$U_i = \frac{I_{da}}{a + bD \ln(D)} \quad (3.28)$$

Onde:

- ♦ U_i : Amplitude do surto de tensão induzido na linha, em kV;
- ♦ I_{da} : Intensidade de corrente da descarga atmosférica, em kA;
- ♦ D : Distância perpendicular à linha monofásica para a descarga atmosférica, em metros;
- ♦ a, b : Parâmetros, dependentes de outros fatores, que se buscam determinar por métodos matemáticos e estatísticos baseados nas simulações executadas.

Seguindo os procedimentos descritos em [8, 19, 20], funções matemáticas foram determinadas para os parâmetros “*a*” e “*b*” em função da distância longitudinal à linha para o ponto de impacto da descarga atmosférica, as quais são mostradas nas equações 3.29 e 3.30.

$$a = -0,1019076 - 0,052689553D_2 + 6,3270105 \cdot 10^{-5} D_2^3 + 0,19206525\sqrt{D_2} + 0,15720694e^{-D_2} \quad (3.29)$$

$$b = \frac{1}{1198,3848 + 429,96577e^{-D_2}} \quad (3.30)$$

Esta primeira equação ainda é muito simples e apresenta grandes simplificações. Porém, repetindo-se o mesmo procedimento utilizado para a obtenção dos parâmetros “*a*” e “*b*” e levando-se em conta a variação dos parâmetros das descargas atmosféricas, tempo de frente e intensidade da forma de onda de corrente, foi obtida a equação do Modelo LAT-EFEI, a qual é exibida na Equação 3.31. Esta define a amplitude do surto de tensão induzida para um ponto da linha, o qual se situa mais próximo ao ponto de impacto da descarga atmosférica.

$$U_i = \frac{I_{da}}{\left(\frac{1}{4,282 + 15,511e^{-t_f}} \right) + \left(\frac{1}{2422,079 - 516,694 \ln(t_f) - \left(\frac{376,122}{t_f} \right)} \right)} D \ln(D) \quad (3.31)$$

Onde:

- ♦ U_i : Amplitude do surto de tensão induzido na linha, em kV;
- ♦ I_{da} : Intensidade de corrente da descarga atmosférica, em kA;
- ♦ D : Distância perpendicular à linha monofásica para a descarga atmosférica, em metros;
- ♦ t_f : Tempo de frente da forma de onda da corrente de descarga atmosférica, em μs .

3.3.4. Suportabilidade dos Isoladores - Impulsos Induzidos

Os impulsos induzidos, ocasionados pelo processo de indução eletromagnética a partir de uma descarga atmosférica, possuem tempo de frente mais lento que os impulsos atmosféricos padrão, porém ainda assim mais rápidos que os impulsos de manobra. Possuindo, também, valores de sobretensão menores e tempo de cauda mais curto que o impulso padrão. Contudo ainda não foi definido um padrão para a forma de onda destes, pois ainda são objetos de discussão e estudos por pesquisadores no mundo todo.

Através de simulações, utilizando o Método de Monte Carlo e o código LIOV, formas de onda de impulsos induzidos podem ser obtidas, chegando a uma forma de onda com tempos e amplitudes possíveis de serem utilizadas em ensaios. Com isto a suportabilidade da isolação poderia ser verificada para os casos onde os equipamentos e sistemas estão sujeitos a impulsos induzidos.

Segundo simulações e estudos estatísticos desenvolvidos no LAT-EFEI, Ricardo Guedes de Oliveira Jr. [21] propõe novos parâmetros para as formas de onda de impulsos induzidos, onde, utilizando o padrão de construção típico para redes de distribuição utilizadas pelas concessionárias no Brasil, chega-se aos tempos de frente entre 3 e 4,5 μs , tempo de cauda de 16 μs e amplitudes entre 165 e 185 kV.

3.4. Modelos Estatísticos de Monte Carlo

Para lidar com as incertezas inerentes à análise dos efeitos das descargas atmosféricas em sistemas de distribuição em média tensão, é necessário que se utilize uma análise probabilística, através de uma técnica analítica ou uma simulação estocástica. Porém, uma técnica analítica se torna muito complexa e de difícil emprego, pela alta quantidade de incertezas envolvidas no processo de descarga e acoplamento eletromagnético. Dada esta situação parte-se para uma simulação estocástica através do Método de Monte Carlo, a principal vantagem desta técnica é a sua capacidade para modelar facilmente características complexas associadas com cenários de descarga atmosféricas e modelagem da rede elétrica.

Os Métodos de Monte Carlo são uma classe de algoritmos de computação baseados na repetição de amostragens aleatórias para computar seus resultados. Os

Métodos de Monte Carlo tendem a ser usados quando é impraticável ou impossível computar um resultado exato com um algoritmo determinístico.

Os Métodos de Monte Carlo são técnicas usadas para obter informações sobre o desempenho futuro de sistemas ou processos baseados na amostragem estatística (funções de distribuição) de seu desempenho passado usando números aleatórios. São especialmente úteis para estudar sistemas com um grande número de graus de liberdade acoplados, e também para modelar fenômenos com incerteza significativa nas entradas, tais como o cálculo do risco.

Consistem em construir uma amostra de estados, ou cenários, do sistema para se obter estimativas de índices probabilísticos. Estas amostras dos estados do sistema são obtidas combinando-se os estados, ou cenários, individuais. Para os estudos realizados, foram utilizados tanto para definir as características da descarga atmosférica, como intensidade de corrente e tempo de frente da descarga de retorno, como o ponto de impacto dentro da área total em estudo.

Através da repetição cíclica destas simulações, são obtidos diversos cenários no que se referem a diferentes descargas atmosféricas, impactos diretos à rede ou diferentes graus de acoplamento eletromagnético nos surtos induzidos provocados por descarga indireta.

3.5. Referências

1. “IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines”, IEEE Std 1410-2004, T&D Committee, IEEE Power Engineering Society;
2. William A. Chisholm, John G. Anderson, Ray Lings, “Lightning Protection of Transmission Lines Above 200 kV”, VIII SIPDA (*International Symposium on Lightning Protection*), São Paulo, Novembro 2005;
3. Alberto Borghetti, Carlo Alberto Nucci, Mario Paolone, “Effect of Tall Instrumented Towers on the Statistical Distributions of Lightning Current Parameters and its Influence on the Power System Lightning Performance Assessment”, VII SIPDA (*International Symposium on Lightning Protection*), Curitiba, Novembro 2003;
4. “Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento – Aplicação em Sistemas de Potência de Alta Tensão”, Furnas, 1987;
5. W. Diesendorf, “Insulation Coordination in High-voltage Electric Power Systems”, 1974;
6. “Lightning Protection of Distribution Networks”, The Electricity Council, 1974;
7. “Coordenação de Isolamento”, Curso de Engenharia em Sistemas Elétricos de Potência, Volume 8, Série P.T.I., Convênio Eletrobrás/UFES, 1979;
8. Pedro H. Mendonça dos Santos, Manuel L. B. Martinez, “Estudo de Transitórios Eletromagnéticos; Estudo de Tensões Induzidas em Redes de Distribuição; Guia para a Melhoria do Desempenho de Linhas Aéreas de Distribuição quanto a Descargas Atmosféricas”, Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá e AES Eletropaulo, 2004;
9. Dieter Kind, Kurt Feser, “High Voltage Test Techniques”, Segunda edição, Newnes, 2001;

10. Marco A. M. Saran, Manuel L. B. Martinez, Hermes R. P. M. de Oliveira, “Modelos de Monte Carlo Para Linhas Aéreas de Distribuição em Média Tensão, Urbanas e Rurais, Frente a Descargas Atmosféricas”, XII ERIAC – Encontro Regional Ibero-Americano do CIGRÉ, Foz do Iguaçu, Maio, 2007;
11. Marco A. M. Saran, Manuel L. B. Martinez, Carlo A. Nucci, Mario Paolone, Hermes R. P. M. de Oliveira, “Comparação do Desempenho de Projetos de Linhas de Distribuição para Média Tensão Frente a Surtos Induzidos”, XII ERIAC – Encontro Regional Ibero-Americano do CIGRÉ, Foz do Iguaçu, Maio, 2007;
12. Agrawal A.K., Price H.J., Gurbaxani S.H., “Transient response of a multiconductor transmission line excited by a nonuniform electromagnetic field”, *IEEE Trans. on EMC* 22-2 (1980) 119-129;
13. Paolone M., Nucci C.A., Rachidi F., “A New Finite Difference Time Domain Scheme for the Evaluation of Lightning Induced Overvoltage on Multiconductor Overhead Lines”, V ICPST (*International Conference on Power System Transient*), volume 2, Rio de Janeiro, 2001;
14. Mario Paolone, “Modeling of Lightning-Induced Voltages on Distribution Networks for the Solution of Power Quality Problems, and Relevant Implementation in a Transient Program”, Tese de Ph.D., Universidade de Bolonha, Itália, 2001.
15. Uman M.A., McLain D.K., Krider E.P., “The electromagnetic radiation from a finite antenna”, *American Journal of Physics*, 1975, Volume 43;
16. Nucci C.A., Mazzetti C., Rachidi F., Ianoz M., “On lightning return stroke models for LEMP calculations”, XIX ICLP (*International Conference on Lightning Protection*), Graz, Austria, Abril 1988;
17. Rachidi F., Nucci C.A., “On the Master, Lin, Uman, Standler and the Modified Transmission Line lightning return stroke current models”, *Journal of Geophysical Research* 95, 1990;
18. Carlo A. Nucci, Mario Paolone, “Calculation of Induced Voltages in Medium Voltage Overhead Systems due to Lightning Strokes Using the LIOV Code”, Relatório da segunda fase do projeto de pesquisa com a concessionária AES Sul, Outubro, 2003;
19. Manuel L. B. Martinez, Pedro H. M. dos Santos, “Estudo de Tensões Induzidas em Redes de Distribuição, Guia para Melhoria do Desempenho de Linhas Aéreas de Distribuição quanto a Descargas Atmosféricas”, Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá, Março, 2004;
20. Pedro H. M. dos Santos, “Análise de Desempenho Frente a Impulsos Atmosféricos Induzidos em Circuitos de Média Tensão”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Março, 2007;
21. Ricardo G. de Oliveira Jr., “Tensões Induzidas em Linhas de Média Tensão”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Agosto, 2008;
22. G. Vernon Cooray, “The Lightning Flash”, *IEE Power Series*, Volume 34, 2003;
23. “Transmission Line Reference Book”, Segunda Edição, EPRI – Electric Power Research Institute, 1982;
24. E. Kuffel, W. S. Zaengl, J. Kuffel, “High Voltage Engineering - Fundamentals”, Segunda Edição, Newnes, 2000;
25. Miriam Dora Chávez Lope, “Análise Probabilística de Variações de Tensão de Curta Duração em Redes de Distribuição”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Maranhão, 2005;
26. N. Metropolis, S. Ulam, “The Monte Carlo Method”, *Journal of the American Statistical Association*, volume 44, número 247, 1949;
27. C.P. Robert, G. Casella, “Monte Carlo Statistical Methods”, Segunda edição, Springer-Verlag, 2004;
28. Allan Greenwood, “Electrical Transients in Power Systems”, Segunda edição, John Wiley & Sons, 1991;
29. Lou van der Sluis, “Transients in Power Systems”, John Wiley & Sons, 2001;
30. Vic Smith, Venathanar Llango, Sarath Perera, Vic Gosbell, Duane Robinson, “Transient Overvoltages on The Electricity Supply Network – Classification, Causes and Propagation”, Nota Técnica 8, Centro de Confiabilidade e Qualidade de Energia, Universidade de Wollongong, Austrália, 2005;
31. J. R. Lucas, “High Voltage Engineering”, Universidade de Moratuwa, Sri Lanka, 2001;
32. L. V. Bewley, “Traveling Waves on Electric Power Systems”, Universidade de Lehigh, EUA, 1942;
33. John G. Anderson, Thomas A. Short, “Algorithms for Calculation of Lightning Induced Voltages on Distribution Lines”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Volume 8, Número 3, Páginas 1217-1225, Julho, 1993;
34. Nunziante Graziano, “Análise de Confiabilidade e Melhoria da Taxa de Falhas para Cubículos Classe 15 kV”, Dissertação de Mestrado, USP, 2006;
35. Norma Brasileira NBR 6936/1992, “Técnicas de Ensaio Elétricos de Alta-Tensão”, Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT, 1992;
36. João Mamede Filho, “Manual de Equipamentos Elétricos”, Terceira Edição, LTC, 2005;
37. Norma Brasileira NBR 6939/2000, “Coordenação do Isolamento - Procedimento”, Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT, 2000;
38. Norma IEEE Std. C57.12.90-1999, “Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers”, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., IEEE, 1999;
39. Andrew R. Hileman, “Insulation Coordination for Power Systems”, Marcel Dekker Inc., 1999;

40. Luigi Paris, "Influence of Air Gap Characteristics on Line-to-Ground Switching Surge Strength", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, S.I., v. 86, n. 8, p. 936-947, 1967;
41. Luigi Paris, R. Cortina, "Switching and Lightning Impulse Discharge Characteristics of Large Air Gaps and Long Insulator Strings", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, S.I., v. 87, n. 4, p. 947-957, 1968;
42. C. F. Wagner, G. D. McCann, "Induced voltages on transmission lines", AIEE (*American Institute of Electrical Engineers*), Transactions 61, 916-930, 1942;
43. H. R. Armstrong, E. R. Whitehead, "Field and Analytical Studies of Transmission Lines Shielding", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, PAS-87, p. 270-281, 1968;
44. C. F. Wagner, A. R. Hileman, "A new approach to the calculation of the lightning performance of transmission lines – Part III," AIEE Trans. Part III, vol. 79, n. 3, p. 589-603, 1960;
45. C. F. Wagner, "Relation between stroke current and velocity of the return stroke", AIEE Trans., pt. III, vol. 82, p. 606–617, 1963;
46. I. A. Metwally, F. H. Heidler, R. Nickel, "Computation of Collection Area and Probability of Lightning Strikes to Structures Using the Electrogeometric Model", VIII SIPDA (*International Symposium on Lightning Protection*), São Paulo, 2005;
47. E. R. Love, "Improvements on Lightning Stroke Modeling and Applications to the Design of EHV and UHV Transmission Lines", Dissertação de Mestrado, Universidade do Colorado, 1973;
48. "Protection of MV and LV Networks against Lightning", Joint CIGRE-CIRED Working Group C4.4.02, 2005;

Capítulo IV

“O pensamento faz a grandeza do homem.”
Blaise Pascal

4.1. Modelagem dos Sistemas de Média Tensão

A análise do desempenho dos sistemas de média tensão frente às descargas atmosféricas é muito dependente do seu modelamento. Quanto mais o modelo se aproxima da realidade dos sistemas, mais próximos os resultados da simulação se aproximam dos valores reais, porém um modelo muito completo se torna dispendioso e complexo pela quantidade de informações necessárias, às vezes de difícil obtenção e do tempo de processamento, pela dificuldade da solução.

Para tanto se busca um equilíbrio entre a aproximação do modelo e o erro dos resultados. Neste estudo optou-se por utilizar a topologia real dos sistemas de distribuição, através do uso de banco de dados georeferenciados, desenho automático e simulação pelo Método de Monte Carlo. Porém, algumas simplificações tiveram que ser tomadas a fim de se reduzir a complexidade e a quantidade de informações requeridas da topologia real. Logo, foi utilizada uma área plana, ou seja, sem as informações de topografia e as estruturas elevadas reais presentes, como torres, edificações e árvores, não foram consideradas automaticamente, sendo somente simuladas através da inclusão manual de pontos elevados.

A opção pela adoção da simplificação de considerar que todo o alimentador esteja em uma área plana, além de somente contar com a inclusão manual de pontos elevados, foi tomada principalmente pela dificuldade e complexidade de obtenção e tratamento dos dados de elevação do terreno e posicionamento das estruturas elevadas em meio digital. Item este necessário para que as rotinas pudessem ser implementadas sem considerar tais simplificações.

Estas simplificações tomadas levam a um número muito maior de incidência de interceptações diretas de descargas atmosféricas pelos circuitos de distribuição, sendo, então, um resultado superestimado para o pior caso. Contudo através da inclusão manual de estruturas elevadas, vários casos diferentes podem ser simulados, desde uma blindagem natural da rede até um alto grau de blindagem, com um alto índice de surtos induzidos.

4.1.1. Banco de Dados e Desenho Automático das Redes de Média Tensão

Com o intuito de obter uma melhor aproximação dos modelos de redes de distribuição para as condições reais existentes, foram cedidos pela concessionária AES Sul Distribuidora Gaúcha de Energia, através de um projeto de pesquisa e desenvolvimento visando à confiabilidade da distribuição, partes de seus diversos bancos de dados de informações de suas redes de distribuição para a simulação de uma rede real.

Nestes bancos de dados encontram-se cadastrados todas as informações relevantes aos equipamentos do sistema, incluindo o seu posicional em quatro coordenadas. Sendo uma latitude e longitude para o ponto de conexão de entrada, ou inicial, do equipamento e uma latitude e longitude para o ponto de conexão de saída, ou final, do equipamento.

Estes bancos possuem dados das estruturas, transformadores, chaves, pára-raios, cabos, entre diversos outros equipamentos. Ou seja, informam todo o passivo da companhia que está instalado em um determinado circuito do sistema de distribuição, a sua localização, especificações e características.

Estas informações eram armazenadas em bancos de dados relacionais na plataforma de gerenciamento Oracle, os quais concentravam todas as informações da companhia, sendo as consultas realizadas através da linguagem SQL (*Structured Query Language*), uma poderosa ferramenta para recolher informações de bancos de dados de um modo eficiente e simples.

A grande vantagem do SQL consiste no fato de a consulta focar o resultado e não o caminho de obtenção dos dados, trabalho este realizado pelo gerenciador do

banco de dados, no caso em questão, o Oracle. Atualmente os bancos de dados da empresa passaram por uma modernização e contam com o sistema ArcGIS, plataforma otimizada para informações georreferenciadas. Um exemplo de código SQL pode ser visto na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Exemplo de código de consulta SQL

```
SELECT nome FROM pessoas;
SELECT
  aP.
  aP.nome,
  aP.data_nascimento,
  aO.nome,
  aO.local
FROM pessoas aP,objetos aO,
WHERE
  aP.codigo = aO.codigo_pessoa and
  aP.codigo = (
    SELECT codigo_pessoa FROM catalogo
    WHERE cod_catalogo = 5
  );
```

Como as informações pertinentes às análises e modelamento das redes estão divididas em diversas tabelas diferentes, é necessário correlacioná-las para se obter um conjunto completo de informações relevantes ao sistema de distribuição, como as tabelas de posicionais, especificações, características, matrícula, circuito, entre outras; tarefa esta realizada com facilidade ao se montar uma estrutura de consulta SQL completa. Logo, um programa computacional para realizar esta tarefa foi desenvolvido.

Finalizadas as consultas ao banco da empresa, versões locais dos bancos de dados são criadas. Estas versões locais são otimizadas por circuito de distribuição, possuindo todas as informações importantes para a análise e modelagem daquele circuito e, para simplificação das consultas, utilização e armazenamento, são armazenadas em bancos de dados no formato do Microsoft Access.

Os bancos de dados em Microsoft Access não são tão eficientes e poderosos em termos de desempenho, recursos e capacidades como um banco de dados Oracle. Porém, para pequenos bancos de dados e na questão da interface de programação, ele é de uso mais simplificado e direto.

Concluído o banco de dados local e, portanto, estando disponíveis todas as informações georreferenciadas dos equipamentos, para a modelagem dos circuitos de distribuição é preciso uma rotina de interpretação destas, pois os bancos de dados não

possuem informações sobre a interconexão dos equipamentos, somente o posicional. Sendo assim, um extenso programa computacional foi desenvolvido para executar a interpretação dos dados e fornecer um meio de utilizá-los e tratá-los com maior facilidade e simplicidade.

Neste programa, uma rotina de montagem foi elaborada com o intuito de analisar os dados, principalmente a informação de posicional para, com isso, definir a interligação dos equipamentos. Ao final desta rotina é gerada uma matriz de informações de interconexão. Estas informações são então armazenadas em uma nova tabela do banco de dados local, somente sendo exigida uma nova execução da rotina de montagem se ocorrer alguma atualização do banco de dados original.

Nesta rotina de interligação todos os posicionais diferentes são definidos como nós e os itens do banco de dados são analisados, identificando as ligações destes aos respectivos nós. Finalizada esta identificação, são, então, mapeados os ramos de interconexão dos nós, ou seja, são definidas as ligações dos equipamentos. Outra rotina então é executada para identificar o sentido do fluxo de potência, ou seja, a identificação do sentido fonte-carga de todos os ramos.

Com isso, são geradas duas matrizes:

1. Matriz de Nós (ou Barras): Armazenando o posicional, equipamentos ligados e informações pertinentes ao nó;
2. Matriz de Ramos: Armazenando os nós inicial e final, e as informações pertinentes ao equipamento que compõe o ramo.

Terminado este primeiro processamento dos dados já é possível traçar graficamente todo o circuito de distribuição em tela para consulta e algumas simulações. Nesta tela é possível verificar com facilidade por uma codificação de ícones e cores os diferentes equipamentos, conexões e, através do pressionar do ponteiro de indicação, uma tela de informações e características principais do equipamento indicado é exibida. A Figura 4.1 mostra um exemplo de topologia traçada pelo programa desenvolvido.

Esta metodologia foi desenvolvida, primeiramente, para o programa PCA de análise de confiabilidade de alimentadores de distribuição [16-19]. Este foi desenvolvido pelo Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá em

parceria com a concessionária AES Sul Distribuidora Gaúcha de Energia e a empresa de consultoria Consulte Engenharia Ltda., no qual participei intensivamente, sendo um dos principais desenvolvedores.

A partir do conhecimento adquirido com o desenvolvimento da metodologia e rotinas do programa de análise de confiabilidade de alimentadores, foi formada a base para que, com algumas alterações, adaptações e expansão, fosse possível desenvolver uma nova metodologia e rotinas ao ponto de permitir a análise da coordenação de isolamento dos alimentadores frente a descargas atmosféricas.



Figura 4.1 – Exemplo de topologia de um circuito real de distribuição em média-tensão urbano

4.1.2. Modelagem Monofásica e os Surtos Incidentes às Redes de Média Tensão

Os sistemas de distribuição em média tensão são em sua grande maioria trifásicos, exigindo-se então uma análise dos surtos de cada fase independentemente. Contudo, pela distância relativa entre os cabos ser pequena e considerando o acoplamento eletromagnético das fases, os efeitos de surtos provocados por descargas atmosféricas são compartilhados pelas três fases com pequenas diferenças. Fato este comprovado por simulações e estudos realizados para a concessionária AES Sul [03-08], como pode ser observado na Tabela 4.2, onde são mostrados os níveis de

sobretensão por indução devido à descarga atmosférica para as três fases, considerando um circuito trifásico para o cálculo em diferentes casos de simulação.

Sendo assim, para se atingir uma maior velocidade de análise e menor complexidade de modelagem, é utilizada uma modelagem monofásica dos circuitos, a qual é uma aproximação válida, resultando em um processo de análise mais rápido e menos dispendioso.

Os efeitos dos surtos nas redes de distribuição são muito dependentes da intensidade de corrente da descarga, velocidade da descarga de retorno e ponto de impacto. Os dois primeiros parâmetros são relativos à descarga atmosférica em si, e, portanto, aleatórios, já o ponto de impacto é um grande fator para o cálculo das sobretensões geradas.

A Tabela 4.2 exibe os valores de pico das tensões dos surtos induzidos por descargas atmosféricas em uma rede padronizada para os três condutores da média tensão, onde cada caso representa uma distância do ponto impacto da descarga atmosférica ao ponto de indução, sendo o caso 1 o mais próximo e o caso 10 o mais distante. Assim, exemplificando a pouca influência de uma análise trifásica sobre uma monofásica e a influência da distância sobre a indução do surto.

Tabela 4.2 - Exemplo de cálculo para as simulações de sobretensões em um circuito trifásico

Sobretensões Induzidas [kV]			
Caso	Fase A	Fase B	Fase C
1	49.60	48.80	49.60
2	24.70	24.50	24.70
3	15.00	14.60	15.00
4	9.12	9.00	9.12
5	5.58	5.52	5.58
6	2.88	2.88	2.88
7	1.74	1.56	1.74
8	0.78	0.72	0.78
9	0.48	0.48	0.48
10	0.18	0.18	0.18

Para impactos diretos à rede, onde a descarga atmosférica é interceptada completamente pela rede, temos os piores efeitos, resultando quase sempre em danos permanentes, como queima ou destruição de equipamentos, acessórios, cabos e/ou estruturas, podendo chegar até a morte de pessoas. Este tipo de surto é de difícil proteção, onde, pelas intensidades e tempos dos surtos, os equipamentos de proteção,

como os pára-raios, não são capazes de drenar toda a energia, ficando o equipamento sujeito a elevados níveis de sobretensões.

Porém as interceptações diretas às redes podem ser desviadas por estruturas elevadas próximas, entenda-se estrutura elevada como quaisquer objetos altos o suficiente para atrair a descarga e desviá-las das redes, como árvores, construções, torres, entre outras. Ou então a interceptação direta pode ser evitada com o uso de blindagem das redes, como o uso de cabos guarda superiores às fases, o qual tem o objetivo de interceptar e drenar a descarga para que esta não atinja as fases. Porém, em ambas as situações, não são evitadas as induções eletromagnéticas, contudo as intensidades das sobretensões dos surtos são reduzidas significativamente, pois toda a energia da descarga foi drenada em um ponto fora do sistema, sendo a sobretensão ocasionada por acoplamento eletromagnético.

Um método muito difundido e utilizado para se analisar o ponto de impacto da descarga é o Modelo Eletrogeométrico, detalhado no capítulo III, onde, a partir da intensidade da corrente da descarga é calculado um raio de atração. Onde a descarga ao cruzar um destes raios será este o ponto de impacto, facilmente identificando o ponto de impacto das descargas, diferenciando as interceptações diretas dos surtos por indução eletromagnética gerados pela descarga atmosférica, além de fornecer informações para o cálculo dos surtos provocados.

4.2. Simulações de Desempenho

Uma área da superfície do globo é atingida aleatoriamente por descargas atmosféricas e a quantidade destas que atingem o solo segue um padrão regional, definido pela topografia, clima, solo, latitude e época do ano. Sendo assim, para uma simulação se aproximar mais dos resultados nas condições reais, utilizam-se simulações com base no Método de Monte Carlo e análises probabilísticas.

Cada simulação de desempenho é executada sobre uma grande área, a qual engloba 100% do circuito de distribuição, porém não maior que este, sendo possível até a simulação de um conjunto de circuitos, que pode, inclusive, misturar partes de redes tipicamente urbanas, uniformes e de maior densidade, com partes de redes rurais, mais dispersas e disformes. Nesta área total, e com base no número de descargas ao solo por quilômetro quadrado por ano (km^2/ano), característica regional ou média, utiliza-se o

Método de Monte Carlo para simular mais de 100 anos de descargas atmosféricas. Estas simulações geram uma enorme massa de dados que podem ser analisadas estatisticamente e gerar dados mais confiáveis para os estudos necessários.

É também através de um sorteio aleatório que se define a posição de descida provável da descarga, em seguida passa-se à definição aleatória da intensidade de corrente desta, a qual segue uma distribuição log-normal com valor médio de 31 kA e a correlacionada velocidade da descarga de retorno, como mostrado no capítulo II. Após estas definições do ponto de descida e intensidade de corrente é iniciada a verificação do raio de atratividade, segundo o Modelo Eletrogeométrico, o qual define se aquela descarga atingirá alguma estrutura, a rede ou o solo, conforme visto no capítulo III. A Figura 4.2 exibe o histograma das intensidades de corrente da descarga atmosférica sorteadas para o caso de 256.000 simulações, mostrando em azul a aproximação com a distribuição log-normal, onde a intensidade de corrente com probabilidade de 50% encontrada foi de 31,45 kA, o valor com probabilidade de 90% foi de 13,70 kA e o valor com probabilidade de 10% foi de 72,20 kA.

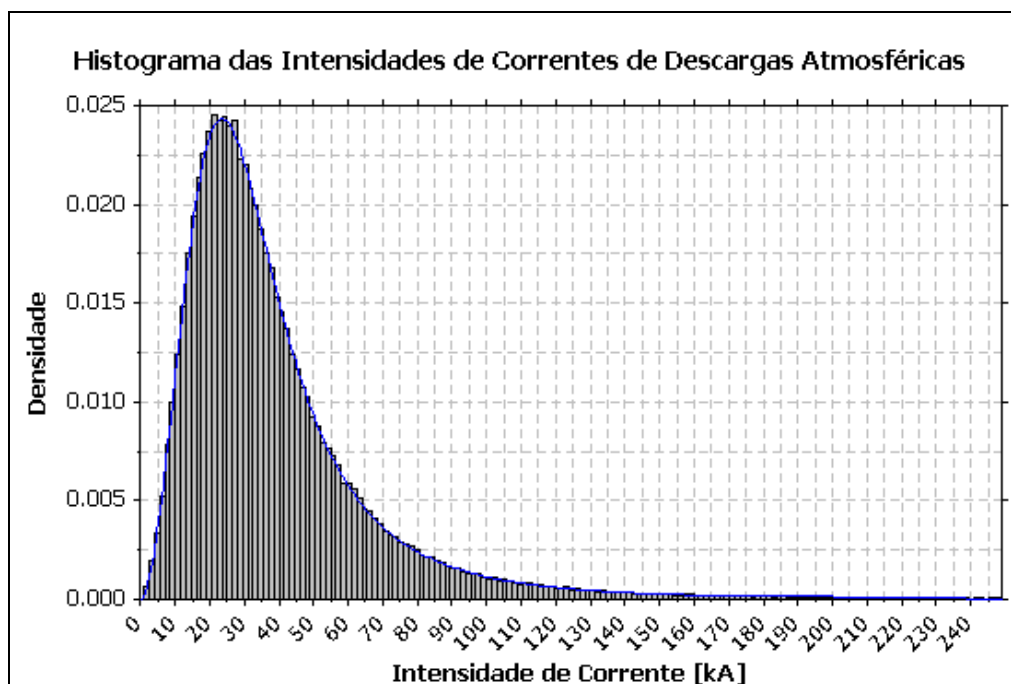


Figura 4.2 - Histograma das Intensidades de Corrente de Descarga Atmosférica

Com o ponto de impacto, intensidade de corrente e tempo de frente da descarga atmosférica definidos, pode-se passar ao cálculo das sobretensões que estarão presentes nas linhas. Para uma descarga de interceptação direta, essas sobretensões seguem os parâmetros de onda viajante e impedância de surto da linha, sendo distribuída metade

para cada lado da linha no ponto de impacto. Já para uma sobretensão por indução, é necessário que se façam os cálculos da distância do ponto de impacto ao ponto mais próximo da rede e dos campos eletromagnéticos, a fim de se verificar o montante de sobretensão que irá ser induzido na linha.

O método utilizado para o cálculo de sobretensões induzidas foi o código LIOV-EFEI, este baseado no código LIOV (*Lightning Induced Over-Voltage*) desenvolvido na Universidade de Bolonha e adaptado, com simplificações e adaptações, pelo Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá, como descrito no capítulo III [01, 02, 04-08].

4.2.1. Análise e Comparação dos Resultados

Considerando a simplificação onde não são consideradas a topografia e a presença de estruturas elevadas, na área do circuito de distribuição sob análise, os resultados das simulações de uma rede urbana e rural se diferenciam muito pouco.

A principal diferença, neste caso, entre as redes rurais e urbanas é que, pelas redes urbanas possuem uma maior densidade de ramais e linhas por uma área menor, o número de intercepções por descargas atmosféricas, diretas ou induzidas é maior. Porém os resultados estatísticos em termos de correntes e sobretensões são praticamente os mesmos.

Entretanto, ao se utilizar do método de simulações de estruturas elevadas em diferentes padrões, é evidente o decréscimo da quantidade de descargas atmosféricas que interceptam a rede diretamente. De fato, a presença de estruturas elevadas próximas às redes exerce um maior ou menor grau de blindagem destas às intercepções diretas.

Para o caso de uma região metropolitana, de alta concentração de construções, torres, edifícios e outros tantos pontos elevados, o nível de intercepções diretas da rede é extremamente baixo. Contudo, em alguns casos de baixa probabilidade, as sobretensões induzidas podem atingir valores muito elevados, isso ocorre quando uma descarga atmosférica de alta intensidade de corrente atinge um ponto muito próximo à rede e, logo, provoca um surto induzido de intensidade muito elevada.

Para as simulações foram utilizadas três topologias diferentes dos circuitos de distribuição em média tensão:

1. Rede urbana com 22,28 km² de área total e 100,62 km de comprimento total, sendo composta por três circuitos de distribuição em média tensão de uma subestação, Figura 4.3;
2. Rede rural com 323,85 km² de área total e 138,83 km de comprimento total, sendo composta por um único circuito de uma subestação, Figura 4.4;
3. E, por fim, a mesma rede urbana do item 1, porém considerando a presença de estruturas elevadas simuladas, pontos verdes na Figura 4.5, com espaçamento médio aproximado de 20 m para a rede e 70 m entre estruturas, simulando uma área de média concentração de estruturas elevadas.

Todo o tratamento estatístico, assim como a obtenção dos histogramas, foi executado no programa para fins estatísticos Minitab versão 14. Pacote estatístico inicialmente desenvolvido pela Universidade Estadual da Pensilvânia, EUA, em 1972, sendo hoje uma versão reduzida do pacote OmniTab, um programa de análises estatísticas do NIST (*National Institute of Standards and Technology*), uma agência não regulatória norte-americana de padrões e tecnologias.



Figura 4.3 - Topologia da Rede Urbana de Distribuição em Média Tensão



Figura 4.4 - Topologia da Rede Rural de Distribuição em Média Tensão

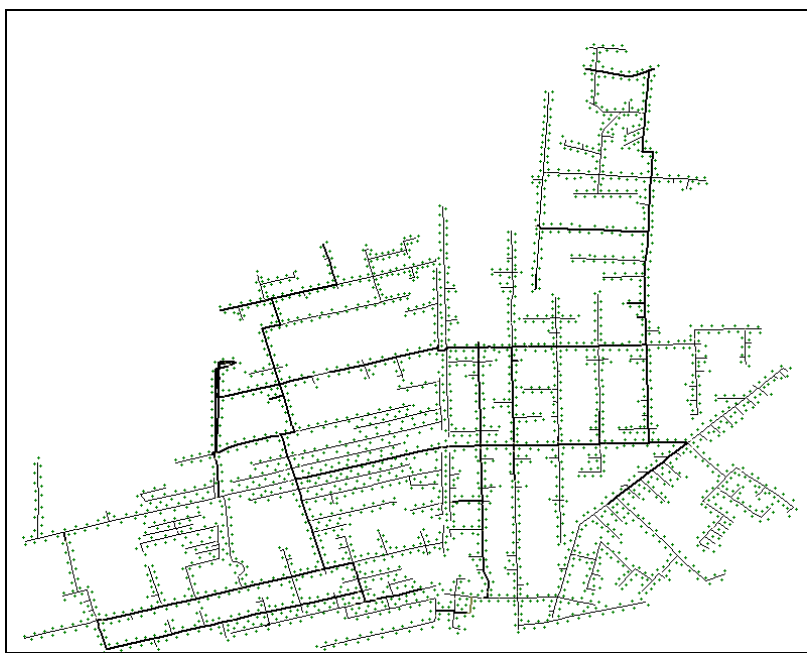


Figura 4.5 - Topologia da Rede Urbana Simulando Estruturas Elevadas

4.2.1.1. REDE RURAL

A rede rural, caso 2, por possuir uma área bem maior que a urbana, necessitou de uma quantidade maior de simulações de descargas atmosféricas. No total foram simuladas 707.214 descargas, o equivalente a 364 anos para o caso de uma taxa média de 6 descargas ao solo/km².ano e 323,85 km² de área total. Destas somente 4,34% foram de interceptação direta pela rede.

O baixo índice de intercepções diretas não se deve à presença de estruturas elevadas ou topografia, mas sim pela distribuição esparsa do circuito por uma área muito grande, levando a uma menor probabilidade de intercepção pela rede de uma descarga atmosférica.

Para as 30.693 descargas de intercepção direta foi obtido o histograma de distribuição de intensidades de corrente mostrado na Figura 4.6, destaque para a aproximação à distribuição log-normal em azul. O valor das intensidades de corrente com 50% de probabilidade foi de 40,24 kA, com probabilidade de 90% foi de 16,66 kA e com probabilidade de 10% foi de 97,22 kA.

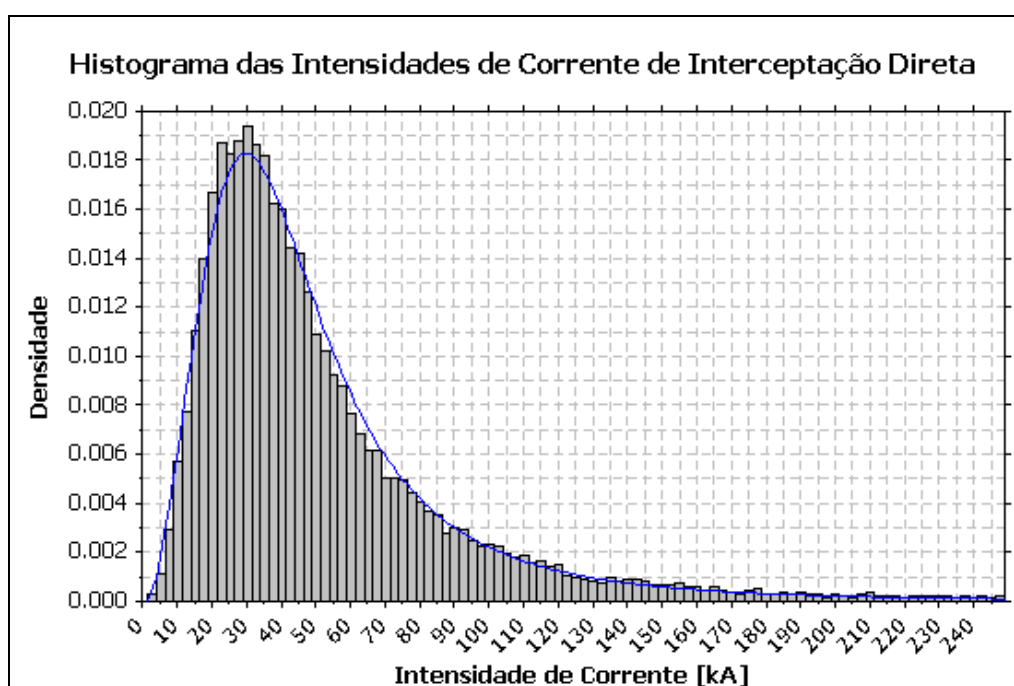


Figura 4.6 - Histograma das Intensidades de Correntes de Descarga Atmosférica de Intercepção Direta

No caso das descargas que não interceptaram a rede diretamente, ou seja, as 676.521 ocorrências geraram o histograma das sobretensões que foram induzidas na rede, como pode ser visto na Figura 4.7. Destaque neste caso para os baixos valores encontrados, fato causado pelas grandes distâncias encontradas, e a aproximação com uma distribuição log-normal, em azul na figura, onde o valor de sobretensão com probabilidade de 50% de ocorrência se situou em 6,46 kV, com probabilidade de 90% em 1,28 kV e com 10% em 32,61 kV.

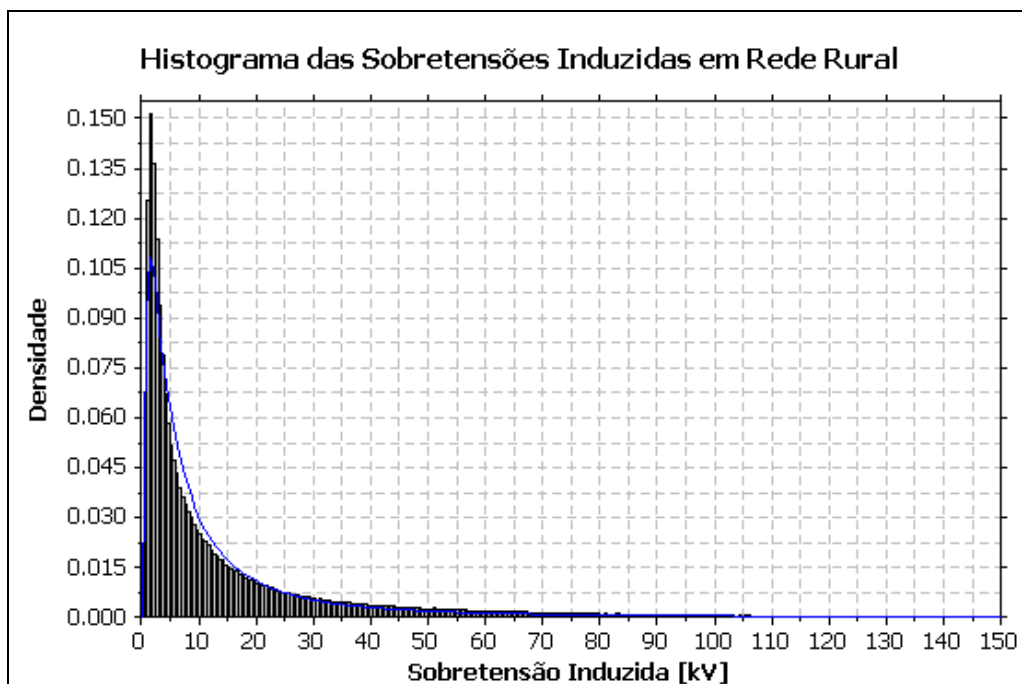


Figura 4.7 - Histograma das Sobretensões Induzidas na Rede Rural por Descargas Atmosféricas

4.2.1.2. REDE URBANA

No primeiro caso, ou seja, da rede urbana sem a presença de estruturas elevadas, foram simuladas um total de 286.237 descargas atmosféricas, o que é equivalente a 2.141 anos de descargas atmosféricas à rede, considerando a área total dos circuitos de 22,28 km² e uma taxa média regional de 6 descargas ao solo/km².ano, portanto, 133,68 descargas/ano para este sistema. Deste total de descargas, foram 95.392 descargas que interceptaram diretamente a rede, onde a corrente com 50% de probabilidade de ocorrência é de 38,14 kA, 90% de probabilidade é de 16,81 kA e de 10% de probabilidade de 86,53 kA, como pode ser visto na Figura 4.8, destaque para a aproximação da distribuição log-normal em azul.

As outras 190.845 descargas não atingiram a rede. Notar que este número representa mais que o dobro do número de descargas de interceptação direta. Sendo o fator gerador de um maior ou menor nível de sobretensão por indução eletromagnética, dependente do tempo de frente da descarga de retorno e da distância efetiva à rede.

A Figura 4.9 representa o histograma das sobretensões no ponto de indução da rede. A identificação da distribuição através do método de aderência não encontrou uma distribuição que se assemelhasse bem com o histograma das sobretensões induzidas traçado, devido a não uniformidade do histograma. Sendo assim, foi utilizada a

distribuição que obteve o melhor desempenho no teste de aderência, neste caso a distribuição de Weibull tri-paramétrica.

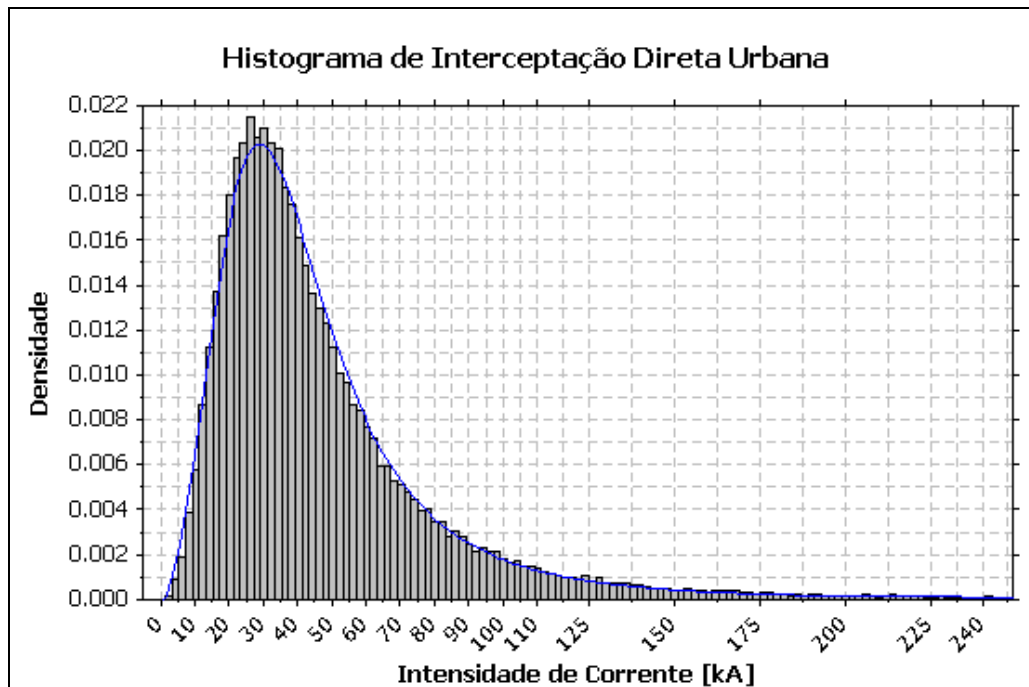


Figura 4.8 - Histograma das Intensidades de Corrente de Descarga Atmosférica de Interceptação Direta à Rede Urbana

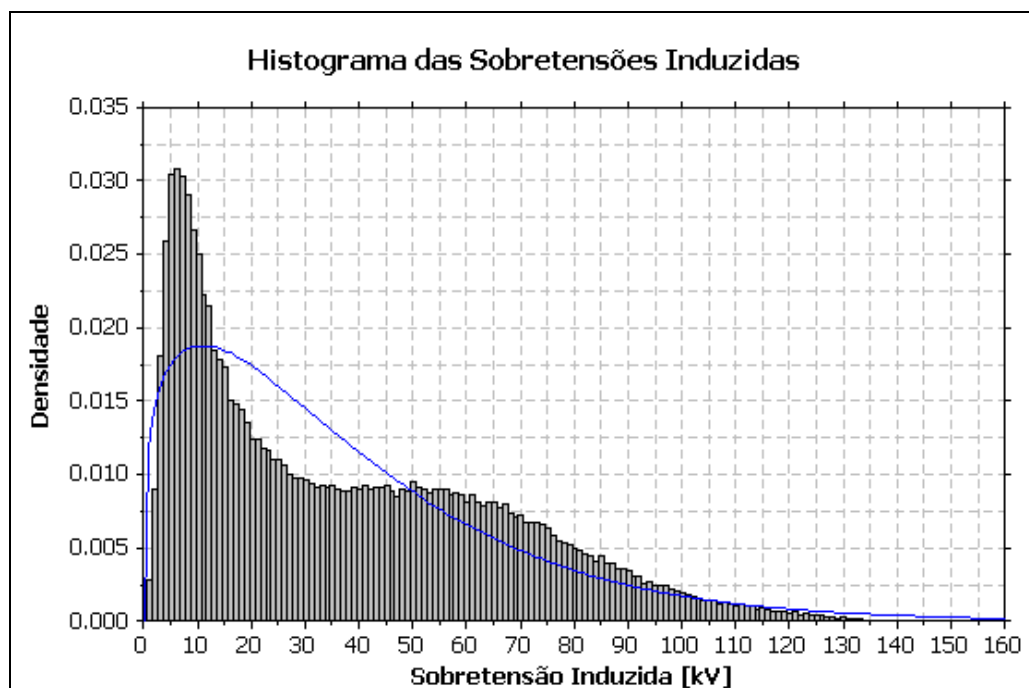


Figura 4.9 - Histograma das Sobretensões Induzidas à Rede Urbana por Descargas Atmosféricas

Identificada após teste de aderência com 14 distribuições, onde o valor de intensidade de sobretensão com probabilidade de 50% de ocorrência ficou em 29,49 kV, a probabilidade de 90% em 6,46 kV e a probabilidade de 10% em 77,62 kV.

Os valores máximos e mínimos foram semelhantes aos encontrados no caso anterior, rural, porém, como pode ser observada, a grande maioria dos casos de sobretensão para a rede rural se situou abaixo dos 30 kV.

A distribuição de Weibull é uma distribuição de probabilidades contínuas, sendo uma das mais usadas para estudos de tempo de vida de equipamentos e estimativa de falhas. É uma distribuição versátil, a qual pode contemplar características de casos também compatíveis com a distribuição Normal ou a Exponencial. A função densidade de probabilidade do caso mais geral desta distribuição, a tri-paramétrica, é definida pela Equação 4.1.

$$f(T) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{T - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{T - \gamma}{\eta} \right)^\beta} \quad (4.1)$$

Onde:

- η = Parâmetro de escala (*scale*);
- β = Parâmetro de forma (*shape* ou *slope*);
- γ = Parâmetro de posição (*location*).

Freqüentemente, o parâmetro de posição não é utilizado, e o seu valor pode ser considerado como zero. Quando temos esse caso, a função densidade de probabilidade se reduz para a distribuição Weibull bi-paramétrica. Há também o caso onde se pode reduzir à distribuição Weibull mono-paramétrica. De fato, esta toma a mesma forma da função densidade de probabilidade Weibull bi-paramétrica, com a única diferença sendo o valor de β suposto de antemão. Esta suposição significa que somente o parâmetro de escala precisa ser estimado, possibilitando uma análise com poucos dados.

4.2.1.3. REDE URBANA COM SIMULAÇÃO DE PRESENÇA DE ESTRUTURAS ELEVADAS

Para aproximar a simulação do circuito urbano ao caso real de uma área urbana, é necessário levar em consideração a presença de estruturas elevadas, como árvores, edificações, construções, torres, entre outras.

Porém, pela complexidade de obtenção de dados em meio digital, foram utilizadas simulações para a presença destas estruturas elevadas onde é preciso que o

operador inclua manualmente pontos na topologia da rede, os quais simulam pontos elevados e atraem as descargas atmosféricas, desviando-as das redes, por conseguinte, fornecendo à mesma um efeito de blindagem.

Testes feitos com duas configurações para as simulações de estruturas elevadas, na primeira as estruturas são incluídas com espaçamento médio de 10 m para a rede e com 40 m entre duas estruturas consecutivas, onde foi alcançado um alto índice de blindagem da rede, comprovado pelo índice de 2,24% de descargas que foram interceptadas diretamente para uma simulação com 100 anos de descargas atmosféricas com um índice de 6 descargas ao solo/km².ano [8].

Já no segundo caso, as estruturas foram inseridas com espaçamento médio de 5 m para a rede e de 80 a 200 m entre duas estruturas consecutivas, atingindo um grau mais baixo de blindagem da rede, com uma taxa de 15,43% de descargas de interceptação direta pela rede.

As duas simulações anteriores mostraram um comportamento de uma região urbana muito densa e pouco densa, respectivamente, simulando uma zona urbana, no primeiro caso, de uma região central de uma grande cidade e, no segundo caso, de um bairro mais residencial, ou de uma cidade pequena.

Para simular um caso médio, que pudesse contemplar ambas as situações partiu-se para a inclusão de pontos de estruturas elevadas com um espaçamento médio de 10 metros da rede e de 70 metros entre duas estruturas consecutivas, buscando uma condição intermediária entre as simuladas anteriormente.

Nestas condições, foram simuladas 259.250 descargas atmosféricas, ou o equivalente a 1.939 anos, em média, de descargas atmosféricas atingindo esta região. Destas, 2.938 foram interceptadas diretamente pela rede, sendo que as outras 256.312 foram interceptadas por uma estrutura elevada ou atingiram o solo, gerando uma sobretenção induzida na rede, o que equivale a 98,87% dos casos.

A blindagem da rede foi relativamente alta, porém o estudo prosseguiu pela boa representatividade estatística do caso e por ser uma condição melhor para o estudo das sobretenções induzidas.

No caso das intercepções diretas, a Figura 4.10 representa o histograma das intensidades de corrente encontradas, destaque para a distribuição log-normal em azul. O valor de intensidade de corrente de descarga com probabilidade de 50% de ocorrência encontrado foi de 11,60 kA, para o caso de ocorrência de 90% foi de 5,29 kA e para 10% foi de 25,44 kA. É facilmente observada a queda nos valores das correntes de intercepção direta à rede, de 38,14 kA para 11,60 kA no caso da probabilidade de ocorrência de 50%. Isto se deve ao fato de que as descargas de maior intensidade, por possuírem uma maior distância de atração, acabam atingindo primeiro as estruturas elevadas e não os condutores do sistema.

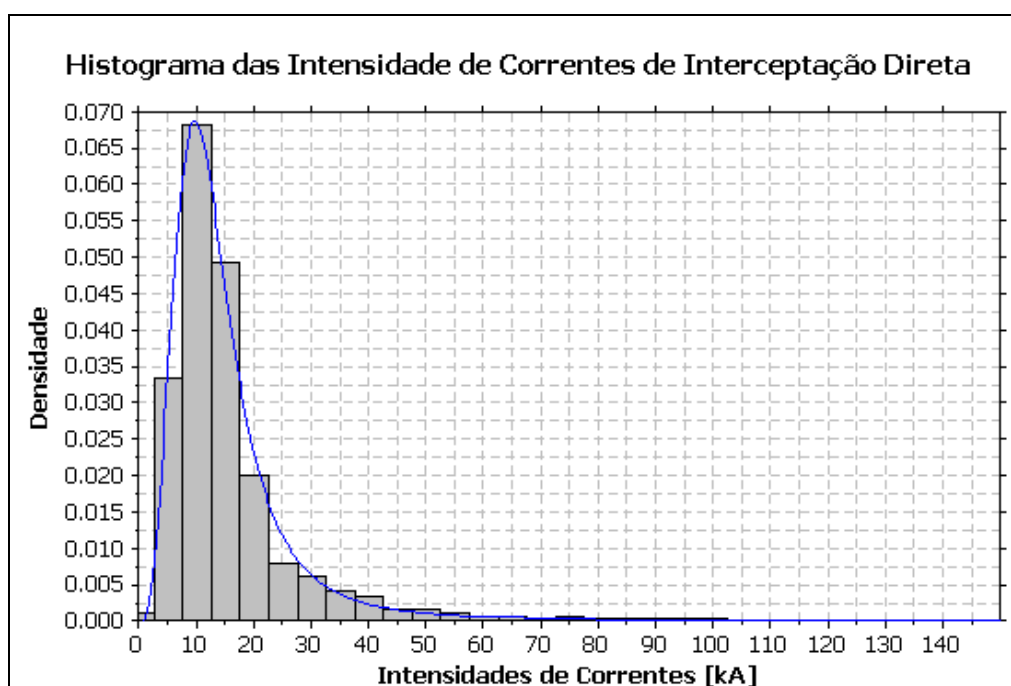


Figura 4.10 - Histograma das Intensidades de Corrente de Descargas com Intercepção Direta à Rede

A Figura 4.11 representa o histograma das tensões induzidas encontradas para o caso das descargas que não interceptaram diretamente à rede, nesta figura também está identificada a distribuição que melhor teve resultado no teste de aderência, a qual foi a distribuição tri-paramétrica de Weibull. Neste caso foram encontrados os valores de intensidade de sobretensão com probabilidade de 50% de ocorrência em 31,45 kV, o de probabilidade de 90% em 13,70 kV e o de probabilidade de 10% em 72,20 kV.

É notável o acréscimo dos níveis de sobretensão encontrados, onde o limite máximo passou de 160 kV no caso sem a presença de estruturas elevadas, para 375 kV neste caso, ocasionado pelas descargas de alta intensidade que atingem estruturas

elevadas próximas à rede. Porém, como no caso anterior, a maior concentração ficou na faixa dos 10 a 30 kV, o que resultou nos valores de probabilidade de 10%, 50% e 90% muito próximos entre os dois casos. Onde a probabilidade de 50% teve um acréscimo de 29,49 para 31,45 kV, da probabilidade de 90% de 6,46 para 13,70 kV, porém, da probabilidade de 10% houve um decréscimo de 77,62 para 72,20 kV.

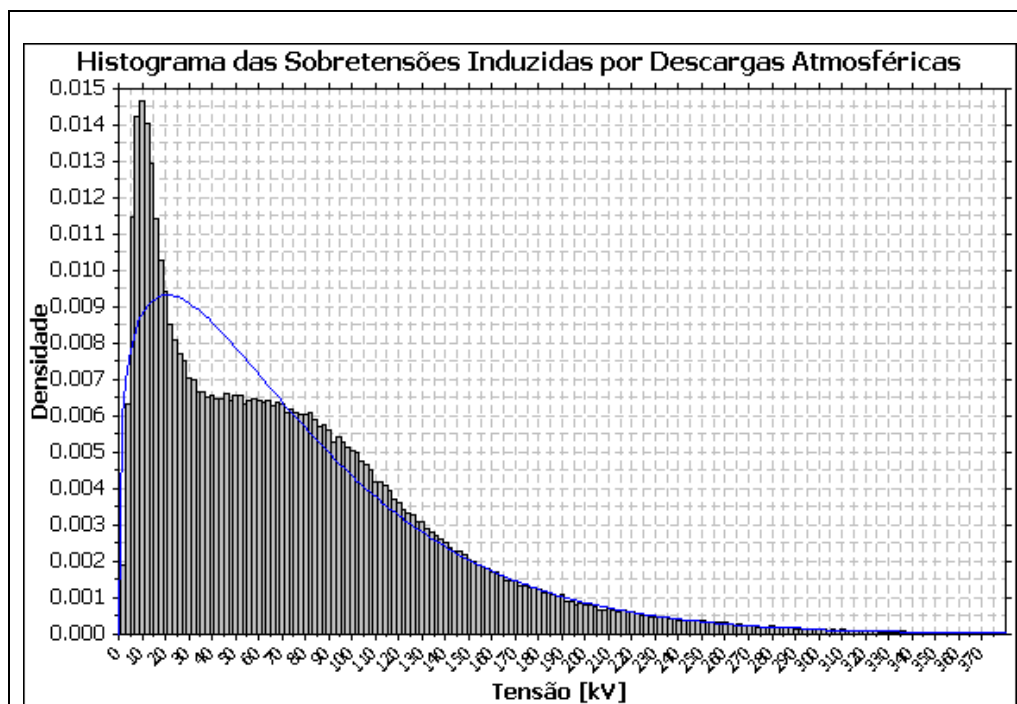


Figura 4.11 - Histograma das Sobretensões Induzidas à Rede Urbana com Estruturas Elevadas

4.3. Interface com Programa de Transitórios Eletromagnéticos para Detalhamento dos Surtos Incidentes

4.3.1. Programa de Simulações de Transitórios Eletromagnéticos - ATP (Alternative Transient Program)

A área de transitórios eletromagnéticos envolve uma ampla gama de fenômenos, provocados por variações súbitas de tensão ou corrente nos sistemas elétricos, inicialmente em estado de regime permanente na grande maioria dos casos. Essas variações súbitas de tensão e corrente são provocadas por descargas atmosféricas, faltas no sistema ou manobras.

Um estudo de transitórios tanto pode levar à melhor especificação dos dispositivos de proteção dos equipamentos de um sistema elétrico, quanto pode permitir a determinação dos motivos que provocaram uma perturbação no sistema.

A partir do desenvolvimento dos primeiros computadores, na década de 60, iniciou-se o desenvolvimento do programa EMTP (*Electromagnetic Transient Program*) por Herman W. Dommel, para a BPA (*Bonneville Power Administration*, EUA), com base no trabalho de Frey e Althammer (Brown Boveri, Suíça). O programa inicial trabalhava com a simulação de circuitos monofásicos através de modelos de indutâncias, capacitâncias e resistências em linhas 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 Bergeron.

Com o passar dos anos, o programa foi sofrendo alterações de diversos colaboradores do mundo todo. A partir de 1973, Scott Meyer assumiu a coordenação e o desenvolvimento do programa na BPA, estabelecendo um processo de desenvolvimento articulado com os usuários do EMTP que o tornou uma ferramenta poderosa em estudos de transitórios em sistemas elétricos.

Divergências entre Scott Meyer e o EPRI (*Electric Power Research Institute*, EUA), que investiu no projeto do EMTP a partir de 1984, levaram à criação de uma nova versão do EMTP a qual foi enviada para a Bélgica, onde foi instalado o LEC (*Leuven EMTP Center*). Esta nova versão é denominada ATP (*Alternative Transient Program*), que constitui a continuação das versões anteriores do programa.

O LEC centralizou a distribuição do programa a nível mundial até o final de 1992 quando, então, a BPA e Scott Meyer decidiram novamente exercer a coordenação do programa.

O programa ATP permite a simulação de transitórios eletromagnéticos em redes polifásicas, com configurações arbitrárias, por um método que utiliza a matriz de admitância de barras. A formulação matemática é baseada no método das características (método de Bergeron) para elementos com parâmetros distribuídos e na regra de integração trapezoidal para parâmetros concentrados. Durante a solução são utilizadas técnicas de esparsidade e de fatorização triangular otimizada de matrizes.

Como um programa digital não permite obter uma solução contínua no tempo, são calculados valores a intervalos de tempo discretos. O programa permite a representação de não-linearidades, elementos com parâmetros concentrados, elementos com parâmetros distribuídos, chaves, transformadores, reatores, entre outros. De uma

forma geral, são considerados parâmetros em componentes de fase e em seqüência zero e positiva, dependendo do modelo.

4.3.2. Parâmetros e Modelos para Simulação

O ATP dispõe de diversos modelos de ramos de interligação, fontes, chaves e equipamentos elétricos, cada qual com seu propósito específico e cumprindo uma tarefa determinada. A seguir serão descritos os modelos utilizados nas simulações para os surtos induzidos.

O conceito básico, que se aplica a qualquer equivalente da rede e para qualquer tipo de estudo, consiste em se utilizar a menor representação possível do sistema em análise, de forma a minimizar o tempo de processamento e evitar a inclusão de componentes desnecessários. Em pontos apropriados do sistema a ser modelado devem ser utilizados equivalentes que reproduzem o comportamento transitório da parte desprezada.

4.3.2.1. FONTE

As solicitações transitórias causadas por surtos atmosféricos são fortemente influenciadas pelas características das descargas atmosféricas, as quais são geralmente definidas por distribuições estatísticas de intensidades de corrente e tempos de frente de onda. O ATP dispõe de vários tipos diferentes de fontes para a excitação das redes elétricas. No caso específico em questão, o interesse está voltado para a modelagem de surto de tensão induzido e diversas alternativas podem ser aplicadas.

No caso específico em análise, o problema consiste em injetar um surto de tensão induzido, com forma de onda e amplitude conhecidas, na linha de distribuição, sem que a fonte modifique a impedância vista pelas reflexões provenientes do sistema. Quando se utiliza uma fonte de tensão o modelo apresentado na Figura 4.12 deve ser aplicado.

A tensão da fonte deve ser igual a duas vezes o valor do surto de tensão desejado e a impedância de surto (Z) deve ser igual à impedância de surto do sistema onde o modelo será conectado. No modelo acima, as reflexões provenientes das discontinuidades existentes no interior do sistema encontram uma impedância de surto igual à do nó por onde estão se propagando, não havendo, portanto, reflexões. Para

efeito do transitório dentro do sistema tudo se passa como se a linha de distribuição tivesse comprimento infinito.

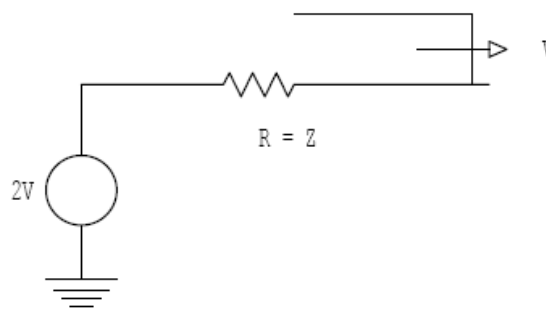


Figura 4.12 – Fonte de Tensão Equivalente para Injeção de Surto

Os modelos de fontes existentes no ATP aplicáveis à modelagem de surtos de tensão ou corrente, que mais se aproximam da forma de onda desejada, são a dupla-rampa (tipo 13) e a duplo-exponencial (tipo 15). Para as formas de ondas de surtos atmosféricos, que possuem tempo de frente e de cauda muito rápidos, na faixa de μs , a fonte escolhida foi a tipo 13, dupla-rampa, mostrada na Figura 4.13, a qual é uma boa aproximação.

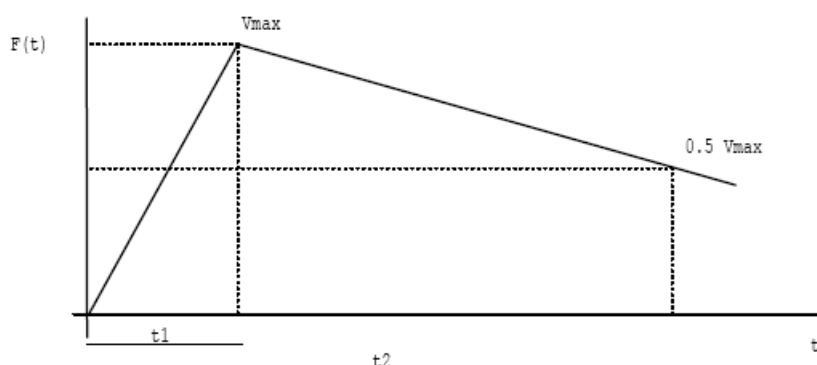


Figura 4.13 – Forma de Onda da Fonte Dupla-Rampa, Tipo 13

4.3.2.2. RAMOS DE LIGAÇÃO E LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO EM MÉDIA TENSÃO

Existem no ATP diversos modelos de ramos lineares de interligação, podendo ser representados das seguintes formas:

- ♦ Elementos não acoplados com parâmetros R, L, C série (Tipo 0);
- ♦ Elementos mutuamente acoplados com parâmetros R, L, C concentrados (Tipo 1, 2, 3, ...), circuitos π -Equivalentes;
- ♦ Elementos R, L mutuamente acoplados (Tipo 51, 52, 53, ...);
- ♦ Elementos com parâmetros distribuídos (Tipo -1, -2, -3, ...).

Os elementos com parâmetros concentrados podem ser representados por uma resistência, uma indutância e uma capacitância conectadas em série. Observa-se que não há a obrigatoriedade de os três elementos estarem representados, podendo haver apenas dois deles, ou ainda um só, o caso geral com os três elementos é mostrado na Figura 4.14.

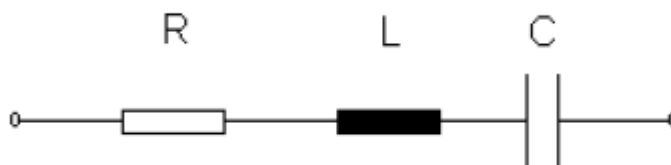


Figura 4.14 – Modelo de Parâmetros R-L-C Concentrados

Este modelo, tipo 0, foi utilizado para a simulação dos ramos de ligação entre os diversos componentes utilizados.

Porém, para as linhas de distribuição, por se utilizar, neste estudo, simulações monofásicas e os sistemas possuírem tensão máxima de 25 kV, a modelagem das linhas de distribuição foi baseada nos modelos de parâmetros distribuídos, tipo -1, onde é requerido apenas a especificação dos nomes das barras onde está conectado e os valores de resistência em Ω por unidade de comprimento, impedância de surto em Ω por unidade de comprimento, velocidade de propagação em unidade de comprimento por segundo, além do comprimento da linha.

Na prática, os modelos de linhas com parâmetros distribuídos apresentam resultados plenamente satisfatórios e são utilizados na maioria dos estudos de transitórios em sistemas elétricos, não sendo essencial a utilização de modelos com parâmetros variando com a frequência [21].

Para a obtenção dos valores de impedância de surto e velocidade de propagação, dados de entrada para o modelamento da linha de distribuição com parâmetros distribuídos, foram utilizados as informações de construção de linhas padrão, adotada pela concessionária, assim como os diferentes cabos encontrados nos alimentadores. Todos estes dados forneceram base para a rotina de suporte “*Line Constants*” do ATP, que consiste em um programa auxiliar para o cálculo de parâmetros de cabos ou linhas de transmissão.

Esta rotina é capaz de calcular as matrizes de impedância, em componentes simétricas ou de fases, para configurações arbitrárias, em diferentes frequências, acoplamento mútuo de circuitos, circuito PI-Equivalente, modelos de K. C. Lee ou Clarke para propagação de ondas e Modelo de J. Marti para estudos de transitórios, entre outras informações pertinentes para modelar e simular linhas de transmissão, ou distribuição, com parâmetros distribuídos.

4.3.2.3. PÁRA-RAIOS A ÓXIDO-METÁLICO (ZnO)

Pára-raios de óxido metálico são dispositivos de proteção contra sobretensões muito conhecidos atualmente e que não necessitam de centelhadores de nenhuma espécie por causa de suas características não-lineares muito acentuadas.

Apresentam algumas vantagens com relação aos pára-raios convencionais, mas alguns cuidados devem ser observados para a definição das características necessárias para a sua simulação nos estudos de sobretensões.

Existem algumas possibilidades distintas para a modelagem de pára-raios de óxido metálico no ATP, basicamente associadas à modelagem de resistências não-lineares e divididas em dois grupos básicos: modelagem através de pares de pontos de tensão e corrente e modelagem através de equações que definem a característica não-linear.

Neste estudo, os pára-raios de óxido-metálico foram modelados através do elemento não-linear tipo 99. Neste foi especificada a tensão de disparo em 0 volt, pois pára-raios a óxido-metálico não possuem centelhadores, portanto, não necessitando de uma tensão de disparo determinada para o mesmo começar a conduzir, como é o caso dos pára-raios a carboneto de silício. Estes possuem centelhadores e só iniciam a condução após a tensão atingir um nível onde ocorra a disrupção dos centelhadores.

Após as instruções iniciais é necessário indicar os pares de pontos Tensão-Corrente que determinam a característica não-linear do pára-raios, característica esta adotada como um padrão médio para os pára-raios a óxido-metálico de distribuição com tensão nominal de 12 kV, conforme mostra a Figura 4.15.

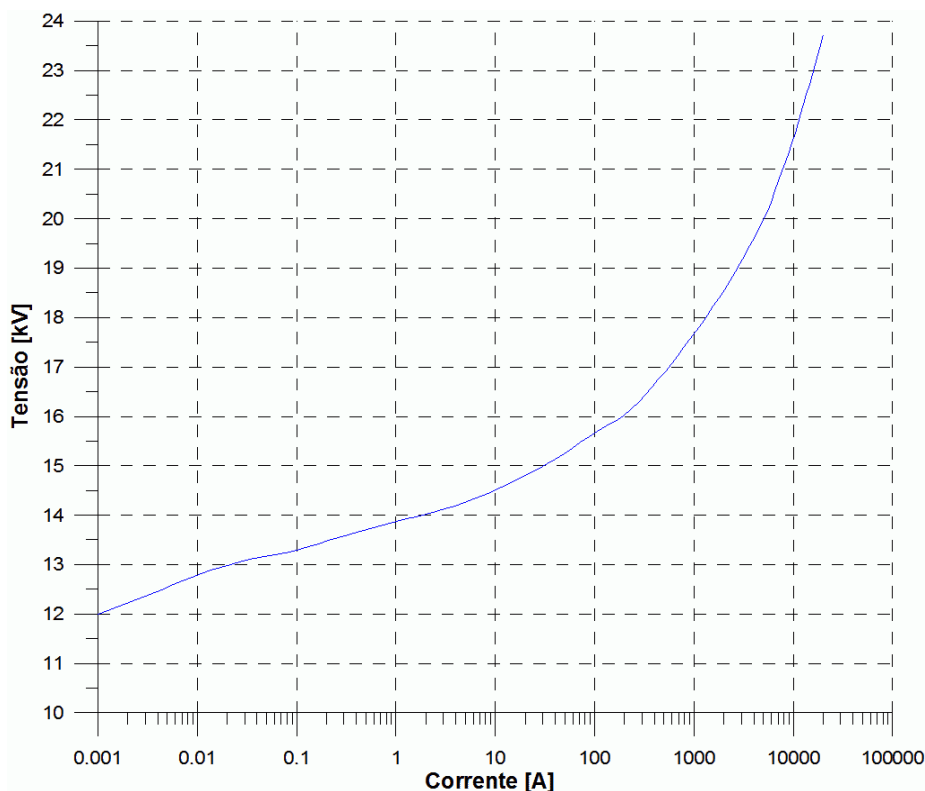


Figura 4.15 – Característica Não-Linear Tensão x Corrente para os Pára-Raios de Média Tensão

4.3.2.4. TRANSFORMADORES

Muitos modelos têm sido propostos para a representação de transformadores com relação a surtos. Cada modelo tem suas peculiaridades, uns são mais complexos e visam à representação de transformadores de distribuição e de potência, outros apenas de distribuição. Dentre esses modelos há distinção entre modelos de transformador de distribuição e de potência devido aos aspectos construtivos dos mesmos. Mesmo no ATP diversas modelagens são possíveis.

O comitê 33.02 do CIGRÉ divulgou em seu guia para a modelagem de equipamentos para o cálculo de sobretensões [27] um modelo mais completo e de uso genérico, para vários estudos diferentes, do transformador, incluindo vários parâmetros, Figura 4.16. Este modelo representa as capacitâncias e indutâncias entre os elementos, ramo de magnetização e relação de transformação, porém, neste modelo, como não serão analisados os surtos transferidos do primário ao secundário e, também, o modelo só será utilizado para surtos em alta frequência, vários elementos poderão ser descartados, eliminando-se as indutâncias, ramos de magnetização e relação de transformação, desta maneira restarão somente as capacitâncias.

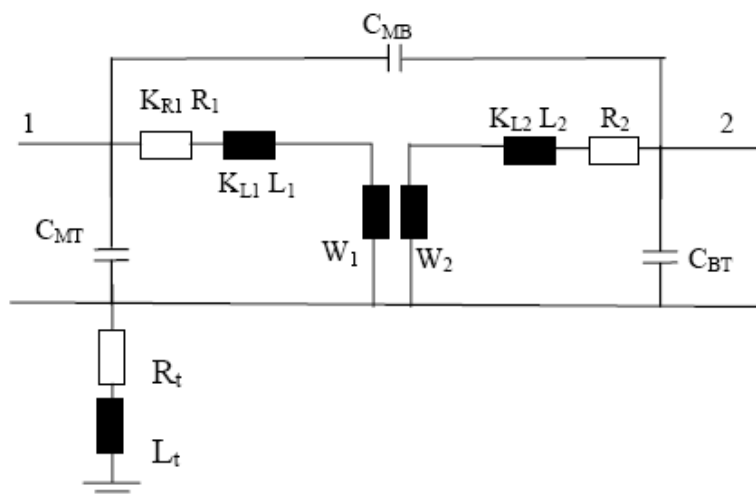


Figura 4.16 – Modelo para transformadores sugerido pelo CIGRÉ

Assim, um dos circuitos mais utilizados para modelar transformadores para surtos de origem atmosférica é o circuito π capacitivo, apresentado na Figura 4.17. Seus parâmetros são facilmente obtidos a partir de ensaios em transformadores. Através de cálculos matemáticos dos resultados de ensaio os parâmetros que representam o transformador são obtidos.

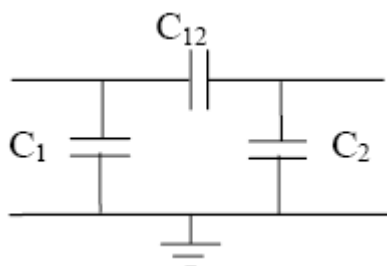


Figura 4.17 – Modelo de Transformador por Circuito π -Capacitivo

Os parâmetros da C_1 , C_2 e C_{12} representam:

- ♦ C_1 : A capacitância do primário em relação a terra;
- ♦ C_2 : A capacitância do secundário em relação a terra;
- ♦ C_{12} : A capacitância entre os terminais do primário e secundário.

Como exemplo, para um transformador de distribuição, classe 15 kV e potência de 30 kVA, os parâmetros obtidos foram: $C_1 = 138$ pF, $C_2 = 423$ pF e $C_{12} = 305$ pF.

4.3.2.5. CHAVE COMANDADA POR TENSÃO

O programa ATP contém uma variedade muito grande de modelos de chaves. A seqüência de chaveamento é que define o tipo de estudo a ser efetuado, inclusive no que

se refere à facilidade de tratamento das informações obtidas do cálculo de transitórios propriamente dito.

Podem ser representadas chaves de tempo controlado, estatísticas, sistemáticas, controladas por tensão ou por sinais, bem como chaves de medição.

As chaves de tempo controlado podem efetuar as operações de fechamento e de abertura em tempos especificados pelo usuário. Estas operações são realizadas uma única vez, sendo que a abertura ocorre nos zeros de corrente ou conforme uma determinada margem de corrente. Estas chaves simulam o comportamento de um disjuntor, com exceção do arco elétrico entre contatos, e podem ser dispostas de modo a representar também resistores de pré-inserção na abertura ou no fechamento.

As chaves estatísticas e as sistemáticas são utilizadas para simular o disjuntor considerando-se também a dispersão existente entre os tempos de fechamento de cada contato. As estatísticas têm os tempos de fechamento gerados conforme uma distribuição estatística do tipo normal ou do tipo uniforme, cujos parâmetros (tempo médio e desvio padrão) são definidos pelo usuário. Podem ser utilizadas para os contatos principais e para os contatos auxiliares do disjuntor. As sistemáticas executam a mesma função, porém com tempos de fechamento gerados de acordo com uma determinada lei de formação. Tanto as chaves estatísticas quanto as chaves sistemáticas são utilizadas para uma única operação de fechamento e existe a possibilidade de uma chave estar relacionada com outra chave estatística (os tempos de fechamento são gerados aleatoriamente a partir dos tempos de fechamento de outra chave estatística). É possível ainda que a abertura de uma chave seja estatística.

As chaves controladas por tensão têm uma determinada seqüência de operação especificada pelo usuário de modo que a chave, estando originalmente aberta, feche após um tempo especificado, desde que a tensão através da chave seja superior ao valor estabelecido pelo usuário. Após o fechamento é decorrido um intervalo de tempo para a abertura dentro da margem de corrente pré-fixada. Esta seqüência permanente efetiva durante a simulação.

Podem ser utilizadas combinações das chaves descritas acima de diversas formas de modo a atender às necessidades do estudo.

Neste estudo, foram utilizadas chaves controladas por tensão em paralelo com o sistema e em série com uma resistência para simular a abertura de arco nos isoladores. Tanto as tensões de fechamento da chave, como as resistências de aterramento possuem variações estatísticas em seus valores, sendo que a tensão de fechamento ficou em torno do valor de CFO (“*Critical Flashover Overvoltage*”) da linha, na faixa de 150 kV.

4.3.3. Definições para as Simulações em Conjunto com o ATP

Por ser um processo lento e com grande quantidade de informações, as simulações das sobretensões geradas ou induzidas nas redes devem seguir um procedimento estatístico de amostragem. Este deve reduzir o tempo necessário, garantir a representatividade e diminuir os erros na medida do possível.

Com a utilização de um procedimento comum de amostragem, procedimento este também sugerido e adotado pela ANEEL [29], temos que o número de amostras será definido pela Equação 4.2.

$$n = \frac{N \cdot Z_{\alpha/2}^2 \cdot p \cdot q}{(N - 1) \cdot \varepsilon^2 + Z_{\alpha/2}^2 \cdot p \cdot q} \quad (4.2)$$

Onde:

- ♦ n = Número de amostras;
- ♦ N = Tamanho da população;
- ♦ p = Proporção esperada na população;
- ♦ q = Complemento da proporção esperada na população (1-p);
- ♦ ε = Distância da média em relação à média verdadeira, margem de erro absoluto. Maior erro tolerável, que é expresso como uma proporção (entre 0 e 1);
- ♦ $Z_{\alpha/2}$ = Valor apropriado para o nível de confiança assumido, tabelado ou calculado para a distribuição normal padronizada.

Entretanto como a proporção esperada na população é um valor desconhecido, partiremos para a substituição de $p \cdot q$ pelo seu valor máximo. Para definir o valor máximo devemos analisar a multiplicação $p \cdot q$, que na verdade pode ser substituído por $p \cdot (1-p)$, ou $p - p^2$, a qual define claramente uma parábola, como pode ser visto no gráfico

da Figura 4.18, chegando ao valor máximo de 0,25, na situação onde $p = q = 0,5$, que pode fornecer um valor de n maior que o necessário, condição de pior cenário.

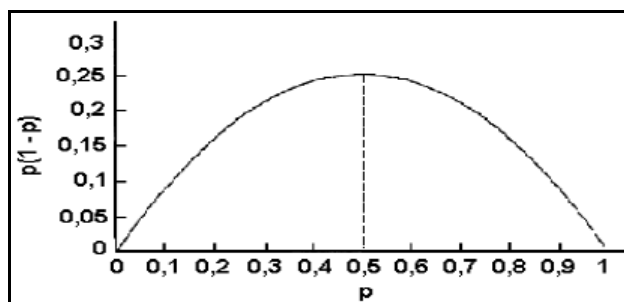


Figura 4.18 – Gráfico da função $p(1-p)$ para $0 \leq p \leq 1$

Partindo-se da Equação 4.2, adotando um nível de confiança de 95% e uma margem de erro absoluto de 15%, chegamos ao valor de 43 amostras, a qual foi aproximada para 45, número compatível com a tabela fornecida e recomendada pela ANEEL [29]. Sendo assim, foram executadas 45 simulações de sobretensões geradas por indução devido à descarga atmosférica, além de mais 45 simulações para sobretensões geradas por descarga atmosférica de impacto direto na linha, totalizando 90 simulações.

Todas as simulações foram executadas em um alimentador de rede urbana, um dos que compõe a rede da Figura 4.3, sendo que do total de 90 simulações, 36 delas, ou seja, 40% foram executadas com a presença de estruturas elevadas. Isto se deve ao fato de os resultados de uma rede urbana sem as estruturas elevadas possuir similaridade com os resultados de uma rede rural, assim temos que 54 dos casos podem ser atribuídos a redes rurais ou urbanas de baixa densidade e o restante a urbanas densas.

4.3.4. Resultados das Simulações em Conjunto com o ATP

Na Tabela 4.3 estão descritos todos os casos simulados para a condição de sobretensão gerada por indução devido à descarga atmosférica, já na Tabela 4.4 estão os casos para a condição de impacto direto na linha.

É notável em todos os casos da Tabela 4.3, sobretensões induzidas, o fato de nenhuma corrente ser superior a 1 kA nos pára-raios, além de nenhuma tensão nos transformadores ser superior ao menor NBI, para equipamentos de distribuição da classe 15 kV, de 95 kV.

Essa condição se traduz na reduzida possibilidade de queima de equipamentos classe 15 kV, principalmente transformadores, assim como os equipamentos pára-raios não foram sobre-solicitados apresentando baixas correntes de descarga. Nota-se também que somente dois casos puderam sobre-solicitar os isoladores do sistema com sobretensões próximas ao CFO de 150 kV, sendo, então, reduzida a probabilidade de abertura de arco para a condição de sobretensões induzidas.

Em contrapartida, para o caso de sobretensões provenientes de impactos diretos às linhas, temos uma elevada probabilidade de queima de equipamentos e abertura de arco nos isoladores. Porém, continua a baixa probabilidade de ocorrência de uma sobre-solicitação aos pára-raios, com somente quatro casos com corrente superior a 9 kA. A Tabela 4.5 resume as probabilidades de queima de equipamentos, onde são mostradas os casos superiores aos NBI padrão da classe 15 kV, assim como as probabilidades de abertura de arco nos isoladores, onde são mostrados os casos superiores aos CFO padrão da classe 15 kV.

Fica claro que para as sobretensões originadas por descarga atmosférica de impacto direto, a probabilidade de queima de equipamentos é de 80% para NBI igual a 95 kV, ao se alterar o NBI para 110 kV temos uma queda de quase 7%, contudo ainda é uma possibilidade muito alta de falha do equipamento. Índices melhores são apresentados para a abertura de arco nos isoladores, para o CFO padrão utilizado nos sistemas classe 15 kV de 150 kV temos quase 50% de possibilidade de abertura de arco, porém a cada acréscimo de 15 kV no CFO, temos uma redução de, aproximadamente, 10% na probabilidade de abertura de arco. Esse resultado confirma trabalhos anteriores apresentados, inclusive com comparativos de custo, nas referências [5-7,9].

Tabela 4.3 – Resultados para os Casos de Sobretensão Gerada por Indução Eletromagnética

Caso Nº	Corrente da Descarga [kA]	Probabilidade de Ocorrência da Descarga %	Tensão Induzida pela Descarga [kV]	Estruturas Elevadas		Tensão no Transformador [kV]	Corrente no Pára-Raios [A]	Barra de Medição
1	17,8	80,8	55,7	Não	0	24,6	230,7	214
2	14,4	88,0	41,4	Não	0	15,3	43,2	89
3	19,9	76,0	58,6	Não	0	20,8	100,6	398
4	11,6	92,7	54,1	Não	0	25,4	229,4	175
5	22,4	70,0	60,0	Não	0	26,1	271,8	165
6	32,5	46,9	85,7	Não	0	26,6	272,8	231
7	22,2	70,3	76,4	Não	0	33,8	391,3	304
8	25,1	63,4	65,8	Não	0	30,5	322,6	423
9	2,0	99,9	11,7	Não	0	10,6	22,9	203
10	32,6	46,8	91,2	Não	0	25,2	233,4	62
11	15,2	86,4	53,1	Não	0	17,5	67,7	19
12	66,1	12,3	128,0	Não	0	32,1	374,7	96
13	22,8	69,0	64,4	Não	0	29,4	339,9	386
14	20,4	74,8	46,5	Não	0	25,2	230,0	168
15	17,5	81,6	51,7	Não	0	21,4	129,5	233
16	64,0	13,2	100,4	Não	0	26,2	226,1	52
17	29,7	52,8	78,3	Não	0	28,8	281,6	451
18	55,4	18,1	119,3	Não	0	42,5	583,0	419
19	19,2	77,8	55,7	Não	0	27,0	265,3	423
20	14,2	88,4	50,1	Não	0	26,5	236,5	411
21	10,6	94,2	35,1	Não	0	13,2	50,3	697
22	7,7	97,4	30,3	Não	0	19,9	98,2	187
23	18,7	78,9	52,4	Não	0	18,5	79,4	264
24	67,2	11,8	102,7	Não	0	26,1	245,6	6
25	23,7	66,8	62,0	Não	0	19,1	91,2	303
26	41,5	31,8	83,7	Não	0	35,3	423,1	371
27	18,0	80,5	47,1	Não	0	21,6	133,5	176
28	40,9	32,7	97,7	Sim	1	29,8	357,6	41
29	28,1	56,3	81,0	Sim	1	26,5	251,3	6
30	8,4	96,7	37,2	Sim	1	13,5	57,9	697
31	12,6	91,2	49,8	Sim	1	19,5	89,7	80
32	55,1	18,3	142,1	Sim	1	51,1	832,5	449
33	23,1	68,1	81,1	Sim	1	34,6	444,1	287
34	38,7	36,0	102,6	Sim	1	39,8	590,2	34
35	46,9	25,4	129,1	Sim	1	39,3	510,3	424
36	14,9	87,1	56,5	Sim	1	22,0	160,0	378
37	35,0	42,2	118,4	Sim	1	42,2	577,7	421
38	10,6	94,2	51,6	Sim	1	22,2	151,1	200
39	8,1	97,0	41,8	Sim	1	15,4	41,4	248
40	20,4	74,7	77,6	Sim	1	20,7	116,3	306
41	25,5	62,4	79,3	Sim	1	30,9	329,3	163
42	55,6	17,9	158,2	Sim	1	53,3	892,2	178
43	15,0	86,8	55,0	Sim	1	22,1	141,2	46
44	27,8	56,9	78,7	Sim	1	33,0	418,6	304
45	54,7	18,6	131,5	Sim	1	50,9	796,8	168
Média	27,4	63,0	74,0	40,0%		27,5	282,9	-----
Mínima	2,0	11,8	11,7	-----		10,6	22,9	-----
Máxima	67,2	99,9	158,2	-----		53,3	892,2	-----

Tabela 4.4 – Resultados para os Casos de Sobretensão Gerada por Impacto Direto

Caso Nº	Corrente da Descarga [kA]	Probabilidade de Ocorrência da Descarga %	Tensão no Transformador [kV]	Corrente no Pára-Raios [A]	Barra de Medição
1	17,8	80,8	140,3	3.318,5	214
2	14,4	88,0	75,0	1.503,1	89
3	19,9	76,0	119,1	2.304,3	398
4	11,6	92,7	149,9	3.253,6	175
5	22,4	70,0	175,4	4.290,4	165
6	32,5	46,9	146,3	3.344,7	231
7	22,2	70,3	182,4	3.648,8	304
8	25,1	63,4	204,2	4.185,1	423
9	2,0	99,9	62,6	1.046,3	203
10	32,6	46,8	157,4	3.569,4	62
11	15,2	86,4	60,6	1.036,9	19
12	66,1	12,3	146,1	3.018,5	96
13	22,8	69,0	181,5	4.194,5	386
14	20,4	74,8	164,5	3.685,3	168
15	17,5	81,6	101,0	1.989,2	233
16	64,0	13,2	126,9	2.436,2	52
17	29,7	52,8	144,4	2.819,1	451
18	55,4	18,1	2.173,4	48.412,0	419
19	19,2	77,8	154,5	3.341,1	423
20	14,2	88,4	136,3	2.681,4	411
21	10,6	94,2	41,5	3.277,5	697
22	7,7	97,4	295,3	6.781,8	187
23	18,7	78,9	109,9	2.153,5	264
24	67,2	11,8	97,5	1.956,1	6
25	23,7	66,8	116,7	2.584,1	303
26	41,5	31,8	334,8	7.025,4	371
27	18,0	80,5	119,5	2.393,1	176
28	40,9	32,7	302,3	7.501,3	41
29	28,1	56,3	147,1	3.137,1	6
30	8,4	96,7	38,9	3.250,8	697
31	12,6	91,2	78,9	1.399,5	80
32	55,1	18,3	432,4	10.034,0	449
33	23,1	68,1	187,0	4.084,1	287
34	38,7	36,0	298,3	7.060,2	34
35	46,9	25,4	162,0	3.196,3	424
36	14,9	87,1	148,9	3.531,5	378
37	35,0	42,2	281,8	5.915,5	421
38	10,6	94,2	70,0	1.280,4	200
39	8,1	97,0	45,2	680,5	248
40	20,4	74,7	71,4	1.328,8	306
41	25,5	62,4	200,4	4.073,7	163
42	55,6	17,9	440,1	10.272,0	178
43	15,0	86,8	151,3	3.096,5	46
44	27,8	56,9	222,8	5.120,9	304
45	54,7	18,6	441,5	9.851,4	168
Média	27,4	63,0	214,2	4.779,2	-----
Mínima	2,0	11,8	38,9	680,5	-----
Máxima	67,2	99,9	2.173,4	48.412,0	-----

Tabela 4.5 – Resumo das Probabilidades de Queima de Equipamento e Abertura de Arco

Condição	Probabilidade
>NBI 95kV	80,0%
>NBI 110kV	73,3%
>CFO 150kV	46,7%
>CFO 175kV	35,6%
>CFO 200kV	26,7%
>CFO 225kV	20,0%

Através de um projeto de pesquisa e desenvolvimento, em parceria com a concessionária AES Sul, foram obtidas as intensidades de correntes de descarga reais de diversas unidades, aproximadamente 300 pára-raios, retirados da mesma rede urbana das simulações [34,35], através de uma técnica de análise e medição de marcas de descargas em eletrodos dos centelhadores dos pára-raios. A partir desse grande volume de informações foi traçado o gráfico da Figura 4.19. Nele podemos verificar a grande proximidade e similaridade entre os casos simulados e reais, onde os simulados apresentaram valores de intensidade de corrente um pouco superiores para a faixa abaixo da probabilidade de 40%.

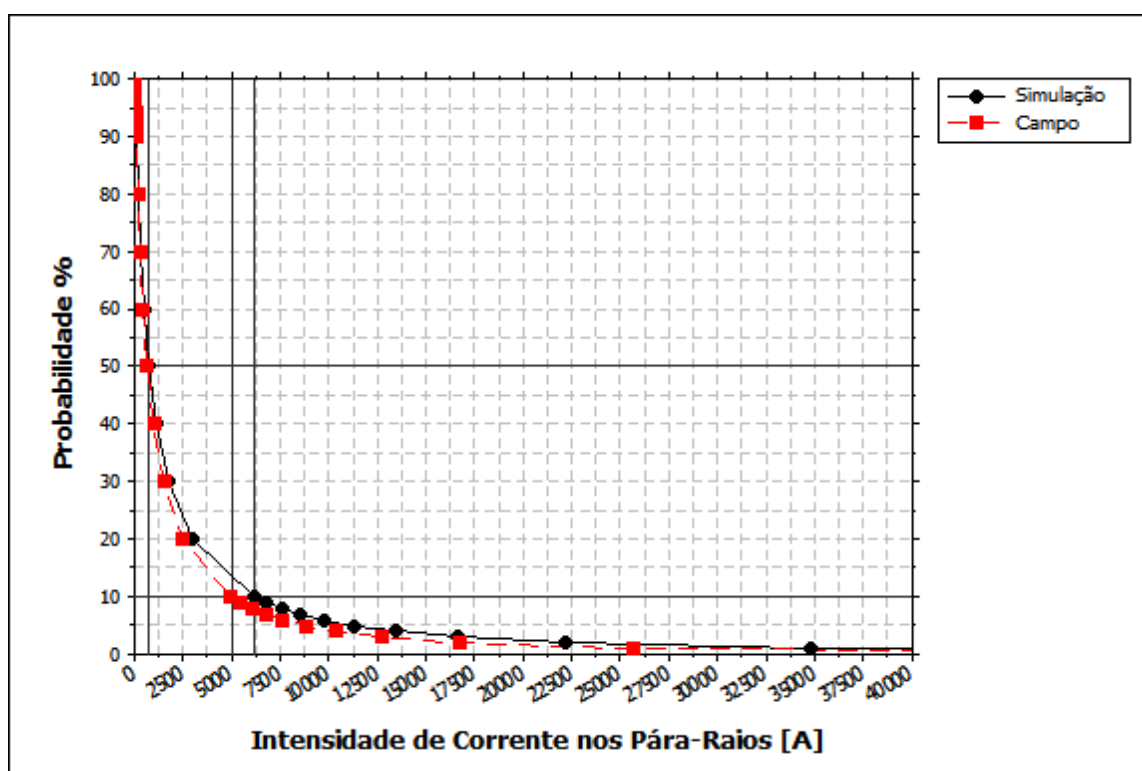


Figura 4.19 – Comparativo das Probabilidades de Ocorrência de Corrente nos Pára-Raios

Está claro na Figura 4.19 que para as intensidades de corrente com probabilidade 50% ou maior, as curvas apresentam valores muito similares, tendo a curva proveniente das simulações um ligeiro acréscimo a partir da probabilidade de 40%. Nota-se que a ocorrência de uma corrente de intensidade de 700 A ou menor, nos pára-raios, possuem

probabilidade igual ou superior a 50%. Para uma probabilidade de 10%, temos que a intensidade de corrente situar-se á na faixa de 5,0 a 6,0 kA, que para uma corrente de intensidade de 10 kA a probabilidade será de aproximadamente 5%, e para uma corrente de intensidade de 20 kA a probabilidade será de aproximadamente 2%.

Para efeito comparativo, novas simulações foram executadas substituindo os pára-raios a óxido de zinco (ZnO) por pára-raios a carboneto de silício (SiC) com centelhadores, isto implicou em uma nova curva tensão-corrente dos resistores lineares e também uma tensão de disparo, tensão esta que deve ser ultrapassada para que ocorra a abertura de arco nos centelhadores e ocorra a condução.

Isto se fez necessário pela, ainda grande, quantidade de unidades instaladas em campo de pára-raios com tecnologia mais antiga a carboneto de silício com centelhadores, sendo, então, possível comparar os resultados.

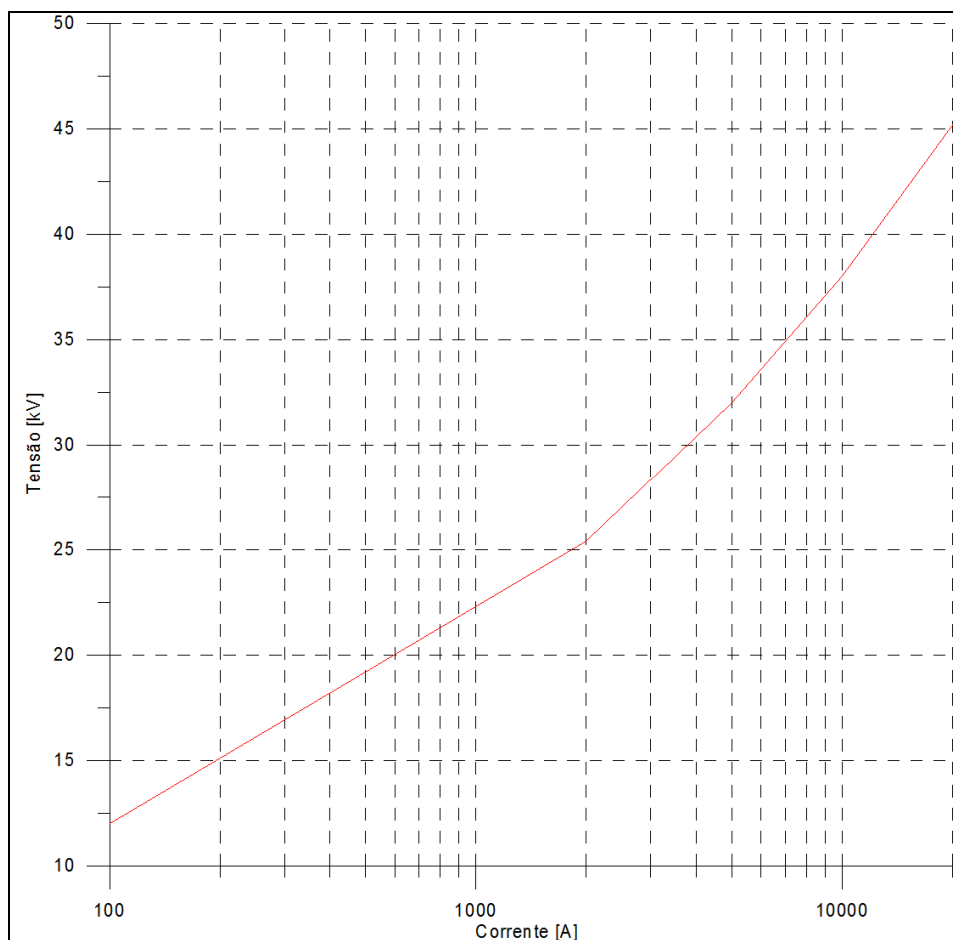


Figura 4.20 – Característica Não-Linear Tensão x Corrente para os Pára-Raios de Média Tensão a Carboneto de Silício

Na Figura 4.20 é exibida a característica não-linear dos resistores a carboneto de silício utilizados na simulação. As Tabelas 4.6 e 4.7 mostram os resultados das simulações e a Tabela 4.8 o resumo das probabilidades de queima e abertura de arco. Já na Figura 4.21 é mostrado o novo comparativo das probabilidades de ocorrência de corrente nos pára-raios.

Pode-se notar que as variações foram muito pequenas, sendo mais evidente e significativa nos valores de tensão nos terminais do transformador para o caso dos surtos induzidos, os quais possuíam valores superiores, com média de 39,2 kV.

Tabela 4.6 – Resumo das Probabilidades de Queima de Equipamento e Abertura de Arco com o uso de Pára-Raios a Carboneto de Silício

Condição	Probabilidade
>NBI 95kV	80,0%
>NBI 110kV	75,6%
>CFO 150kV	46,7%
>CFO 175kV	35,6%
>CFO 200kV	26,7%
>CFO 225kV	22,2%

Tabela 4.7 – Resultados para os Casos de Sobretensão Gerada por Indução Eletromagnética com o uso de Pára-Raios a Carboneto de Silício

Caso Nº	Corrente de Descarga [kA]	Probabilidade de Ocorrência de Descarga %	Tensão Induzida [kV]	Estruturas Elevadas		Tensão no Transformador [kV]	Corrente no Pára-Raios [A]	Barra de Medição
1	17,8	80,8	55,7	Não	0	41,8	408,8	214
2	14,4	88,0	41,4	Não	0	19,0	0,0	89
3	19,9	76,0	58,6	Não	0	41,1	0,0	398
4	11,6	92,7	54,1	Não	0	41,9	339,5	175
5	22,4	70,0	60,0	Não	0	41,8	352,0	165
6	32,5	46,9	85,7	Não	0	41,9	315,1	231
7	22,2	70,3	76,4	Não	0	41,7	399,6	304
8	25,1	63,4	65,8	Não	0	41,8	362,9	423
9	2,0	99,9	11,7	Não	0	10,6	0,0	203
10	32,6	46,8	91,2	Não	0	42,0	326,0	62
11	15,2	86,4	53,1	Não	0	37,0	0,0	19
12	66,1	12,3	128,0	Não	0	42,0	445,8	96
13	22,8	69,0	64,4	Não	0	41,7	364,9	386
14	20,4	74,8	46,5	Não	0	41,9	239,4	168
15	17,5	81,6	51,7	Não	0	39,1	0,0	233
16	64,0	13,2	100,4	Não	0	42,0	244,7	52
17	29,7	52,8	78,3	Não	0	42,0	293,8	451
18	55,4	18,1	119,3	Não	0	45,0	656,6	419
19	19,2	77,8	55,7	Não	0	25,4	297,4	423
20	14,2	88,4	50,1	Não	0	41,8	325,0	411
21	10,6	94,2	35,1	Não	0	34,0	0,0	372
22	7,7	97,4	30,3	Não	0	38,0	0,0	187
23	18,7	78,9	52,4	Não	0	26,3	0,0	264
24	67,2	11,8	102,7	Não	0	41,8	330,1	6
25	23,7	66,8	62,0	Não	0	41,8	468,0	303
26	41,5	31,8	83,7	Não	0	41,5	445,6	371
27	18,0	80,5	47,1	Não	0	42,0	182,2	176
28	40,9	32,7	97,7	Sim	1	41,8	360,8	41
29	28,1	56,3	81,0	Sim	1	41,9	286,8	6
30	8,4	96,7	37,2	Sim	1	36,1	0,0	372
31	12,6	91,2	49,8	Sim	1	35,5	0,0	80
32	55,1	18,3	142,1	Sim	1	50,9	824,9	449
33	23,1	68,1	81,1	Sim	1	41,6	447,5	287
34	38,7	36,0	102,6	Sim	1	41,9	602,0	34
35	46,9	25,4	129,1	Sim	1	41,6	543,7	424
36	14,9	87,1	56,5	Sim	1	39,3	0,0	378
37	35,0	42,2	118,4	Sim	1	43,6	630,1	421
38	10,6	94,2	51,6	Sim	1	42,0	181,4	200
39	8,1	97,0	41,8	Sim	1	19,7	0,0	248
40	20,4	74,7	77,6	Sim	1	31,8	0,0	306
41	25,5	62,4	79,3	Sim	1	41,8	360,8	163
42	55,6	17,9	158,2	Sim	1	55,2	919,5	178
43	15,0	86,8	55,0	Sim	1	41,7	306,8	46
44	27,8	56,9	78,7	Sim	1	41,3	557,3	304
45	54,7	18,6	131,5	Sim	1	50,9	797,2	168
Média	27,4	63,0	74,0	40,0%		39,2	302,6	-----
Mínima	2,0	11,8	11,7	-----		10,6	0,0	-----
Máxima	67,2	99,9	158,2	-----		55,2	919,5	-----

Tabela 4.8 – Resultados para os Casos de Sobretensão Gerada por Impacto Direto com o uso de Pára-Raios a Carboneto de Silício

Caso Nº	Corrente de Descarga [kA]	Probabilidade de Ocorrência de Descarga %	Tensão no Transformador [kV]	Corrente no Pára-Raios [A]	Barra de Medição
1	17,8	80,8	148,1	3.284,4	214
2	14,4	88,0	75,6	1.428,2	89
3	19,9	76,0	122,1	2.206,4	398
4	11,6	92,7	145,7	2.941,4	175
5	22,4	70,0	177,6	4.066,4	165
6	32,5	46,9	145,9	3.107,5	231
7	22,2	70,3	184,1	3.477,8	304
8	25,1	63,4	206,0	3.995,8	423
9	2,0	99,9	63,8	1.043,3	203
10	32,6	46,8	157,3	3.331,4	62
11	15,2	86,4	61,6	1.029,7	19
12	66,1	12,3	146,4	2.830,9	96
13	22,8	69,0	183,6	3.984,3	386
14	20,4	74,8	166,4	3.495,5	168
15	17,5	81,6	104,0	1.908,3	233
16	64,0	13,2	129,0	2.316,8	52
17	29,7	52,8	148,0	2.719,1	451
18	55,4	18,1	2.206,6	48.315,0	419
19	19,2	77,8	154,5	3.341,1	423
20	14,2	88,4	143,4	2.661,1	411
21	10,6	94,2	41,8	3.000,8	697
22	7,7	97,4	307,2	6.745,8	187
23	18,7	78,9	113,2	2.066,2	264
24	67,2	11,8	98,5	1.837,9	6
25	23,7	66,8	120,5	2.480,8	303
26	41,5	31,8	337,2	6.781,8	371
27	18,0	80,5	119,5	2.393,1	176
28	40,9	32,7	304,9	7.209,5	41
29	28,1	56,3	149,8	2.996,1	6
30	8,4	96,7	42,1	3.023,6	697
31	12,6	91,2	79,9	1.352,6	80
32	55,1	18,3	435,3	9.729,7	449
33	23,1	68,1	188,8	3.887,0	287
34	38,7	36,0	300,8	6.788,1	34
35	46,9	25,4	162,0	3.006,2	424
36	14,9	87,1	143,4	3.147,4	378
37	35,0	42,2	284,0	5.682,8	421
38	10,6	94,2	70,0	1.280,3	200
39	8,1	97,0	45,2	694,8	248
40	20,4	74,7	72,4	1.285,8	306
41	25,5	62,4	200,7	3.856,8	163
42	55,6	17,9	440,1	10.270,0	178
43	15,0	86,8	159,1	3.076,7	46
44	27,8	56,9	225,2	4.884,3	304
45	54,7	18,6	444,4	9.559,2	168
Média	27,4	63,0	216,8	4.633,8	-----
Mínima	2,0	11,8	41,8	694,8	-----
Máxima	67,2	99,9	2.206,6	48.315,0	-----

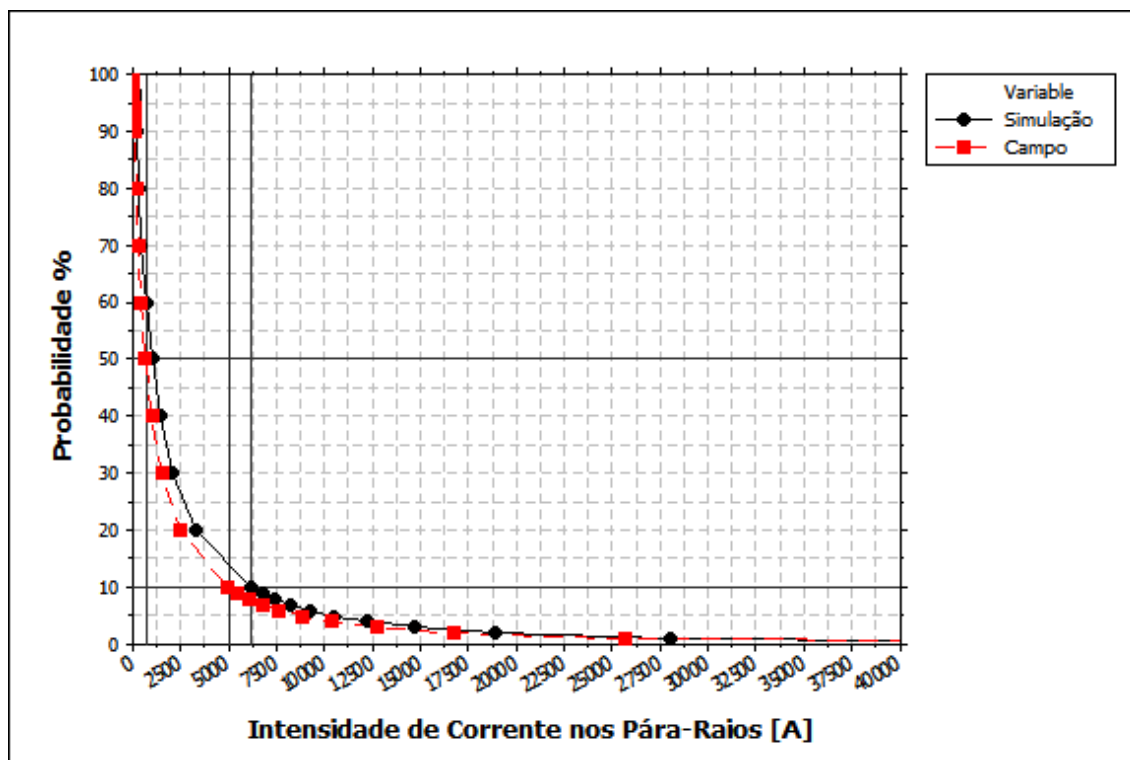


Figura 4.21 – Comparativo das Probabilidades de Ocorrência de Corrente nos Pára-Raios com o uso de Pára-Raios a Carboneto de Silício

4.4. Referências

1. Pedro H. M. dos Santos, “Análise de Desempenho Frente a Impulsos Atmosféricos Induzidos em Circuitos de Média Tensão”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Março, 2007;
2. Ricardo G. de Oliveira Jr., “Tensões Induzidas em Linhas de Média Tensão”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Agosto, 2008;
3. Manuel L. B. Martinez, Pedro H. M. dos Santos, “Estudo de Tensões Induzidas em Redes de Distribuição, Guia para Melhoria do Desempenho de Linhas Aéreas de Distribuição quanto a Descargas Atmosféricas”, Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá, Março, 2004;
4. Carlo A. Nucci, Mario Paolone, “Calculation of Induced Voltages in Medium Voltage Overhead Systems due to Lightning Strokes Using the LIOV Code”, Relatório da segunda fase do projeto de pesquisa com a concessionária AES Sul, Outubro, 2003;
5. Marco A. M. Saran, Rafael R. Bonon, Manuel L. B. Martinez, Hermes R. P. M. De Oliveira, Carlo A. Nucci, Mario Paolone, “Desempenho Comparativo de Projetos de Linhas de Distribuição para Média Tensão Frente a Surto Induzidos”, SBSE – Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Campina Grande, Julho, 2006;
6. Marco A. M. Saran, Rafael R. Bonon, Manuel L. B. Martinez, Hermes R. P. M. De Oliveira, Carlo A. Nucci, Mario Paolone, “Performance of Medium Voltage Overhead Distribution Lines Against Lightning-Induced Voltages: A Comparative Analysis”, GROUND’06 e 2nd LPE - International Conference on Grounding and Earthing & 2nd International Conference on Lightning Physics and Effects, Maceió, Novembro, 2006;
7. Marco A. M. Saran, Rafael R. Bonon, Manuel L. B. Martinez, Hermes R. P. M. De Oliveira, Carlo A. Nucci, Mario Paolone, “Performance of Medium Voltage Overhead Distribution Lines Against Lightning Discharges”, International CIGRÉ Symposium – TPLEPS – Transient Phenomena In Large Electric Power Systems, Zagreb, Croácia, Abril, 2007;
8. Marco A. M. Saran, Manuel L. B. Martinez, Hermes R. P. M. de Oliveira, “Modelos de Monte Carlo Para Linhas Aéreas de Distribuição em Média Tensão, Urbanas e Rurais, Frente a Descargas Atmosféricas”, XII ERIAC – Encontro Regional Ibero-Americano do CIGRÉ, Foz do Iguaçu, Maio, 2007;
9. Marco A. M. Saran, Manuel L. B. Martinez, Carlo A. Nucci, Mario Paolone, Hermes R. P. M. de Oliveira, “Comparação do Desempenho de Projetos de Linhas de Distribuição para Média Tensão Frente a Surto Induzidos”, XII ERIAC – Encontro Regional Ibero-Americano do CIGRÉ, Foz do Iguaçu, Maio, 2007;

10. Marco A. M. Saran, Manuel L. B. Martinez, Hermes R. P. M. de Oliveira, “Performance of Medium Voltage Urban and Rural Distribution Lines Front Lightning Discharges and Induced Surges”, 15th International Symposium on High Voltage Engineering, Liubiana, Eslovênia, Agosto, 2007;
11. Wikipédia, <http://www.wikipedia.org/>, Itens pesquisados: Log-normal, Weibull, SQL, Oracle, ArcGIS, Microsoft Access, MiniTAB;
12. Jorge Amon Filho, Marco Polo Pereira, “Curso Básico Sobre a Utilização do ATP”, CLAUE - Comitê Latino Americano de Usuários do EMTP/ATP, Novembro, 1996;
13. Carlos R. de Mello, Joaquim P. da Silva, Daniel F. Ferreira, “Modelos de Determinação de Sobretensão Atmosférica em uma Linha de Distribuição Rural”, UFLA, Lavras, 1999;
14. Maria C. D. Tavares, Paulo G. Campos, Paulo Prado, “Guia Resumido do ATP – Alternative Transient Program”, UNICAMP, Campinas, Novembro, 2003;
15. Mónica I. N. Patiño, Eduin J. G. Arbelaez, “Evaluacion de las Sobretensiones Producidas en Una Línea de Transmisión ante una Descarga Atmosférica Directa Mediante Simulación en Emtp-Atp”, Universidad de Antioquia, Medellín, Colômbia, 2001;
16. Manuel L. B. Martinez, Airton Violin, Otávio H. S. Vicentini, Marco A. M. Saran, Hermes R P M Oliveira, Renato Oling, Renata J. Bacheга, Cícero L. Borges, “Programa de Análise Confiabilidade de Alimentadores de Distribuição”, 5th CLAGTEE - Latin-American Congress: Electricity Generation And Transmission, 2003, São Pedro, SP;
17. Manuel L. B. Martinez, Otavio H. S. Vicentini, Airton Violin, Marco A. M. Saran, Renata J. Bacheга, Renato Oling, Hermes R P M Oliveira, Cícero L. Borges, “Distribution Reliability Analysis Program”, IEEE - Transmission and Distribution - Latin America, São Paulo, 2004;
18. Manuel L. B. Martinez, Otavio H. S. Vicentini, Marco A. M. Saran, Airton Violin, Renata J. Bacheга, Renato Oling, Hermes R P M Oliveira, Cícero L. Borges, “Distribution Reliability Analysis Program”, International Institute for Research and Education in Power Systems, Cortina D’Ampezzo, Itália, 2004;
19. Manuel L. B. Martinez, Otavio H. S. Vicentini, Airton Violin, Marco A. M. Saran, Hermes R P M Oliveira, Renata J. Bacheга, Renato Oling, Cícero L. Borges, “Distribution Reliability Analysis Program”, 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Lake Placid, EUA, 2004;
20. ATP Rule Book, CLAUE – Comitê Latino Americano de Usuários do EMTP/ATP, Revisão 2002;
21. Jorge Amon Filho, Marco Polo Pereira, “Curso Básico de Utilização do ATP”, CLAUE, Revisão 1996;
22. Maria C. D. Tavares, Paulo G. Campos, Paulo Prado, “Guia Resumido do ATP”, Unicamp, 2003;
23. Manuel L. B. Martinez, “Simulação de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas e Subestações”, FUPAI – Fundação de Pesquisa e Assessoramento à Indústria, 2002;
24. Alexandre Piantini, A. G. Kanashiro, J. C. Carneiro, “Surtos Transferidos à Rede Secundária via Transformadores de Distribuição Considerando o Efeito da Carga”, CITENEL – Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, 2003;
25. Paulo Futoshi Obase, “Surtos Atmosféricos Transferidos a Rede Secundária via Transformador”, Dissertação de Mestrado, USP, 2004;
26. Rogério Thomazella, “Implementação Computacional para Avaliar os Níveis de Sobretensões Atmosféricas Induzidas em Linhas de Distribuição”, Dissertação de Mestrado, UNESP Campus Bauru, 2004;
27. “Guidelines for Representation of Network Elements when Calculating Transients”, Working Group 33.02 (Internal Overvoltages), CIGRÉ – Conseil International des Grands Réseaux Électriques, 1990;
28. Mustafa Kizilcay, “Power System Transients and Their Computation”, Universidade de Ciências Aplicadas de Osnabrück, Alemanha, 2000;
29. “Manual da Distribuição”, ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, 2004, http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Manual_da_Distribuicao.pdf
30. Mario F. Triola, “Introdução à Estatística”, Nona Edição, LTC, 2005;
31. Douglas C. Montgomery, George C. Runger, “Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros”, Segunda Edição, LTC, 2003;
32. Cláudia M. Peixoto, Serguei Popov, Apostila de Estimação para a Proporção Populacional p, USP;
33. Aldemar A. Castro, Sebastião M. R. de Carvalho, Manuscrito do Projeto de Pesquisa (Parte VIII – Método Estatístico / Tamanho da Amostra), São Paulo, 2005;
34. Diego L. Coriolano, Marco A. M. Saran, Manuel L. B. Martinez, H. R. P. M. de Oliveira, E. L. Batista, “Análises Estatísticas dos Ensaio de Pára-Raios Convencionais a Carboneto de Silício Retirados das Redes de Distribuição em Média Tensão”, XVIII SENDI, Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, Olinda, 2008;
35. Marcos V. C. Xavier, Rafael B. B. Carvalho, Thiago C. C. de Barros, “Definição de Dados Construtivos de Pára-Raios Convencionais Instalados nas Redes de Distribuição em Média Tensão”, Trabalho de Conclusão de Curso, Orientador: Manuel L. B. Martinez, Universidade Federal de Itajubá, 2008;

Capítulo V

*"O prazer de conseguir algo implica na necessidade de existirem,
no início, dificuldades que nos levam a duvidar da vitória."*
Bertrand Russel

5.1. Conclusão

As descargas atmosféricas possuem grande impacto no desempenho dos sistemas elétricos de potência, principalmente naqueles com tensão nominal abaixo de 100 kV, como é o caso dos sistemas de distribuição e subtransmissão. Nestes, apesar da alta influência e importância, somente nos últimos anos as descargas atmosféricas começaram a ser mais estudadas, levando ao desenvolvimento de modelos melhores e mais precisos. Isto ocorreu, principalmente, pela exigência de índices de qualidade, confiabilidade e continuidade por parte das agências reguladoras.

Os estudos dos efeitos das descargas atmosféricas sobre os sistemas elétricos são processos complexos e dispendiosos, pois envolvem uma grande quantidade de fatores e modelagens. O próprio processo da descarga é muito difícil de ser explicado, sendo um fator de discussão ainda hoje. Isto gera uma gama de possibilidades de modelamento, com aproximações para tornar o modelo mais prático e adaptado à necessidade de estudos específicos.

Também o processo de simulação dos efeitos das descargas nas redes de distribuição é bastante complexo pela grande quantidade de fatores de influência, tais como: a topologia do sistema, equipamentos instalados, sistemas de dissipação e blindagem, estruturas elevadas nas proximidades, dentre outros.

Para contornar todas estas dificuldades, são necessárias algumas atitudes racionais para atingir um nível de simplificação no processo sem que os resultados sejam afastados dos resultados práticos, mantendo-se dentro de uma tolerância. Isto implica busca e desenvolvimento de modelos que atinjam um equilíbrio entre a

complexidade da modelagem e a aproximação dos resultados, além de exigir simulações estatísticas, através do Método de Monte Carlo.

Através do desenvolvimento de diversos estudos no LAT-EFEI, foi desenvolvido o código LIOV-EFEI para o cálculo de tensões induzidas. Este é baseado no Código LIOV desenvolvido na Universidade de Bolonha, porém adaptado para as condições nas quais seria utilizado no LAT-EFEI, gerando um código extremamente prático e eficiente.

Além disto, fez-se necessário o desenvolvimento de uma rotina, com a utilização de processos estocásticos. Esta rotina tem o objetivo de simular os efeitos de descargas atmosféricas, de interceptação direta ou através de indução eletromagnética, sobre os sistemas de distribuição de energia elétrica em média tensão. Assim todo um programa de simulação destas redes foi desenvolvido, o qual utiliza banco de dados geoposicionais contendo todas as informações pertinentes à rede, além de dados inseridos pelo usuário e o Método de Monte Carlo.

Com a utilização dos dados de redes reais, procedimentos estatísticos e algumas aproximações, a rotina de simulação atingiu um alto grau de capacidade de gerar casos com um excelente índice de proximidade com resultados de campo.

Através das simulações de desempenho dos sistemas para surtos provocados por descargas atmosféricas, de impacto direto ou através de indução eletromagnética, ficou evidente a possibilidade de melhoria das práticas para a proteção dos sistemas. Obtendo, para sistemas de predominância rural, um índice de surtos provocados por impacto direto da ordem de 4%, com intensidade de corrente média de descarga da ordem de 40 kA e intensidade de surto de tensão média da ordem de 6 kV.

Para uma rede urbana menos densa, ou seja, cidades não metropolitanas, onde a quantidade de construções elevadas é pequena, temos um índice de 15% de impactos diretos. Porém para uma rede urbana de região central de uma metrópole, com maior densidade de construções, foi obtido um índice de apenas 2% de impactos diretos. Os resultados para um caso médio apresentaram índices em torno de 10% de impactos diretos, com intensidade média de corrente de descarga da ordem de 12 kA e intensidade de surto de tensão média da ordem de 31 kV.

Fica assim evidenciada a preponderância do tipo do sistema a ser analisado para os resultados referentes às descargas atmosféricas. Pois sistemas em regiões rurais e diferentes sistemas em regiões urbanas apresentam resultados bem diferentes. Contudo, fica evidente a importância de maior estudo dos surtos provocados por indução eletromagnética sobre os causados por impacto direto, com a média ficando em torno de 90% dos casos sendo por indução. A Tabela 5.1 contém o resumo do desempenho dos sistemas para as descargas atmosféricas.

Tabela 5.1 – Resumo do Desempenho dos Sistemas Elétricos para as Descargas Atmosféricas

Sistema	Impactos Diretos	Intensidade Média de Corrente de Descarga	Intensidade Média dos Surtos de Tensão Induzidos
Rural	4%	40 kA	6 kV
Urbano Médio	10%	12 kA	31 kV

Para um estudo mais abrangente e preciso fez-se necessária a utilização de simulações de transitórios eletromagnéticos, onde modelos dos sistemas são simulados para diferentes casos de surtos provocados por descargas atmosféricas de impacto direto e também os provocados por indução eletromagnética.

Analisando os resultados das simulações dos surtos por descargas induzidas observamos que: nenhum pára-raios dissipou corrente superior a 1 kA, nenhum transformador foi submetido a uma tensão em seus terminais superior à sua suportabilidade e a possibilidade de ocorrência de abertura de arcos nos isoladores do sistema somente pôde ser verificada em 2 casos, ou seja, 4%.

Como esse panorama representou em torno de 90% dos casos, é evidente que os sistemas em média tensão não estariam sujeitos à falhas ou faltas ocasionadas por surtos provenientes de indução eletromagnética por descarga atmosférica. Porém, para que isto seja uma verdade absoluta, a condição operacional dos pára-raios, isoladores e a suportabilidade dos transformadores devem estar em condições satisfatórias. Fato este que, através de ensaios em laboratórios de unidades novas, reformadas e retiradas de campo, tem se apresentado em poucos casos.

Atentar também para a necessidade da presença de unidades de pára-raios nos terminais de alta-tensão de todos os transformadores instalados no sistema e ao longo das redes. Condição que, não raramente, é verificada inadequada ou pela falta de unidades ou pela má especificação das mesmas. Logo, temos que a não observância de

todos os requisitos, principalmente dos pára-raios e transformadores, acabam levando o sistema a situações de faltas e desligamentos mesmo para o caso de surtos provenientes de indução eletromagnética.

Já para os casos de simulação com surtos ocasionados por impactos diretos no sistema a situação se torna mais crítica. Pois temos que: a corrente média de dissipação dos pára-raios sobe para uma média de 9 kA, a tensão nos terminais dos transformadores superou a suportabilidade em 80% dos casos e a probabilidade de abertura de arcos nos isoladores ficou próxima a 50%.

A Tabela 5.2 contém um resumo das simulações de transitórios eletromagnéticos para o desempenho do sistema, nos casos de surtos provenientes de indução eletromagnética e nos de impacto direto. A Tabela 5.3 repete os mesmos dados da Tabela 4.5, a qual resume as probabilidades de queima de equipamentos, onde são mostrados os casos superiores a suportabilidade dos transformadores, NBI padrão da classe 15 kV, assim como as probabilidades de abertura de arco nos isoladores, onde são mostrados os casos superiores a suportabilidade dos isoladores, CFO padrão da classe 15 kV.

Tabela 5.2 – Resumo dos Resultados das Simulações de Transitórios Eletromagnéticos

Surto por:	Corrente Dissipada nos Pára-Raios [A]			Tensão nos Terminais dos Transformadores [kV]		
	Mínima	Média	Máxima	Mínima	Média	Máxima
Indução Eletromagnética	22	283	892	10	27	53
Impacto Direto	680	4.779	48.412	39	214	2.173

Tabela 5.3 – Resumo das Probabilidades de Falha de Equipamento e Abertura de Arco

Condição	Probabilidade
>NBI 95kV	80,0%
>NBI 110kV	73,3%
>CFO 150kV	46,7%
>CFO 175kV	35,6%
>CFO 200kV	26,7%
>CFO 225kV	20,0%

Fica evidente pelos valores apresentados que, para a condição de surto ocasionado por impacto direto, a probabilidade de falhas e faltas no sistema poderá ser muito alta. Nos pára-raios a intensidade de corrente de dissipação alcançou a marca de 48 kA, valor este superior a capacidade de quase a totalidade dos pára-raios utilizados em sistemas de distribuição de energia elétrica. Para os transformadores, a probabilidade de falha se situa na elevada faixa entre 70 e 80%, pois o valor de tensão

média de 214 kV é muito superior a maior suportabilidade padrão dos transformadores de 110 kV. Já a probabilidade de abertura de arcos voltaicos nos isoladores, na condição padrão com CFO de 150 kV, chega próxima a 50%, contudo este valor pode ser reduzido para 20% com a utilização de isoladores com maior suportabilidade, CFO de 225 kV.

Vale ressaltar que estes valores consideram as condições ideais dos equipamentos, podendo inclusive atingir valores mais elevados de probabilidade de falha para as condições reais de utilização dos mesmos. Logo, para surtos ocasionados por impactos diretos no sistema, a ocorrência de uma falta, queima e/ou desligamento é quase certa.

Para a validação dos resultados das simulações, uma comparação dos resultados de intensidades de corrente dissipadas pelos pára-raios foi efetuada com medições aproximadas em unidades de pára-raios a carboneto de silício (SiC) com centelhadores retiradas de campo, sendo o resultado apresentado na Figura 5.1.

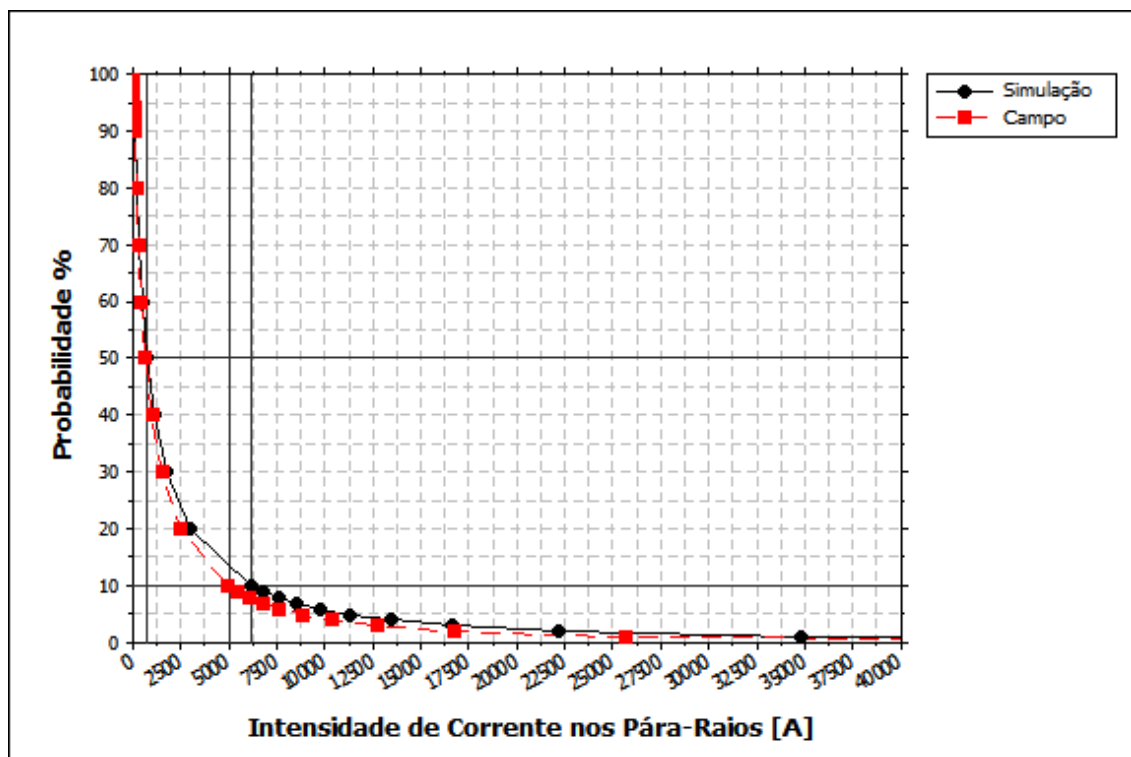


Figura 5.1 – Comparativo das Probabilidades de Ocorrência de Corrente nos Pára-Raios

A similaridade das simulações com os casos reais pode ser verificada, ocorrendo uma distorção para probabilidades menores que 40%, onde as simulações apresentaram valores de corrente superiores aos casos reais. Estas diferenças são devidas à abordagem

das simulações, a qual, com a utilização de vários modelos adotando simplificações e aproximações, tendem a apresentar um pequeno erro com relação ao evento físico que modelam, sendo então a somatória destes erros a causa desta discrepância entre os valores simulados e reais.

5.2. Recomendações de Práticas para as Concessionárias de Energia

♦ Pára-Raios:

Atentar para a especificação correta e qualidade das unidades, assim como buscar a melhor relação custo vs. benefício na utilização destes. Onde, através de estudos de coordenação de isolamento, pode-se chegar à melhor distribuição das unidades, atingindo um meio termo entre os critérios de máxima proteção e o mínimo de unidades.

Foi demonstrado que, para sistemas rurais, as unidades de pára-raios devem possuir capacidade de dissipação de corrente máxima de 40 kA. Enquanto que para sistemas urbanos é mais do que apropriado trabalhar com unidades que possuam uma capacidade de dissipação de corrente máxima de 10 kA. Contanto que a rede seja toda composta de linhas aéreas e as unidades de transformadores tenham uma qualidade assegurada.

♦ Isoladores:

Fica evidente que, elevando o NBI dos isoladores e conseqüentemente o CFO conjunto das estruturas, é possível reduzir significativamente a possibilidade de abertura de arcos e desligamentos, na ocorrência de surtos induzidos provocados por descargas atmosféricas.

♦ Transformadores:

Para se obter a melhor condição de proteção dos transformadores, evitando queimas por surtos provocados por descargas atmosféricas, principalmente por surtos induzidos, é imprescindível que estes sejam sempre especificados com o maior NBI de sua classe de tensão. Além de sempre,

impreterivelmente, utilizar unidades de pára-raios, corretamente especificados, em todas as fases do primário dos transformadores.

Recomenda-se também que sejam feitas verificações por ensaios amostrais regulares nos transformadores que serão instalados em campo, para atestar e assegurar sua qualidade. Um dos ensaios que podem melhor demonstrar a qualidade de um transformador é o ensaio de impulso atmosférico.

5.3. Recomendações para Trabalhos Futuros

Como sugestões para trabalhos futuros ficam as seguintes propostas:

1. Desenvolver modelos para o cálculo de tensões induzidas que levem em conta a condutividade do solo e a presença dos condutores de neutro e fases da baixa tensão;
2. Analisar o acoplamento eletromagnético e os surtos transferidos à baixa tensão avaliando os impactos para os consumidores;

5.4. Artigos

Artigos apresentados em simpósios e congressos, como autor ou co-autor e que colaboraram e forneceram a base para o desenvolvimento desta dissertação:

1. **“Programa de Análise Confiabilidade de Alimentadores de Distribuição”**, 5th CLAGTEE - Latin-American Congress: Electricity Generation And Transmission, São Pedro, SP, 2003;
2. **“Distribution Reliability Analysis Program”**, 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Lake Placid, EUA, 2004;
3. **“Distribution Reliability Analysis Program”**, IEEE - Transmission and Distribution - Latin America, São Paulo, 2004;
4. **“Distribution Reliability Analysis Program”**, International Institute for Research and Education in Power Systems, Cortina D’Ampezzo, Itália, 2004;
5. **“Desempenho Comparativo de Projetos de Linhas de Distribuição para Média Tensão Frente a Surtos Induzidos”**, SBSE – Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Campina Grande, PB, Julho, 2006;

6. **“Desempenho de Linhas de Distribuição para Média Tensão, Urbanas e Rurais, Frente a Descargas Atmosféricas Diretas e Surtos Induzidos”**, SENDI - Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, Belo Horizonte, MG, Agosto, 2006;
7. **“Performance of Medium Voltage Overhead Distribution Lines Against Lightning-Induced Voltages: A Comparative Analysis”**, GROUND’06 e 2nd LPE - International Conference on Grounding and Earthing & 2nd International Conference on Lightning Physics and Effects, Maceió, AL, Novembro, 2006;
8. **“Performance of Medium Voltage Urban And Rural Distribution Lines Front Lightning Discharges And Induced Surges”**, GROUND’06 e 2nd LPE - International Conference on Grounding and Earthing & 2nd International Conference on Lightning Physics and Effects, Maceió, AL, Novembro, 2006;
9. **“Performance of Medium Voltage Overhead Distribution Lines Against Lightning Discharges”**, International CIGRÉ Symposium – TPLEPS – Transient Phenomena In Large Electric Power Systems, Zagreb, Croácia, Abril, 2007;
10. **“Performance Analysis of Medium Voltage Overhead Distribution Line Against Lightning”**, 19th CIRED, International Conference on Electricity Distribution, Viena, Áustria, Maio, 2007;
11. **“Comparação do Desempenho de Projetos de Linhas de Distribuição para Média Tensão Frente a Surtos Induzidos”**, XII ERIAC – Encontro Regional Ibero-Americano do CIGRÉ, Foz do Iguaçu, PR, Maio, 2007. Premiado como terceira melhor contribuição técnica do comitê de estudos C4 do CIGRÉ: Desempenho de Sistemas Elétricos;
12. **“Modelos de Monte Carlo Para Linhas Aéreas de Distribuição em Média Tensão, Urbanas e Rurais, Frente a Descargas Atmosféricas”**, XII ERIAC – Encontro Regional Ibero-Americano do CIGRÉ, Foz do Iguaçu, PR, Maio, 2007;
13. **“Comparative Performance of Medium Voltage Overhead Distribution Lines Designs Submitted to Induced Voltages”**, Power Tech, Lausanne, Suíça, Julho, 2007;
14. **“Performance of Medium Voltage Urban and Rural Distribution Lines Front Lightning Discharges and Induced Surges”**, 15th International Symposium on High Voltage Engineering, Liubliana, Eslovênia, Agosto, 2007;
15. **“Definição de Limites Operacionais para Pára-raios Convencionais Instalados nas Redes de Distribuição em Média Tensão”**, SBSE – Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Belo Horizonte, MG, Abril, 2008;

16. “Análises Estatísticas dos Ensaios de Pára-Raios Convencionais a Carboneto de Silício Retirados das Redes de Distribuição em Média Tensão”, XVIII SENDI, Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, Olinda, PE, Outubro, 2008;

5.5. Bibliografia Geral

- Agrawal A.K., Price H.J., Gurbaxani S.H., “Transient response of a multiconductor transmission line excited by a nonuniform electromagnetic field”, IEEE Trans. on EMC 22-2 (1980) 119-129;
- Alberto Borghetti, Carlo Alberto Nucci, Mario Paolone, “Effect of Tall Instrumented Towers on the Statistical Distributions of Lightning Current Parameters and its Influence on the Power System Lightning Performance Assessment”, VII SIPDA (International Symposium on Lightning Protection), Curitiba, Novembro 2003;
- Aldemar A. Castro, Sebastião M. R. de Carvalho, Manuscrito do Projeto de Pesquisa (Parte VIII – Método Estatístico / Tamanho da Amostra), São Paulo, 2005;
- Alexandre Piantini, A. G. Kanashiro, J. C. Carneiro, “Surtos Transferidos à Rede Secundária via Transformadores de Distribuição Considerando o Efeito da Carga”, CITENEL – Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, 2003;
- Allan Greenwood, “Electrical Transients in Power Systems”, Segunda edição, John Wiley & Sons, 1991;
- Andrew R. Hileman, “Insulation Coordination for Power Systems”, Marcel Dekker Inc., 1999;
- ATP Rule Book, CLAUÉ – Comitê Latino Americano de Usuários do EMTP/ATP, Revisão 2002;
- C. F. Wagner, “Relation between stroke current and velocity of the return stroke”, AIEE Trans., pt. III, vol. 82, p. 606–617, 1963;
- C. F. Wagner, A. R. Hileman, “A new approach to the calculation of the lightning performance of transmission lines – Part III,” AIEE Trans. Part III, vol. 79, n. 3, p. 589-603, 1960;
- C. F. Wagner, G. D. McCann, “Induced voltages on transmission lines”, AIEE (American Institute of Electrical Engineers), Transactions 61, 916-930, 1942;
- C.P. Robert, G. Casella, “Monte Carlo Statistical Methods”, Segunda edição, Springer-Verlag, 2004;
- Carlo A. Nucci, Mario Paolone, “Calculation of Induced Voltages in Medium Voltage Overhead Systems due to Lightning Strokes Using the LIOV Code”, Relatório da segunda fase do projeto de pesquisa com a concessionária AES Sul, Outubro, 2003;
- Carlos R. de Mello, Joaquim P. da Silva, Daniel F. Ferreira, “Modelos de Determinação de Sobretensão Atmosférica em uma Linha de Distribuição Rural”, UFPA, Lavras, 1999;
- Christian Bouqueneau, “Lightning and Mythologies”, VIII International Symposium on Lightning Protection, São Paulo, Novembro de 2005;
- Cláudia M. Peixoto, Serguei Popov, Apostila de Estimação para a Proporção Populacional p, USP;
- “Coordenação de Isolamento”, Curso de Engenharia em Sistemas Elétricos de Potência, Volume 8, Série P.T.I., Convênio Eletrobrás/UFPA, 1979;
- Crow, E. L. e Shimizu, K., “Lognormal Distributions: Theory and Applications”, Dekker, 1988;
- Dailton G. Guedes, “Modelagem Matemática de Correntes na Torre da Estação Morro do Cachimbo”, INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2004;
- Diego L. Coriolano, Marco A. M. Saran, Manuel L. B. Martinez, H. R. P. M. de Oliveira, E. L. Batista, “Análises Estatísticas dos Ensaios de Pára-Raios Convencionais a Carboneto de Silício Retirados das Redes de Distribuição em Média Tensão”, XVIII SENDI, Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, Olinda, 2008;
- Dieter Kind, Kurt Feser, “High Voltage Test Techniques”, Segunda edição, Newnes, 2001;
- Douglas C. Montgomery, George C. Runger, “Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros”, Segunda Edição, LTC, 2003;
- E. Kuffel, W. S. Zaengl, J. Kuffel, “High Voltage Engineering - Fundamentals”, Segunda Edição, Newnes, 2000;
- E. R. Love, “Improvements on Lightning Stroke Modeling and Applications to the Design of EHV and UHV Transmission Lines”, Dissertação de Mestrado, Universidade do Colorado, 1973;
- G. Vernon Cooray, “The Lightning Flash”, IEE Power Series, Volume 34, 2003;
- Grupo de eletricidade atmosférica, ELAT, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE;
- “Guidelines for Representation of Network Elements when Calculating Transients”, Working Group 33.02 (Internal Overvoltages), CIGRÉ – Conseil International des Grands Réseaux Électriques, 1990;
- H. R. Armstrong, E. R. Whitehead, “Field and Analytical Studies of Transmission Lines Shielding”, IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, PAS-87, p. 270-281, 1968;

- Hélio Eiji Sueta, “Uso de Componentes Naturais de Edificações Como Parte Integrante do Sistema de Proteção Contra Descargas Atmosféricas – Uma Visão Relativa aos Danos Físicos”, Universidade de São Paulo, 2005;
- I. A. Metwally, F. H. Heidler, R. Nickel, “Computation of Collection Area and Probability of Lightning Strikes to Structures Using the Electrogeometric Model”, VIII SIPDA (International Symposium on Lightning Protection), São Paulo, 2005;
- “IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines”, IEEE Std 1410-2004, T&D Committee, IEEE Power Engineering Society;
- J. R. Lucas, “High Voltage Engineering”, Universidade de Moratuwa, Sri Lanka, 2001;
- Jens Schoene, “Analysis of Parameters of Rocket-Triggered Lightning Measured During the 1999 and 2000 Camp Blanding Experiment and Modeling of Electric and Magnetic Field Derivatives Using the Transmission Line Model”, Universidade da Flórida, 2002;
- João Mamede Filho, “Manual de Equipamentos Elétricos”, Terceira Edição, LTC, 2005;
- John G. Anderson, Thomas A. Short, “Algorithms for Calculation of Lightning Induced Voltages on Distribution Lines”, IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 8, Número 3, Páginas 1217-1225, Julho, 1993;
- Jorge Amon Filho, Marco Polo Pereira, “Curso Básico Sobre a Utilização do ATP”, CLAUE - Comitê Latino Americano de Usuários do EMTP/ATP, Novembro, 1996;
- L. V. Bewley, “Traveling Waves on Electric Power Systems”, Universidade de Lehigh, EUA, 1942;
- “Lightning Protection of Distribution Networks”, The Electricity Council, 1974;
- Lou van der Sluis, “Transients in Power Systems”, John Wiley & Sons, 2001;
- Luigi Paris, “Influence of Air Gap Characteristics on Line-to-Ground Switching Surge Strength”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, S.I., v. 86, n. 8, p. 936-947, 1967;
- Luigi Paris, R. Cortina, “Switching and Lightning Impulse Discharge Characteristics of Large Air Gaps and Long Insulator Strings”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, S.I., v. 87, n. 4, p. 947-957, 1968;
- “Manual da Distribuição”, ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, 2004, http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Manual_da_Distribuicao.pdf
- Manuel L. B. Martinez, “Simulação de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas e Subestações”, FUPAI – Fundação de Pesquisa e Assessoramento à Indústria, 2002;
- Manuel L. B. Martinez, Airton Violin, Otávio H. S. Vicentini, Marco A. M. Saran, Hermes R P M Oliveira, Renato Oling, Renata J. Bachega, Cicero L. Borges, “Programa de Análise Confiabilidade de Alimentadores de Distribuição”, 5th CLAGTEE - Latin-American Congress: Electricity Generation And Transmission, 2003, São Pedro, SP;
- Manuel L. B. Martinez, Otavio H. S. Vicentini, Airton Violin, Marco A. M. Saran, Hermes R P M Oliveira, Renata J. Bachega, Renato Oling, Cicero L. Borges, “Distribution Reliability Analysis Program”, 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Lake Placid, EUA, 2004;
- Manuel L. B. Martinez, Otavio H. S. Vicentini, Airton Violin, Marco A. M. Saran, Renata J. Bachega, Renato Oling, Hermes R P M Oliveira, Cicero L. Borges, “Distribution Reliability Analysis Program”, IEEE - Transmission and Distribution - Latin America, São Paulo, 2004;
- Manuel L. B. Martinez, Otavio H. S. Vicentini, Marco A. M. Saran, Airton Violin, Renata J. Bachega, Renato Oling, Hermes R P M Oliveira, Cicero L. Borges, “Distribution Reliability Analysis Program”, International Institute for Research and Education in Power Systems, Cortina D’Ampezzo, Itália, 2004;
- Manuel L. B. Martinez, Pedro H. M. dos Santos, “Estudo de Tensões Induzidas em Redes de Distribuição, Guia para Melhoria do Desempenho de Linhas Aéreas de Distribuição quanto a Descargas Atmosféricas”, Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá, Março, 2004;
- Marcelo M. F. Saba, “A Física das Tempestades e dos Raios”, Revista Física na Escola, vol. 2, no. 1, 2001;
- Marco A. M. Saran, Manuel L. B. Martinez, Carlo A. Nucci, Mario Paolone, Hermes R. P. M. de Oliveira, “Comparação do Desempenho de Projetos de Linhas de Distribuição para Média Tensão Frente a Surtos Induzidos”, XII ERIAC – Encontro Regional Ibero-Americano do CIGRÉ, Foz do Iguaçu, Maio, 2007;
- Marco A. M. Saran, Manuel L. B. Martinez, Hermes R. P. M. de Oliveira, “Modelos de Monte Carlo Para Linhas Aéreas de Distribuição em Média Tensão, Urbanas e Rurais, Frente a Descargas Atmosféricas”, XII ERIAC – Encontro Regional Ibero-Americano do CIGRÉ, Foz do Iguaçu, Maio, 2007;
- Marco A. M. Saran, Manuel L. B. Martinez, Hermes R. P. M. de Oliveira, “Performance of Medium Voltage Urban and Rural Distribution Lines Front Lightning Discharges and Induced Surges”, 15th International Symposium on High Voltage Engineering, Liubliana, Eslovênia, Agosto, 2007;
- Marco A. M. Saran, Rafael R. Bonon, Manuel L. B. Martinez, Hermes R. P. M. De Oliveira, Carlo A. Nucci, Mario Paolone, “Desempenho Comparativo de Projetos de Linhas de Distribuição para Média Tensão Frente a Surtos Induzidos”, SBSE – Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Campina Grande, Julho, 2006;
- Marco A. M. Saran, Rafael R. Bonon, Manuel L. B. Martinez, Hermes R. P. M. De Oliveira, Carlo A. Nucci, Mario Paolone, “Performance of Medium Voltage Overhead Distribution Lines Against Lightning Discharges”, International CIGRÉ Symposium – TPLEPS – Transient Phenomena In Large Electric Power Systems, Zagreb, Croácia, Abril, 2007;
- Marco A. M. Saran, Rafael R. Bonon, Manuel L. B. Martinez, Hermes R. P. M. De Oliveira, Carlo A. Nucci, Mario Paolone, “Performance of Medium Voltage Overhead Distribution Lines Against Lightning-Induced Voltages: A Comparative Analysis”,

- GROUND'06 e 2nd LPE - International Conference on Grounding and Earthing & 2nd International Conference on Lightning Physics and Effects, Maceió, Novembro, 2006;
- Marcos V. C. Xavier, Rafael B. B. Carvalho, Thiago C. C. de Barros, "Definição de Dados Construtivos de Para-Raios Convencionais Instalados nas Redes de Distribuição em Média Tensão", Trabalho de Conclusão de Curso, Orientador: Manuel L. B. Martinez, Universidade Federal de Itajubá, 2008;
- Maria C. D. Tavares, Paulo G. Campos, Paulo Prado, "Guia Resumido do ATP – Alternative Transient Program", UNICAMP, Campinas, Novembro, 2003;
- Maria E. B. Frediani, "Tempestades Severas", Universidade de São Paulo, 2003;
- Mario F. Triola, "Introdução à Estatística", Nona Edição, LTC, 2005;
- Mario Paolone, "Modeling of Lightning-Induced Voltages on Distribution Networks for the Solution of Power Quality Problems, and Relevant Implementation in a Transient Program", Tese de Ph.D., Universidade de Bolonha, Itália, 2001.
- Miriam Dora Chávez Lope, "Análise Probabilística de Variações de Tensão de Curta Duração em Redes de Distribuição", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Maranhão, 2005;
- Mónica I. N. Patiño, Eduin J. G. Arbelaez, "Evaluacion de las Sobretensiones Producidas en Una Línea de Transmisión ante una Descarga Atmosférica Directa Mediante Simulación en Emtp-Atp", Universidad de Antioquia, Medellín, Colômbia, 2001;
- Mustafa Kizilcay, "Power System Transients and Their Computation", Universidade de Ciências Aplicadas de Osnabrück, Alemanha, 2000;
- N. Metropolis, S. Ulam, "The Monte Carlo Method", Journal of the American Statistical Association, volume 44, número 247, 1949;
- Norma Brasileira NBR 6936/1992, "Técnicas de Ensaio Elétricos de Alta-Tensão", Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT, 1992;
- Norma Brasileira NBR 6939/2000, "Coordenação do Isolamento - Procedimento", Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT, 2000;
- Norma IEEE Std. C57.12.90-1999, "Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers", Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., IEEE, 1999;
- Nucci C.A., Mazzetti C., Rachidi F., Ianoz M., "On lightning return stroke models for LEMP calculations", XIX ICLP (International Conference on Lightning Protection), Graz, Austria, Abril 1988;
- Nunziante Graziano, "Análise de Confiabilidade e Melhoria da Taxa de Falhas para Cubículos Classe 15 kV", Dissertação de Mestrado, USP, 2006;
- Odim Mendes Jr, Margarete Oliveira Domingues, "Introdução à Eletrodinâmica Atmosférica", Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 24, no. 1, Março de 2002;
- Paolone M., Nucci C.A., Rachidi F., "A New Finite Difference Time Domain Scheme for the Evaluation of Lightning Induced Overvoltage on Multiconductor Overhead Lines", V ICPST (International Conference on Power System Transient), volume 2, Rio de Janeiro, 2001;
- "Parameters of Lightning Strokes: A Review", Lightning and Insulator Subcommittee of T&D Committee, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 1, Janeiro de 2005;
- Paulo Futoshi Obase, "Surtos Atmosféricos Transferidos a Rede Secundária via Transformador", Dissertação de Mestrado, USP, 2004;
- Pedro H. M. dos Santos, "Análise de Desempenho Frente a Impulsos Atmosféricos Induzidos em Circuitos de Média Tensão", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Março, 2007;
- Pedro H. Mendonça dos Santos, Manuel L. B. Martinez, "Estudo de Transitórios Eletromagnéticos; Estudo de Tensões Induzidas em Redes de Distribuição; Guia para a Melhoria do Desempenho de Linhas Aéreas de Distribuição quanto a Descargas Atmosféricas", Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá e AES Eletropaulo, 2004;
- "Protection of MV and LV Networks against Lightning", Joint CIGRE-CIRED Working Group C4.4.02, 2005;
- R. H. Golde, "Lightning", Vol. 1, Academic Press, 1977;
- Rachidi F., Nucci C.A., "On the Master, Lin, Uman, Standler and the Modified Transmission Line lightning return stroke current models", Journal of Geophysical Research 95, 1990;
- Ricardo G. de Oliveira Jr., "Tensões Induzidas em Linhas de Média Tensão", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Agosto, 2008;
- Rogério Thomazella, "Implementação Computacional para Avaliar os Níveis de Sobretensões Atmosféricas Induzidas em Linhas de Distribuição", Dissertação de Mestrado, UNESP Campus Bauru, 2004;
- Sérgio W. G. da Silveira, "Um Estudo Sobre os Dispositivos de Localização de Descargas Atmosféricas", Universidade Federal de Mato Grosso, 2003
- "Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento – Aplicação em Sistemas de Potência de Alta Tensão", Furnas, 1987;
- "Transmission Line Reference Book", Segunda Edição, EPRI – Electric Power Research Institute, 1982;
- Uman M.A., McLain D.K., Krider E.P., "The electromagnetic radiation from a finite antenna", American Journal of Physics, 1975, Volume 43;

Vic Smith, Venathanar Llango, Sarath Perera, Vic Gosbell, Duane Robinson, “Transient Overvoltages on The Electricity Supply Network – Classification, Causes and Propagation”, Nota Técnica 8, Centro de Confiabilidade e Qualidade de Energia, Universidade de Wollongong, Austrália, 2005;

Vladimir A. Rakov, Martin A. Uman, “Lightning: Physics and Effects”, Cambridge University Press, 2006;

W. Diesendorf, “Insulation Coordination in High-voltage Electric Power Systems”, 1974;

Wikipédia, <http://www.wikipedia.org/>, Itens pesquisados: Log-normal, Weibull, SQL, Oracle, ArcGIS, Microsoft Access, MiniTAB;

William A. Chisholm, John G. Anderson, Ray Lings, “Lightning Protection of Transmission Lines Above 200 kV”, VIII SIPDA (International Symposium on Lightning Protection), São Paulo, Novembro 2005;

Working Group 01 (Lightning) of Study Committee 33 (Overvoltages and Insulation Co-ordination), “Guide to Procedures for Estimating the Lightning Performance of Transmission Lines,” CIGRÉ, 1991;

"Só sei que nada sei"
Sócrates