

Universidade Estadual de Campinas Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação Departamento de Sistemas e Controle de Energia

"O Impacto do Aumento da Urbanização nos Níveis das Tensões Induzidas por Descargas Atmosféricas nas Proximidades de Linhas de Transmissão"

Fernando Zago

Mestre em Engenharia Elétrica

Prof. Dr. José Pissolato Filho

Orientador

Tese submetida à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas, para preenchimento dos pré-requisitos parciais para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. José Pissolato Filho – UNICAMP/ FEEC/ DSCE Prof. Dr. Sérgio Kurokawa - UNICAMP/ FEEC/ DSCE Prof. Dr. Edson Adriano Vendrusculo - UNICAMP/ FEEC/ DSCE Prof. Dr. Geraldo Peres Caixeta - USF Dr. José Antônio Donizete Rossi – Fundação CPqD

Campinas, 18 de junho de 2009.

Ficha Catalográfica

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

Z13i	Zago, Fernando O impacto do aumento da urbanização nos níveis das tensões induzidas por descargas atmosféricas nas proximidades de linhas de transmissão / Fernando Zago. Campinas, SP: [s.n.], 2009.
	Orientador: José Pissolato Filho. Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.
	 Raios. 2. Eletricidade atmosférica. 3. Linhas de telecomunicações. 4. Compatibilidade eletromagnética. Indução eletromagnética. I. Pissolato Filho, José. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Título em Inglês: The Impact of urbanization on the distribution of lightning induced voltages on overhead lines Palavras-chave em Inglês: Lightning, Electricity atmospheric, Telecommunication

lines, Electromagnetic compatibility, Electromagnetic induction Área de concentração: Energia Elétrica Titulação: Doutor em Engenharia Elétrica Banca examinadora: Sérgio Kurokawa, Geraldo Peres Caixeta, José Antônio Donizete Rossi, Edson Adriano Vendrusculo

Data da defesa: 18/06/2009

Programa de Pós Graduação: Engenharia Elétrica

Comissão Julgadora – Tese de Doutorado

Candidato: Fernando Zago

Data da Defesa: 18 de junho de 2009

Título da Tese: "O Impacto do Aumento da Urbanização nos Níveis das Tensões Induzidas por Descargas Atmosféricas nas Proximidades de Linhas de Transmissão"

Jan 1
Prof. Dr. José Pissolato Filho (Presidente):
Dr. José Antônio Donizete Rossi:
Prof. Dr. Geraldo Peres Caixeta
Prof. Dr. Sérgio Kurokawa:
Dr. Edson Adriano Vendrúsculo: (Ala_ /-1. / In dow) who

Agradecimentos

Aos meus pais, *Antônio* e *Maria*, pelo amor, suporte e incentivos dados ao longo de toda minha vida;

Ao professor *José Pissolato Filho* pelas lições de vida, grande amizade, força e imprescindível orientação ao longo da realização deste trabalho;

À Raquel pelo constante apoio, ajuda e por ser minha grande fonte de inspiração;

Ao professor Geraldo Peres Caixeta pelo apoio e amizade inestimáveis.

A todos os funcionários do Laboratório de Alta Tensão -LAT da UNICAMP pela ajuda prestada;

Aos inúmeros amigos e professores da *FEEC*, da *UFMG*, do *CPqD* e da *France Telecom*, que sempre contribuíram de alguma forma;

À *CAPES* pelo importante suporte financeiro.

Resumo

Alguns dos principais danos causados por descargas atmosféricas são de origem indireta, ou seja, originam-se dos campos eletromagnéticos provenientes deste tipo de fenômeno natural resultando em problemas de compatibilidade eletromagnética ou em desafios para os projetistas de sistemas de proteção de surtos e de blindagens contra este tipo de interferência.

Este trabalho trata de um destes efeitos indiretos, tensões induzidas em linhas aéreas por descargas atmosféricas próximas, utilizando-se das mais recentes pesquisas na área de campos eletromagnéticos provenientes deste tipo de fenômeno natural. Através de uma rigorosa formulação matemática do canal da descarga atmosférica, assim como, dos campos eletromagnéticos provenientes dele, no caso de conexão direta com o solo ou com um objeto elevado (torre ou prédio aterrados), e da consideração de diferentes expressões para o cálculo do raio de atração dos objetos elevados, foi possível realizar um estudo comparativo dos efeitos da urbanização nas proximidades de uma linha aérea com relação ao aumento ou diminuição dos níveis de tensões e correntes induzidas quando da ocorrência de descargas atmosféricas próximas. Estes efeitos foram analisados através de simulações computacionais considerando variações em diversos parâmetros associados à urbanização, tais como: quantidade de objetos elevados, altura média dos objetos elevados, modelo de raio de atração e densidade de ocupação ou de urbanização.

A partir da pesquisa realizada durante este trabalho e do programa computacional desenvolvido, são propostas metodologias para se avaliar as modificações nos padrões de ocorrência dos níveis de tensões induzidas de origem atmosférica em linhas aéreas localizadas em diferentes cenários de ocupação urbana ou nas proximidades de objetos elevados como, por exemplo, torres de telecomunicações.

Abstract

Some of the worst damage caused by lightning is indirect, that is, it is caused by electromagnetic fields radiated from this kind of natural phenomenon resulting in electromagnetic compatibility problems or in challenges for designers of surge protection systems and shields against these interferences.

This work considers one of these indirect effects, induced voltages on overhead lines by nearby atmospheric lightning discharges, using some of the most recent research in the area of electromagnetic fields generated by these natural phenomena. Starting from a rigorous mathematical formulation for a lightning channel, as well as for the electromagnetic fields generated by them, for the case of lightning striking the soil directly or an elevated grounded object, it was possible to carry out a comparative study of the urbanization effects close to an overhead line with respect to the increase or decrease of the induced voltages and currents when nearby lightning discharges occur. These effects were analyzed using computational simulations considering variations in some parameters associated with urbanization, such as: number of elevated objects, elevated objects average height, different models for the calculation of attractive radius and occupation or urbanization density.

Taking into account the research and the computational program developed in this work, methodologies to evaluate the modifications on the occurrence patterns of lightning induced voltages on overhead lines localized at different urban occupation landscapes or at the vicinity of elevated objects like telecommunication towers, were proposed.

Lista de Figuras	
Lista de Tabelas	xiv
Capítulo 1: Introdução	1
Capítulo 2: As Descargas Atmosféricas	8
2.1 Histórico	8
2.2 Características físicas das descargas atmosféricas	10
2.3 Instrumentos de medidas dos parâmetros de uma descarga atmosférica	17
2.3.1 Moinho de campo	18
2.3.2 Antenas capacitivas	19
2.3.3 Sensor de campo magnético	20
2.3.4 Sensor de velocidade	21
2.3.5 Medidor da corrente de retorno	21
2.4 Descargas atmosféricas trigadas ou induzidas artificialmente	22
2.5 Descargas atmosféricas em torres	26
2.6 Sistemas de localização de descargas atmosféricas	31
Capítulo 3: Modelagem Matemática	32
3.1 Modelagem do canal da descarga e da corrente de retorno	33
3.1.1 Modelos de engenharia	34
3.1.2 Corrente i ₀ (t) na base do canal	39
3.1.3 Descargas atmosféricas conectadas a objetos elevados	40
3.2 Expressões para o cálculo dos campos eletromagnéticos	45
3.3 Tensões induzidas a partir do campo eletromagnético incidente	56
3.4 Raios de atração das torres	67
3.5 Mapeamento das tensões induzidas	70

Sumário

4.1 As correntes de retorno	
4.2 Os campos eletromagnéticos gerados	
4.3 As tensões induzidas	
Capítulo 5: A Influência da urbanização	106
5.1 Mapeamento das tensões induzidas	
5.2 Alterações percentuais em relação ao caso base	113
Capítulo 6: Conclusões e trabalhos futuros	119
Referências Bibliográficas	
Anexo	
Paper presented at 29 th Internacional Conference on Lightning Protection - <i>ICLP</i> . Sweden	2008, Uppsala -

Lista de Figuras

Figura 2.1: Distribuição de cargas em uma nuvem do tipo cumulonimbus (adaptado de [Gary, 1995])
Figura 2.2: Formação da descarga atmosférica (adaptado de [Uman, 1987])12
Figura 2.3: Características temporais de uma descarga atmosférica (adaptado de [Uman, 1987])
Figura 2.4: Classificação das descargas atmosféricas (adaptado de [Berger et al., 1975])15
Figura 2.5: Esquema de um moinho de campo ou "Field Mill" (adaptado de [Uman,1987])
Figura 2.6: Esquemas de antenas capacitivas (adaptado de [Uman,1987])20
Figura 2.7: Sensor de campo magnético (adaptado de [Uman, 1987])20
Figura 2.8: Descarga atmosférica trigada conectada (adaptado de [Rakov, 1999])23
Figura 2.9: Descarga atmosférica trigada não-conectada (adaptado de [Rakov, 1999])23
Figura 2.10: Corrente na base do canal da descarga atmosférica25
Figura 2.11: Campo elétrico durante uma descarga atmosférica trigada (não-conectada)25
Figura 2.12: Corrente ao longo da torre: (a) 509m e (b) 474m (adaptado de [Hussein <i>et al.</i> , 2002])
Figura 2.13: Corrente ao longo da torre Ostankino (adaptado de [Rakov, 2001])
Figura 3.1: Torre aterrada conectada ao canal da descarga (adaptado de [Bermudez <i>et al.</i> , 2005])
Figura 3.2: Esquema espacial do dipolo elétrico vertical e dos campos observados no ponto (ρ,z ²)
Figura 3.3: Linha de transmissão terminada em cargas distintas
Figura 3.4: Circuito representativo do acoplamento eletromagnético entre uma linha de transmissão e os campos gerados por uma descarga atmosférica
Figura 3.5: Definição da área em torno da linha vítima (área ou grid do mapeamento)71

Figura 3.6: Conexão do canal da descarga ao solo em todos os pontos no interior do grid (caso base)
Figura 3.7: Conexão da descarga atmosférica às torres sobre todos os pontos no interior do grid
Figura 3.8: Pontos dentro (cruzes) e fora do raio de atração das torres para raio de atração = 2x∆grid
Figura 4.1: Corrente de retorno na posição $z = 200m$ em função da impedância de terra (Z_g)
Figura 4.2: Corrente de retorno na posição $z = 200m$ em função da velocidade de propagação (v)
Figura 4.3: Corrente de retorno na posição $z = 200m$ em função da impedância de terra (Z_g)
Figura 4.4: Corrente de retorno na posição $z = 200m$ em função da velocidade de propagação (v)
Figura 4.5: Corrente de retorno na posição $z = 200m$ em função da altura (<i>h</i>) do objeto elevado
Figura 4.6: Corrente de retorno na posição $z = 200m$ em função da impedância (Z_{ch}) do canal
Figura 4.7: Corrente de retorno na posição z = 200m em função do modelo de canal adotado
Figura 4.8: Módulo da corrente no canal da descarga (conexão direta com o solo)
Figura 4.9: Fase da corrente no canal da descarga (conexão direta com o solo)
Figura 4.10: Campo elétrico vertical em função da distância do ponto de observação ao canal
Figura 4.11: Campo elétrico horizontal em função da distância do ponto de observação ao canal
Figura 4.12: Campo magnético horizontal em função da distância do ponto de observação ao canal
Figura 4.13: Campo elétrico horizontal em função da distância do ponto de observação ao canal para $\sigma_2 = 0.01$ S/m e $\epsilon_r = 1091$
Figura 4.14: Campo elétrico vertical em função das características do solo92

Figura 4.15: Campo elétrico horizontal em função das características do solo	93
Figura 4.16: Campo magnético horizontal em função das características do solo	93
Figura 4.17: Campo elétrico vertical em função da altura do ponto de observação	94
Figura 4.18: Campo elétrico horizontal em função da altura do ponto de observação	94
Figura 4.19: Campo magnético horizontal em função da altura do ponto de observação	95
Figura 4.20: Tensão induzida em função do tipo de solo (impacto direto no solo)	97
Figura 4.21: Tensão induzida em função da terminação (Z_{carga}) da linha aérea (impacto direto solo)	o no 98
Figura 4.22: Tensão induzida em função da altura (<i>h</i>) da linha aérea (impacto direto solo)) no 99
Figura 4.23: Tensão induzida em função da extensão (L) da linha aérea (impacto direto solo)) no 99
Figura 4.24: Disposição espacial da linha aérea e do canal da descarga conectado solo	ao .100
Figura 4.25: Tensão induzida em função da distância (ΔL) entre a linha e o ponto de conexão canal	o do .101
Figura 4.26: Disposição espacial da linha aérea e do canal da descarga conectado à torre estudo	em .101
Figura 4.27: Tensão induzida em função da distância (ΔL) entre a linha e a torre ($\sigma_{top} = -0.5$ e σ_{1})	102
Figura 4.28: Tensão induzida em função da distância (ΔL) entre a linha e a torre ($\sigma_{top} = 0 e \sigma_{top}$).	103
Figura 4.29: Tensão induzida em função da altura (<i>h</i>) da torre ($\sigma_{top} = -0.5$ e $\sigma_{bot} = 1$)	.103
Figura 4.30: Razão entre as tensões induzidas por descargas conectadas às torres e solo	ao .104
Figura 5.1: Linha vítima utilizada no mapeamento do caso base (descargas conectadas solo)	s ao 107
Figura 5.2: Mapeamento do caso base.	.108
Figura 5.3: Mapeamento do caso com 30 torres com $h = 50$ m.	.109

Figura 5.4: Mapeamento do caso com 30 torres com $h = 50m$ (vista tri-dimensional)	110
Figura 5.5: Mapeamento do caso com 30 torres com $h = 100$ m	111
Figura 5.6: Mapeamento do caso com 30 torres com $h = 100m$ (vista tri-dimensional)	112
Figura 5.7: Mapeamento do caso com 95 torres com $h = 50$ m	113
Figura 5.8: Mapeamento do caso com 95 torres com $h = 100$ m	114
Figura 5.9: Mapeamento do caso com 95 torres com $h = 50m$ (vista tri-dimensional)	115
Figura 5.10: Mapeamento do caso com 95 torres com $h = 100m$ (vista tri-dimensional)	115
Figura 5.11: Diferenças percentuais entre o caso base (solo) e os casos com torres	116
Figura 5.12: Mapeamento do caso com 342 torres com $h = 100m$ (alta den ocupação)	sidade de 117
Figura 5.13: Diferenças percentuais entre o caso base (solo) e o caso com alta der ocupação.	nsidade de 117
Figura A.1: Fig. 2(a) extraída de [Rakov e Baba, 2006]	136
Figura A.2: Fig. 3(a) extraída de [Rakov e Baba, 2006]	136
Figura A.3: Fig. 4(a) extraída de [Rakov e Baba, 2006]	137
Figura A.4: Fig. 10(a) extraída de [Rakov et al., 2005].	137
Figura A.5: Fig. 11(a) extraída de [Rakov et al., 2005].	138
Figura A.6: Fig. 10(d) extraída de [Rakov et al., 2005]	
Figura A.7: Fig. 3(a) extraída de [Rubinstein, 1996].	139
Figura A.8: Fig. 3(b) extraída de [Rubinstein, 1996].	139
Figura A.9: Fig. 3(c) extraída de [Rubinstein, 1996].	140
Figura A.10: Fig. 12 extraída de [Rachidi et al., 1996].	140
Figura A.11: Fig. 2(b) extraída de [Rakov e Baba, 2006].	141
Figura A.12: Fig. 3(b) extraída de [Rakov e Baba, 2006].	141

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Dados relativos às descargas atmosféricas
Tabela 2.2: Corrente na base do canal de descargas atmosféricas trigadas (adaptado de [Rakov, 1999])
Tabela 2.3: Parâmetros das correntes de descargas descendentes (adaptado de [Berger et al.,1975])
Tabela 2.4: Parâmetros de correntes de descargas negativas na Itália (adaptado de [Uman, 1987]).
Tabela 2.5: Parâmetros de descargas naturais na África do Sul (adaptado de [Fisher <i>et al.</i> , 1993])
Tabela 3.1: Modelos de engenharia (adaptado de [Rakov, 1997])
Tabela 3.2: Performance dos modelos de engenharia (adaptado de [Baba et al., 2004])37
Tabela 3.3: Parâmetros das duas funções de Heidler para obtenção da corrente na base do canal
Tabela 3.4: Coeficientes de reflexão e impedâncias típicas (adaptado de [Rakov e Baba,2006])44
Tabela 3.5: Constantes do modelo eletrogeométrico propostas por diferentes autores
Tabela 3.6: Constantes do modelo físico propostas por diferentes autores
Tabela 4.1: Parâmetros da corrente na base do canal (adaptado de [Nucci et al., 1990])81
Tabela 4.2: Parâmetros dos meios com condutividade finita (adaptado de [Rakov et al.,2005])

CAPÍTULO 1

A pesar de ser um dos fenômenos naturais mais belos e intensos, as descargas atmosféricas freqüentemente causam grandes perdas materiais e mesmo perdas de vidas humanas. Atuando como uma das principais fontes naturais de interferências eletromagnéticas, as descargas atmosféricas têm sido objeto de estudos de inúmeras áreas do vasto campo coberto pela engenharia elétrica. Em especial, os grandes avanços na microeletrônica nos últimos anos e o seu uso cada vez mais disseminado em todo o tipo de equipamento elétrico torna esta área bastante susceptível aos danos causados pelos campos eletromagnéticos provenientes deste tipo de fenômeno natural.

A evolução da microeletrônica é baseada, principalmente, na diminuição do tamanho físico destes componentes (processo chamado de miniaturização) e, conseqüentemente, em uma enorme diminuição nos níveis lógicos de decisão em que eles operam. Além disso, houve um grande aumento na quantidade de potência processada por unidade de volume dos componentes e a freqüência de operação de alguns deles já está na ordem de algumas dezenas de gigahertz, ou seja, com pulsos elétricos apresentando tempos de subida da ordem de dezenas de picossegundos. Tudo isso vêm influenciando negativamente na fragilidade destes componentes frente aos mais diversos tipos de interferências eletromagnéticas, dentre estas as de origem atmosférica, existentes nos ambientes escolhidos para abrigá-los.

Além da atuação direta sobre sistemas elétricos sensíveis através da geração de campos eletromagnéticos perturbadores, as descargas atmosféricas freqüentemente danificam ou causam problemas de operação destes equipamentos de forma indireta, ou seja, através do acoplamento eletromagnético entre o canal da descarga e linhas aéreas de energia ou de telecomunicações, as quais devido à ocorrência de tal fenômeno passam a apresentarem surtos de tensões e de correntes induzidas. Desta forma, o campo de estudos ligado às descargas atmosféricas é bastante amplo e deve contemplar desde pequenos detalhes no projeto de equipamentos, de forma a lhes conferir níveis adequados de blindagem eletromagnética, até grandes modificações nos sistemas de transmissão de energia elétrica e de telecomunicações, através da inserção de dispositivos de proteção adequadamente dimensionados.

Os maiores desafios para aqueles que pesquisam descargas atmosféricas, ou que se deparam com a necessidade de desenvolver dispositivos de proteção contra estes fenômenos naturais, são o caráter estocástico e a grande magnitude das correntes e das tensões induzidas envolvidas. Estas características tornam o estudo experimental de descargas atmosféricas um processo bastante lento e que exige somas consideráveis de recursos financeiros, portanto as simulações computacionais acabam adquirindo importância fundamental na realização de estudos complementares aos experimentais e mesmo no preparo destes.

A pesquisa na área de descargas atmosféricas envolve infindáveis caminhos diferentes conforme exposto anteriormente e constitui ainda um assunto praticamente em início de exploração se forem consideradas as dúvidas e divergências existentes em torno dele. Podemos citar como exemplos de linhas de pesquisa na área:

- > Tensões induzidas em linhas aéreas ou subterrâneas de energia e de telecomunicações;
- Campos eletromagnéticos gerados por descargas a curta, a média e a longas distâncias;

- Comportamento dos campos gerados dependendo da estrutura de impacto da descarga (solo, torres, sistemas de proteção contra descargas atmosféricas – SPDA, etc);
- Influência da condutividade do solo nos níveis de tensão induzida ou na propagação dos campos eletromagnéticos gerados;
- Distribuição estatística dos diversos parâmetros que compõem a corrente proveniente de uma descarga atmosférica (por exemplo: tempo de frente de onda, tempo de cauda, corrente de pico, etc);
- Modelos para representação do canal da descarga;
- Comportamento de SPDAs e de malhas de aterramento frente aos surtos de corrente de origem atmosférica;
- Elaboração de modelos reduzidos de SPDAs, de linhas aéreas e de canais de descarga para teste em laboratório;
- Experimentos em escala real com descargas atmosféricas trigadas através de foguetes para avaliação de SPDAs, de linhas aéreas ou subterrâneas e de sistemas de telecomunicações;
- Desenvolvimento de programas computacionais;
- > Teste de estruturas pré-fabricadas em concreto armado frente a impulsos atmosféricos;
- > Teste de materiais utilizados na fuselagem de aviões frente a impulsos atmosféricos;
- ► Etc;

Além de ser composta por uma grande diversidade de temas, a pesquisa na área de descargas atmosféricas é bastante dinâmica, principalmente se for considerado o crescente número de publicações na área que cada ano estão mais presentes em variados congressos científicos.

Este trabalho de doutorado buscou focar o estudo de tensões induzidas em linhas aéreas por descargas atmosféricas utilizando-se das mais recentes pesquisas na área de campos eletromagnéticos

provenientes deste tipo de fenômeno natural. Com estas ferramentas em mãos, buscou-se elucidar computacionalmente a influência da urbanização no comportamento das tensões induzidas de origem atmosférica em linhas aéreas.

Através de uma rigorosa formulação matemática do canal da descarga atmosférica, assim como, dos campos eletromagnéticos provenientes dele, no caso de conexão direta com o solo ou com um objeto elevado (torre ou prédio aterrados), e da consideração de diferentes expressões para o cálculo do raio de atração dos objetos elevados, foi possível realizar um estudo comparativo dos efeitos da urbanização nas proximidades de uma linha aérea com relação ao aumento ou diminuição dos níveis de tensões e correntes induzidas quando da ocorrência de uma descarga atmosférica próxima. Estes efeitos foram analisados através de simulações computacionais considerando variações em diversos parâmetros, tais como: quantidade de objetos elevados, altura média dos objetos elevados, modelo de raio de atração e densidade de ocupação ou de urbanização (proximidade entre os objetos elevados metálicos).

O trabalho contou ainda com inúmeros testes das expressões utilizadas, incluindo comparações com trabalhos de outros autores, para cálculo dos campos eletromagnéticos gerados e das tensões e correntes induzidas na linha vítima (linha sob análise).

Neste estudo, foram utilizadas expressões e metodologias suficientemente bem testadas e aceitas pela comunidade científica internacional para tentar estabelecer algumas relações entre a urbanização e as tensões induzidas de origem atmosférica em linhas aéreas e estimular as pesquisas na área, além disso, este material acabará servindo para futuras comparações com dados experimentais obtidos no Centro Internacional de Pesquisas e Testes de Raios - CIPTR do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) de Cachoeira Paulista.

Capítulo 1 Introdução

A experiência adquirida pelo autor durante parte da graduação e durante o mestrado, consolidada através da participação em experimentos reais com descargas atmosféricas trigadas artificialmente no CIPTR-INPE e com o estágio de pesquisa realizado na France Telecom em Lannion, França, na área de perturbações eletromagnéticas em linhas de telecomunicações, oriundas de explosões nucleares na alta atmosfera, serviram como uma sólida base para o desenvolvimento deste trabalho que acabou englobando todo o conhecimento adquirido na área ao longo de vários anos de estudos. Assim sendo, é importante vislumbrar este trabalho não apenas como um novo tópico de estudos na área, mas também como uma convergência de diversas linhas de pesquisa recentes sobre o assunto.

Como em todo o trabalho com forte predomínio de simulações computacionais deve-se ter cuidado redobrado com a interpretação correta dos resultados, foi dada especial atenção à validação dos modelos adotados através de comparações com resultados de outros autores, os quais muitas vezes também são frutos do mesmo tipo de abordagem teórica, dando-se sempre ênfase àqueles dados provenientes de experimentos realizados com descargas reais.

O fator que desencadeou a idéia central deste trabalho e o conseqüente interesse pelo seu estudo mais aprofundado, foi o acelerado aumento no número de torres de telefonia celular nas proximidades de linhas de transmissão de energia elétrica. Intuitivamente, entre os especialistas na área, existe um consenso de que estas proximidades devem determinar algumas modificações nos padrões de ocorrência de sobretensões oriundas de perturbações eletromagnéticas desencadeadas por descargas atmosféricas, mas, se elas existirem, que tipo de alterações são estas e quais as suas importâncias no que diz respeito aos cuidados que devem ser tomados na implantação de sistemas de proteção? Quais parâmetros, aparentemente, têm maior influência negativa ou positiva e, principalmente, dentre estes quais podem ser controlados pelos responsáveis pelo projeto destes sistemas ou pela implantação destas torres? Os resultados provenientes deste trabalho certamente carregarão consigo variações consideráveis com relação aos eventuais valores absolutos experimentais que virão a existirem sobre este assunto, mas, também, certamente nos evidenciarão a coerência existente entre o comportamento apresentado por este modelo computacional e pelos modelos experimentais. Desta forma, o que se almejou neste trabalho não foram valores absolutos precisos das grandezas consideradas, já que isto é praticamente impossível de ser alcançado sem exaustivos testes e ajustes realizados em conjunto e concomitantemente aos experimentos reais, porém características evidentes de comportamento ou tendências, que certamente existiriam em situações reais, foram objetivadas.

Optou-se por realizar este estudo utilizando-se o software Matlab 7[®] devido ao enorme leque de opções e facilidades que este software apresenta [Hanselman e Littlefield, 1998], imprescindíveis para a programação de um problema complexo como este.

Outra característica que contribuiu para o elevado nível de complexidade final apresentado pelo programa desenvolvido, assim como, para a impossibilidade de desenvolvimento de tempos de execução menores, foi o uso de expressões, para o cálculo dos campos eletromagnéticos e para a representação do acoplamento eletromagnético entre estes campos e a linha vítima, no domínio da freqüência, apesar deste ser um estudo predominantemente de fenômenos transitórios. Isto foi necessário pela maior facilidade de dedução e de programação encontrados na modelagem neste domínio, ao contrário do que aconteceria no domínio do tempo. Devido a esta peculiaridade, o uso de transformadas rápidas de Fourier (IFFT- Inverse Fast Fourier Transform / FFT- Fast Fourier Transform), com taxas de amostragem e número de pontos exaustivamente escolhidos e testados, foi extensivamente empregado.

Capítulo 1 Introdução

Os elevados prejuízos financeiros advindos de desligamentos de linhas de transmissão de energia elétrica ou mesmo a destruição de equipamentos de alto custo por surtos de tensões induzidas por descargas atmosféricas seriam suficientes para justificarem a pesquisa feita neste trabalho, mas, além destas situações mais extremas, existe a preocupação cada vez maior com a qualidade de energia fornecida aos clientes das companhias de distribuição de energia elétrica, as quais devem obedecer às normas cada vez mais rígidas de controle de qualidade. Desta forma, a expansão do setor de telefonia celular, bem como o aumento da urbanização com seus elevados edifícios e construções, podem afetar indiretamente os setores de distribuição de energia elétrica no que diz respeito a mudanças nos padrões das perturbações de origem atmosférica em seus sistemas e, conseqüentemente, em seus sistemas de proteção de rede.

Na prática, seria muito difícil para as agências reguladoras estabelecerem estratégias eficientes de coordenação entre estes setores levando em conta este tipo de influência, embora seja importante conhecer a existência do fenômeno e o se grau de intensidade de forma quantitativa para tentar prever e, desta forma, prevenir-se de problemas em longo prazo, já que os eventuais ou potenciais efeitos devastadores de uma descarga atmosférica em um determinado local podem levar anos para serem revelados devido ao seu caráter aleatório de ocorrência.

CAPÍTULO 2



s características das descargas atmosféricas de maior interesse para este trabalho são o posicionamento espacial e a extensão do canal da descarga, assim como a velocidade e as formas de onda da corrente elétrica presentes nele. Estes são os dados fundamentais para a representação adequada do fenômeno da indução eletromagnética em linhas aéreas de energia ou de telecomunicações.

Serão descritos sinteticamente neste capítulo alguns conceitos ligados ao fenômeno físico da descarga atmosférica utilizados ao longo deste trabalho e a sua interação com as linhas aéreas.

2.1 Histórico

A fascinação que os raios exercem sobre o ser humano não é recente, pois existem símbolos mitológicos e ritos envolvendo raios datando de mais de 2000 a.C. [Golde,1977]. Tratados como algo com origens sobrenaturais, eram considerados a grande arma dos deuses.

Para os gregos quem detinha o poder de castigar usando os raios era Zeus, para os romanos era Júpiter e para os vikings esse deus era Thor. No oriente, existem estátuas de Buda segurando raios em suas mãos. Índios da América do Norte acreditavam que os raios eram provenientes do místico pássaro trovão que, quando batia as asas, produzia o som característico.

Toda a magia e misticismo existente em torno dos raios ainda podem ser verificados facilmente nos dias de hoje. Um exemplo disto é a chamada "pedra de raio", que se origina no ponto de impacto do raio com o solo devido à fusão deste e que é buscada e guardada por muitas pessoas em suas casas, pois estas acreditam que as guardando estarão protegidas contra os raios.

Somente a partir do século XVII os pesquisadores começaram a perceber as características elétricas dos raios e que, por ocasião das tempestades, era possível captar eletricidade e carregar os corpos da mesma forma que se fazia com as conhecidas máguinas eletrostáticas existentes na época.

Benjamin Franklin realizou o primeiro estudo científico dos raios durante a segunda metade do século XVIII. Naquela época, a ciência já estava desenvolvida a ponto de ser possível separar cargas elétricas positivas e negativas e estocá-las em primitivos capacitores, que podiam gerar faíscas facilmente observáveis.

Enquanto muitos já haviam notado uma grande semelhança entre as faíscas obtidas em laboratório e os raios, Franklin foi o primeiro a projetar um experimento capaz de comprovar a sua natureza elétrica. Franklin propôs mais de um experimento, porém o mais famoso foi aquele a partir do qual foi possível a obtenção durante uma tempestade de faíscas elétricas entre um fio metálico preso a uma pipa e objetos metálicos aterrados ao solo.

Franklin foi também o primeiro cientista a propor um método de proteção de edifícios contra raios, que consistia de uma haste metálica de 2,5 a 3m acima do edifício e aterrada ao solo.

Pouco progresso havia sido alcançado na compreensão das propriedades dos raios até o final do século XIX, quando a fotografia e a espectroscopia passaram a estarem disponíveis para este tipo de pesquisa. Medidas de corrente foram feitas na Alemanha por Pockels (1897-1900), que analisou o campo magnético induzido pela corrente da descarga e estimou os seus valores [Arnold, 1997].

A pesquisa moderna data do trabalho de C.T.R.Wilson, que fez pela primeira vez o uso de medidas do campo elétrico, tentando entender a organização das cargas elétricas envolvidas em uma descarga atmosférica [Arnold, 1997].

Nas últimas décadas, as pesquisas sobre raios avançaram muito devido à necessidade cada vez maior de proteção que os atuais sistemas eletrônicos exigem e, principalmente, devido aos enormes prejuízos causados em todo o mundo por este fenômeno natural capaz de destruir edificações, tirar a vida, queimar florestas inteiras e derrubar aviões e ônibus espaciais.

2.2 Características físicas das descargas atmosféricas

Para que uma descarga atmosférica possa ocorrer é necessário que a nuvem fique carregada eletricamente. A explicação mais aceita para a ocorrência deste fenômeno é a de que pequenas partículas presentes no interior da nuvem, compostas por poeira, água e cristais de gelo (hidrometeoros), crescem e interagem entre si através de colisões. A partir destas colisões as partículas menores adquirem carga elétrica positiva, enquanto as partículas maiores, carga elétrica negativa [Arnold, 1997].

Estas partículas, através da ação de movimentos de convecção e da própria força da gravidade, acabam separando-se e tornando a parte superior da nuvem carregada positivamente e a parte inferior negativamente. Esta separação de cargas produz uma enorme diferença de potencial no interior da nuvem e desta para o solo.

A diferença de potencial entre a nuvem e o solo pode chegar a milhões de Volts e, eventualmente, pode ocorrer a ruptura dielétrica do ar e o raio ter início [Uman, 1994].

A Figura 2.1 representa a distribuição típica de cargas em uma nuvem do tipo cumulonimbus que, durante uma tempestade, dará origem às descargas entre a nuvem e o solo.



Figura 2.1: Distribuição de cargas em uma nuvem do tipo cumulonimbus (adaptado de [Gary, 1995]).

O processo mais comum de formação de uma descarga atmosférica, levando-se em conta a distribuição de cargas elétricas na nuvem, no canal da descarga e no solo, é representada esquematicamente na

Figura 2.2. Nela é representada uma descarga atmosférica nuvem-solo descendente, de polaridade negativa, embora existam muitos outros tipos de descargas atmosféricas, estas descargas representam 90% das descargas entre nuvem e solo [Uman, 1994].



Figura 2.2: Formação da descarga atmosférica (adaptado de [Uman, 1987]).

Quando o gradiente do potencial elétrico provocado pela concentração de cargas na nuvem excede a rigidez dielétrica do ar, tem início o processo da descarga atmosférica. As cargas caminham em direção à terra passo a passo por caminhos não-lineares, constituindo o chamado líder descendente. A duração média de cada passo do líder é de 1µs e neste tempo ele percorre uma distância em torno de 10 e 50m, sempre buscando o percurso mais fácil (de menor resistividade) para a formação de um canal ionizado entre a nuvem e o solo [Uman ,1994; Berger, 1994].

Para [Uman ,1994] existe uma pausa entre 20 e 50µs entre cada passo do líder descendente, enquanto para [Berger, 1994] este tempo está em torno de 30 e 50µs.

A carga total transportada pelo líder descendente apresenta um valor em torno de 5 Coulombs de cargas negativas em direção ao solo, em um tempo médio de dezenas de milessegundos.

De acordo com [Uman ,1994], a velocidade média do líder descendente é de 200km/s e o valor da sua corrente média situa-se entre 100A e 1kA, com pulsos de corrente em torno de 1kA. Conforme o líder descendente se aproxima do solo ocorre uma grande intensificação do campo elétrico. Isto origina um movimento de cargas de polaridades opostas às do líder descendente resultando no líder ascendente, que parte de algum ponto do solo em direção à nuvem. Em algum ponto entre o solo e a nuvem, os líderes descendente e ascendente se encontram dando origem a um canal ionizado contínuo e, conseqüentemente, tem-se o início da corrente de retorno.

A corrente de retorno se propaga por este canal pré-ionizado, que pode ser considerado um condutor não-linear, com perdas e eletricamente carregado, anulando as suas cargas e, posteriormente, as cargas da nuvem. Esta corrente apresenta uma frente de onda que pode variar de 1 a 10µs e tempo de semicauda entre 20 e 60µs com amplitudes na faixa de 10 a 100kA. A sua velocidade de propagação pode variar de 6% a 45% da velocidade da luz no vácuo [Uman, 1984]. O tempo de trânsito da corrente de retorno ao longo do canal é da ordem de 100µs e a velocidade próxima ao solo é mais alta que próxima à nuvem [Uman, 1994].

Quando o centro de cargas da nuvem que iniciou o processo da descarga atmosférica é completamente descarregado, o seu potencial elétrico fica bastante reduzido em relação aos outros centros de carga existentes na nuvem e, desta forma, ocorrem descargas subseqüentes. Estas descargas descarregam os outros centros de carga da nuvem pelo canal ionizado formado durante a primeira descarga, porém

seguindo um caminho sem ramificações e com velocidade bem maior que a primeira. Uma representação temporal de uma descarga atmosférica nuvem-terra, incluindo a primeira corrente de retorno e duas descargas subseqüentes, é feita na Figura 2.3.



Figura 2.3: Características temporais de uma descarga atmosférica (adaptado de [Uman, 1987]).

Quatro tipos de descargas atmosféricas, levando-se em consideração os pontos entre os quais elas são observadas, podem ser destacadas [Uman, 1994]:

- Descarga nuvem-terra;
- Descarga nuvem-nuvem;
- Descarga dentro da própria nuvem;
- Descarga nuvem-atmosfera.

As descargas também são classificadas pelas polaridades, ou seja, positiva ou negativa, dependendo da polaridade das cargas depositadas no canal durante sua formação. A classificação também é feita de

acordo com a direção de propagação: ascendentes ou descendentes. Estes tipos de descargas são representados esquematicamente na Figura 2.4.



Figura 2.4: Classificação das descargas atmosféricas (adaptado de [Berger et al., 1975]).

Embora não sejam as mais comuns, as descargas de maior relevância para este trabalho são aquelas que ocorrem entre a nuvem e a terra, pois são estas as mais perigosas e as grandes responsáveis pelas tensões induzidas nas estruturas estudadas. As descargas mais comuns são aquelas que ocorrem dentro da própria nuvem, porém para este trabalho elas são consideradas irrelevantes.

Na análise do fenômeno da indução eletromagnética em linhas e estruturas metálicas, a primeira corrente de retorno deve ser considerada a mais importante, pois apresenta uma amplitude maior que as descargas subseqüentes. A Tabela 2.1 representa alguns dados importantes relativos às descargas atmosféricas negativas descendentes [Uman, 1984; Santos, 2000].

Formação do canal da descarga					
Propagação passo a passo					
	Mínimo	Médio	Máximo		
Comprimento do passo [m]	3	50	200		
Intervalo de tempo entre passos [µs]	30	50	125		
Velocidade média de propagação [m/s]	1×10^{5}	$1,5x10^{5}$	$2,6x10^{6}$		
Carga depositada no canal [C]	3	5	20		
Propagação Contínua					
	Mínimo	Médio	Máximo		
Velocidade média de propagação [m/s]	$1x10^{6}$	$2x10^{6}$	$2,1x10^{7}$		
Carga depositada no canal [C]	0,2	1	6		
Corrente de retorno					
	Mínimo	Médio	Máximo		
Velocidade média de propagação [m/s]	2x10 ⁷	8x10 ⁷	1,6x10 ⁸		
Taxa de subida da corrente [kA/µs]	< 1	10	> 80		
Tempo de pico da corrente [µs]	< 1	2	30		
Valor de pico da corrente [kA]	-	10-20	110		
Tempo de semi-cauda da corrente [µs]	10	40	250		
Carga transferida excluindo a corrente contínua [C]	0,2	2,5	20		
Comprimento do canal [km]	2	5	14		
Diâmetro do canal [cm]	1,5	5	200		
Descarga atmosférica			-		
	Mínimo	Médio	Máximo		
Número de descargas (inicial mais subseqüentes)	1	3-4	26		
Intervalo de tempo entre inicial e subseqüente [ms]	3	40	100		
Duração da descarga [s]	0,01	0,2	2		
Carga transferida incluindo a corrente contínua [C]	3	25	90		

Tabela 2.1: Dados relativos às descargas atmosféricas.

Outra característica típica das descargas atmosféricas é o trovão. Este som é gerado pelo aquecimento do canal durante a descarga, algo em torno de 20.000 °C (três vezes a temperatura na superfície do Sol), que causa uma grande compressão no ar produzindo uma onda de choque, que decai como uma onda acústica se propagando a partir do canal do raio [Arnold, 1997].

2.3 Instrumentos de medidas dos parâmetros de uma descarga atmosférica

A modelagem dos campos eletromagnéticos provenientes de descargas atmosféricas e, conseqüentemente, das tensões induzidas por elas é influenciada determinantemente pelos seus parâmetros medidos experimentalmente. Alguns destes parâmetros foram tabelados na seção anterior. Além de conhecer adequadamente estes inúmeros parâmetros e as suas faixas de variação, é importante e interessante saber como eles são obtidos experimentalmente para que a modelagem computacional do problema seja a mais completa possível.

No estudo moderno de descargas atmosféricas, instrumentos bastante sofisticados são empregados para a obtenção de parâmetros como: campos eletromagnéticos gerados a diferentes distâncias, velocidade de propagação da corrente de retorno em diferentes altitudes, formas de onda da corrente de retorno na base do canal, luminosidade da descarga, espectro óptico do canal, valores de temperatura e de vapor d'água no canal da descarga (espectroscopia), etc. Nesta seção, discutiremos brevemente algumas técnicas experimentais utilizadas para a obtenção dos três primeiros parâmetros citados, pois estes constituem o conjunto de maior interesse na determinação de efeitos como a interferência eletromagnética gerada pela descarga.

2.3.1 Moinho de campo

As descargas atmosféricas apresentam duração típica total da ordem de 1 segundo, enquanto as diversas sub-etapas do processo podem apresentar durações variando de alguns milessegundos a até menos que 1 microssegundo, desta forma, os campos eletromagnéticos associados às variações de corrente e de carga no canal são representados por uma larga banda de freqüências, com seus principais conteúdos na faixa de 0,1 Hz a 10 MHz [Uman,1987]. Devido a estas características, são necessários dois tipos diferentes de sensores de campo eletromagnético: para medições das componentes de baixa freqüência e das de alta. A medição das componentes de baixa freqüência do campo elétrico gerado (campo eletrostático), é feita por um equipamento chamado moinho de campo ("Field Mill"). Já as componentes de alta freqüência são medidas por antenas capacitivas.

O moinho de campo, Figura 2.5, é composto por duas placas segmentadas metálicas, sendo a placa superior aterrada e com movimento giratório e a inferior fixa. Este dispositivo é capaz de ser sensibilizado pelas cargas induzidas na placa inferior devido ao campo elétrico ambiente. A placa rotatória converte um campo de variação relativamente lenta com o tempo (chamado de campo estático) em um sinal de tensão alternada aplicada em um resistor (sensor). A amplitude da tensão sobre este resistor é proporcional ao campo elétrico ambiente com resposta em freqüência na faixa de 1 até 19 kHz [Uman,1987]. Estes moinhos de campo são usados para medir as componentes do campo elétrico de baixas freqüências provenientes das descargas atmosféricas, assim como, para identificar a aproximação de um temporal pelo aumento do campo gerado pelas nuvens típicas de tempestade.



Figura 2.5: Esquema de um moinho de campo ou "Field Mill" (adaptado de [Uman, 1987]).

2.3.2 Antenas capacitivas

As antenas capacitivas são utilizadas para medir as componentes de campo elétrico de rápida variação geradas por uma descarga atmosférica. A carga Q(t) induzida pelo campo elétrico é medida por um circuito eletrônico e transmitida para um sistema de registro, como ilustrado na Figura 2.6. Nos circuitos ilustrados na Figura 2.6, um capacitor aterrado ou um circuito eletrônico integrador é usado para integrar a corrente Q(t)/dt fluindo para a antena capacitiva. Existe uma constante de tempo presente no circuito que determina a freqüência máxima de corte do sensor.

Os esquemas apresentados na Figura 2.6 são de dispositivos utilizados para medir as componentes de alta freqüência do campo elétrico vertical no nível do solo gerado por uma descarga atmosférica, embora existam outros tipos de antenas, sistemas combinados como, por exemplo, antenas esféricas, para medição das três componentes do campo elétrico ao mesmo tempo [Uman,1987].



Figura 2.6: Esquemas de antenas capacitivas (adaptado de [Uman, 1987]).

2.3.3 Sensor de campo magnético

Os sensores de campo magnético mais simples utilizados são aqueles formados por loops de fios metálicos. A tensão induzida no loop é proporcional à derivada no tempo da densidade de fluxo magnético perpendicular à antena. O sinal deve então ser integrado para obter o campo magnético. A Figura 2.7 mostra o esquema de um sensor de campo magnético e seus circuitos eletrônicos associados.



Figura 2.7: Sensor de campo magnético (adaptado de [Uman, 1987]).

2.3.4 Sensor de velocidade

Outro importante parâmetro utilizado na modelagem de descargas atmosféricas é a velocidade da frente de onda da corrente de retorno no canal. Um exemplo recente de dispositivo criado para realizar este tipo de medição é o chamado Automatic Lightning Discharge Progressing Feature Observation System (ALPS) criado por pesquisadores japoneses e que consiste de uma câmera de lente única de 35mm acoplada a uma longa cadeia de finos fotodiodos colocados atrás da lente dentro da câmara do filme fotográfico. A cadeia de fotodiodos é conectada a um computador e, à medida que a luz emitida pela descarga atmosférica sensibiliza os fotodiodos, um sinal elétrico é transmitido para o computador. Conhecendo-se a distância entre cada segmento da descarga (aproximadamente 29m) e o tempo de propagação entre eles, obtidos pelo sinal transmitido ao computador, a velocidade da corrente de retorno pode ser estimada [Hussein *et al.*,1995; Yokoyama *et al.*, 1990].

2.3.5 Medidor da corrente de retorno

A medição da corrente de retorno na base do canal da descarga atmosférica pode ser feita basicamente de duas maneiras: através de experimentos com descargas trigadas artificialmente com o uso de foguetes, como no CIPTR em Cachoeira Paulista, ou através de elevadas torres instrumentadas. Em ambos os casos, podem-se utilizar dois tipos de dispositivos diferentes: o shunt de precisão ou bobinas de Rogowski [Rogowski e Steinhaus, 1912]. No sistema de shunt de precisão, toda a corrente da descarga passa pelo resistor, que deve estar localizado abaixo da estrutura de impacto da descarga, e a corrente é medida através da tensão obtida entres os terminais da resistência, normalmente através de um sistema óptico. Por outro lado, através do sistema de bobinas de Rogowski, é medida a tensão induzida por uma descarga atmosférica, conduzida através de um condutor de descida para a terra e

passando pelo interior da bobina, integrada no tempo. A desvantagem deste sistema em relação ao shunt é a impossibilidade de realizar a medida da componente contínua da descarga [Golde, 1977].

2.4 Descargas atmosféricas trigadas ou induzidas artificialmente

Nesta seção, serão brevemente apresentados os experimentos envolvendo descargas atmosféricas trigadas, como as obtidas no CIPTR localizado no INPE de Cachoeira Paulista. Utilizando os dispositivos especiais apresentados na seção anterior, juntamente com osciloscópios, computadores, sistemas de conversão eletro-óptico, pequenos foguetes, bobinas de cobre e kevlar, é possível desencadear descargas atmosféricas em locais pré-determinados e realizar a medição de seus diversos parâmetros. Existem dois tipos de descargas trigadas, conforme as Figura 2.8 e 2.9: as chamadas descargas conectadas ou clássicas, onde o fio formado por cobre e kevlar é preso ao foguete em uma extremidade e na outra é conectado a terra, e as descargas não-conectadas ou de altitude, onde a extremidade mais baixa do fio é composta somente por material isolante (kevlar) e a mais alta por cobre e kevlar.

A vantagem da técnica não-conectada sobre a conectada reside no fato da primeira conseguir reproduzir melhor o comportamento do líder ascendente de uma descarga natural, embora esta técnica exija níveis de campo elétrico mais elevados para desencadear todo o processo (cerca de 10kV/m).

É importante notar que o comportamento dos líderes e das correntes de retorno obtidas com descargas atmosféricas trigadas, utilizando-se a técnica dos foguetes, é muito semelhante ao comportamento das descargas subseqüentes naturais, embora as porções iniciais do processo natural e artificial sejam ligeiramente diferentes entre si. Descargas trigadas ocorrem normalmente sob condições em que as descargas naturais não se iniciariam e a porção inferior do canal da descarga trigada acaba sendo
contaminada por resíduos metálicos do fio de cobre e kevlar [Jordan *et al.*, 1992]. Além disso, as descargas atmosféricas artificiais ou trigadas acabam sempre apresentando um número maior de descargas subseqüentes, maior velocidade do líder descendente e um intervalo menor entre descargas subseqüentes que o observado nas descargas naturais [Idone e Orville, 1985].



Figura 2.8: Descarga atmosférica trigada conectada (adaptado de [Rakov, 1999]).



Figura 2.9: Descarga atmosférica trigada não-conectada (adaptado de [Rakov, 1999]).

Os primeiros raios trigados (conectados) foram obtidos na década de 1960 por pequenos foguetes lançados de embarcações localizadas na costa da Flórida-EUA, mas somente em 1973 em Saint Privat d'Allier-França foi obtida a primeira descarga atmosférica trigada (conectada) sobre terra firme. Ao longo das décadas seguintes diversos centros de pesquisa de descargas atmosféricas trigadas se espalharam ao redor do mundo [Rakov, 1999].

No ano 2000, foi instalado o CIPTR (Centro Internacional de Pesquisas e Testes de Raios) no INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) de Cachoeira Paulista, São Paulo-Brasil, que hoje conta com uma boa infra-estrutura para a realização de inúmeros experimentos com descargas atmosféricas trigadas constituindo um gigantesco laboratório a céu aberto. Neste avançado centro de pesquisas, é possível realizar medições de inúmeros parâmetros relativos às descargas atmosféricas trigadas, tais como: corrente na base do canal para conexão com o solo, corrente no alto de uma torre de telefonia celular com 30m de altura, tensões e correntes induzidas e conduzidas no interior de uma estação rádiobase, tensões induzidas em uma linha de telefonia de aproximadamente 2,6km de extensão, tensões em malhas de aterramento, campos eletromagnéticos gerados, etc. Combinações entre estes experimentos podem levar a consideráveis avanços nas técnicas e normas utilizadas pelos projetistas de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas, pois permitem uma visualização em escala real das diversas interações existentes entre cada sistema. Por exemplo, é possível avaliar como uma linha de telecomunicações ou de transmissão de energia elétrica nas proximidades de uma torre de telefonia celular é afetada por descargas conectadas no alto desta ou avaliar como se comporta o sistema de aterramento da estação rádio-base frente a uma perturbação de origem atmosférica real.

Como exemplos, a Figura 2.10 mostra a forma de onda da corrente na base do canal (nível do solo) de uma descarga atmosférica trigada (não-conectada, 60m de isolante) com 6 descargas subseqüentes obtida no CIPTR, enquanto a Figura 2.11 mostra o campo elétrico vertical registrado por um moinho de

campo durante a tempestade e o disparo do foguete (assinalado por uma seta), que desencadeou o evento.



Figura 2.10: Corrente na base do canal da descarga atmosférica.



Figura 2.11: Campo elétrico durante uma descarga atmosférica trigada (não-conectada).

A Tabela 2.2 resume os dados relativos às descargas atmosféricas trigadas (conectadas) no Centro Espacial Kennedy, Flórida-EUA, e em Saint Privat d'Allier, França.

Local	Anos	Número de amostras	Corrente d	e pico (kA)	Pico da derivada da corrente (kA/µs)	
			Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
EUA	1985, 1991	305/134	12,1	9,0	91,4	97,1
França	1986, 1990-1991	54/47	9,8	5,6	36,8	25,4

Tabela 2.2: Corrente na base do canal de descargas atmosféricas trigadas (adaptado de [Rakov, 1999]).

2.5 Descargas atmosféricas em torres

Uma grande parcela daquilo que se conhece sobre os parâmetros das descargas atmosféricas se deve a dados coletados com a ajuda de torres instrumentadas. A maior coletânea deste tipo foi feita por [Berger *et al.*, 1975] na Suíça (Monte San Salvatore-914m de altitude) por torres de 90 e de 70m de altura.

A Tabela 2.3 resume os dados coletados por Berger e seus colaboradores para descargas descendentes, embora existam controvérsias com relação aos tempos de frente de onda e aos valores máximos da derivada da corrente (di/dt), pois os equipamentos usados por Berger, para realizar as medidas, operavam com limitada largura de banda. Foram utilizados oscilógrafos de raios catódicos de alta velocidade instalados em 1958 com resolução de 0,5 µs [Golde,1977].

Outros pesquisadores também obtiveram dados da mesma maneira, como Garbagnati e Dellera, que mediram correntes de descargas atmosféricas em torres de televisão localizadas no topo de duas montanhas (900m de altitude) [Golde, 1977; Uman, 1987], uma no norte da Itália, próximo ao Monte San Salvatore e outra na parte central da Itália.

Parâmetros	Unidade	Número de	Porcentagem excedendo os valores tabelados			
		amostras	95%	50%	5%	
Corrente de pico (min. 2 kA)						
Primeira descarga negativa	kA	101	14	30	80	
Descargas negativas subseqüentes	kA	135	4,6	12	30	
Primeira descarga positiva	kA	26	4,6	35	250	
Carga (carga total)						
Primeira descarga negativa	С	93	1,1	5,2	24	
Descargas negativas subseqüentes	С	122	0,2	1,4	11	
Tempo de frente (2 kA até pico)						
Primeira descarga negativa	μs	89	1,8	5,5	18	
Descargas negativas subseqüentes	μs	118	0,22	1,1	4,5	
Primeira descarga positiva	μs	19	3,5	22	200	
Máximo <i>di/dt</i>						
Primeira descarga negativa	kA/μs	92	5,5	12	32	
Descargas negativas subseqüentes	kA/μs	122	12	40	120	
Primeira descarga positiva	kA/µs	21	0,20	2,4	32	
Duração (2 kA até meia onda)						
Primeira descarga negativa	μs	90	30	75	200	
Descargas negativas subseqüentes	μs	115	6,5	32	140	
Primeira descarga positiva	μs	16	25	230	2000	
Integral $(i^2 dt)$	Λ^2	01	6.0×10^3	5.5×10^4	5.5×10^5	
Primeira descarga negativa	$A^{2}s$	91 88	$0,0 \times 10^{2}$	$5,5 \times 10^{3}$	$5,3 \times 10^4$	
Descargas negativas subseqüentes	Λ^2 s	26	$3,3 \times 10^{4}$	6.5×10^3	$3,2 \times 10^{7}$	
Primeira descarga positiva	A S	20	2,3 X 10	0,5 X 10	1,5 X 10	
Intervalo de tempo						
(entre descargas negativas)	ms	133	7	33	150	

Tabela 2.3: Parâmetros das correntes de descargas descendentes (adaptado de [Berger et al., 1975]).

A Tabela 2.4 resume os dados obtidos por Garbagnati e seus colaboradores e inclui também dados sobre descargas ascendentes.

Na década de 1970, Eriksson e seus colaboradores realizaram experimentos do mesmo tipo na África do Sul, nesta oportunidade foi utilizada uma torre de 60m de altura sobre um solo relativamente plano. Mais de 50% das descargas registradas foram descendentes negativas, não havendo sido registradas descargas positivas. Além disso, foram registrados tempos de subida bastante curtos como jamais fora

obtido em experimentos anteriores. A Tabela 2.5 resume os dados obtidos por Eriksson e Anderson em 1980.

	Descarga	a descendente	Descarga ascendente		
Parâmetro	Primeira	Descarga	Primeira	Descarga	
	descarga	subseqüente	descarga	subseqüente	
Número de amostras	42	33	61	142	
Valor de pico (kA)	33	18	7	8	
Máxima derivada (kA/µs)	14	33	5	13	
Tempo de frente (μs) (3 kA até pico)	9	1,1	4	1,3	
Tempo até meia onda (µs)	56	28	35	31	

Tabela 2.4: Parâmetros de correntes de descargas negativas na Itália (adaptado de [Uman, 1987]).

Tabela 2.5: Parâmetros de descargas naturais na África do Sul (adaptado de [Fisher et al., 1993])

Parâmetro	Descargas naturais subseqüentes			
	95%	50%	5%	
Número de amostras		114		
Valor de pico (kA)	4,9	12	29	
10 - 90% Máxima derivada (kA/µs)	3,3	15	72	
10 - 90% Duração (μs)	0,1	0,6	2,8	

Experimentos com torres, consideradas baixas como as anteriores, também foram realizados por outros pesquisadores pelo mundo: Colômbia [Torres, 2000; Torres *et al.*, 1999a; Torres *et al.*, 1999b], Japão [Narita *et al.*, 2000] e Áustria [Diendorfer *et al.*, 2002; Diendorfer *et al.*, 2000].

Além dos experimentos com torres baixas, foram realizados diversos testes com torres bastante elevadas. Desde de 1978, o grupo de estudos da torre CN em Toronto,Canadá, tem registrado e analisado dados relativos às descargas atmosféricas naturais conectadas ao topo desta torre de 553m de altura [Hussein *et al.*, 1995; Janischewskyj *et al.*, 1996a; Janischewskyj *et al.*, 1996b; Janischewskyj *et al.*, 1997]. A corrente da descarga atmosférica é medida em duas posições por bobinas de Rogowski

localizadas a 509 e 474m de altura (Figura 2.12), além disso existem medições do campo elétrico vertical e do campo magnético horizontal associado a estes eventos a distâncias de 2 e de 16,8km da torre.



Figura 2.12: Corrente ao longo da torre: (a) 509m e (b) 474m (adaptado de [Hussein et al., 2002]).

Devido à complexa estrutura da torre CN é possível observar inúmeras reflexões na forma de onda da corrente da descarga, as quais dependem principalmente dos coeficientes de reflexão no topo da torre e em sua base, determinados a partir das impedâncias do canal da descarga, da própria torre e do solo.

Experimentos semelhantes foram realizados com a torre Peissenberg (168m de altura) na Alemanha de 1978 até 1999 para estudar as correntes das descargas atmosféricas e os campos eletromagnéticos associados [Heidler *et al.*, 2001].

Outro experimento de destaque envolvendo torres altas foi o da torre Ostankino (540m de altura) em Moscou, que representou a primeira experiência envolvendo três medições simultâneas da corrente em posições diferentes da torre (47m, 272m e 533m), conforme registrado na Figura 2.13.



Figura 2.13: Corrente ao longo da torre Ostankino (adaptado de [Rakov, 2001]).

Rakov sugere que a impedância equivalente de aterramento da torre é muito menor que a sua impedância característica e que a impedância equivalente do canal da descarga é muito maior do que a última, além disso, segundo Rakov, as diferenças entre as correntes no diferentes níveis se devem as descontinuidades existentes ao longo da estrutura da torre [Rakov, 2001].

No capítulo 3, serão formuladas as diferenças existentes entre as correntes de descargas atmosféricas conectadas ao solo, a torres baixas e a torres elevadas. Estas diferenças serão importantes para o estudo que se pretende realizar neste trabalho de doutorado, pois mudanças na corrente presente no canal da descarga trazem consigo mudanças nos campos eletromagnéticos gerados e, conseqüentemente, mudanças nas tensões induzidas em linhas aéreas.

2.6 Sistemas de localização de descargas atmosféricas

Os sistemas de localização de descargas atmosféricas são compostos basicamente por antenas capazes de detectar os campos eletromagnéticos provenientes de uma descarga que, em conjunto com um sistema GPS, é capaz de determinar o ponto de impacto da mesma. Desta forma, é possível estimar, por exemplo, a corrente de pico de uma dada descarga atmosférica a partir dos dados de um sistema de localização, embora estas estimativas possam apresentar erros de até 30% [De la Rosa *et al.*, 2000]. Estas estimativas dos parâmetros da corrente da descarga são, em geral, feitas com o uso de fórmulas empíricas [Rakov *et al.*, 1992; Willet *et al.*, 1989] ou teóricas [Rachidi e Thottappillil, 1993], que relacionam os campos eletromagnéticos gerados com as correntes no canal. Talvez o principal empecilho na utilização destas expressões seja a necessidade de se conhecer a velocidade de propagação da corrente de retorno no canal da descarga [Guerrieri *et al.*, 1998; Rachidi *et al.*, 2001], o que nem sempre é possível.

Embora, [Rachidi *et al.*, 2002] tenham demonstrado que é impossível inferir corretamente a corrente de pico de uma descarga única a partir do campo eletromagnético gerado por ela (por exemplo, a partir de um sistema de localização) , devido ao grande erro presente, foi sugerido no mesmo trabalho que a representação levando-se em conta valores médios e desvios padrão (representação estatística) seria absolutamente possível quando considerado um grande número de descargas.

CAPÍTULO 3

MODELAGEM MATEMÁTICA

A modelagem matemática utilizada para abordar a questão do impacto da urbanização nos níveis das tensões induzidas por descargas atmosféricas nas proximidades de linhas de transmissão de energia ou de telecomunicações, foi dividida em cinco etapas principais:

- Equacionamento da corrente no canal da descarga atmosférica em três diferentes situações de ponto de conexão do canal: com o solo, com uma torre baixa e com uma torre elevada;
- II. Equacionamento dos campos eletromagnéticos gerados pela corrente presente no canal da descarga atmosférica considerando um solo com perdas, ou seja, com condutividade (σ) finita;
- III. Equacionamento do acoplamento entre uma linha aérea de transmissão e os campos eletromagnéticos provenientes de uma descarga atmosférica, considerando o solo com perdas e os parâmetros da linha variáveis com a freqüência;
- IV. Equacionamento dos raios de atração das torres como função da corrente de pico presente no canal da descarga atmosférica;
- V. Modelagem matemática relativa ao mapeamento das tensões induzidas realizado e obtenção das distribuições das mesmas para diferentes cenários de ocupação ou de urbanização.

3.1 Modelagem do canal da descarga e da corrente de retorno

Muitos pesquisadores têm se dedicado ao estudo e à modelagem dos canais das descargas atmosféricas e da representação matemática, em função do tempo e da posição, das correntes presentes neles [Gomes e Cooray, 2000; Nucci, 1995; Nucci *et al.*, 1990; Rakov, 2002; Rakov e Uman, 1998; Thottappillil *et al.*, 1997; Thottappillil e Uman, 1993].

Os modelos existentes para representar o canal de uma descarga atmosférica podem ser divididos em quatro categorias [Rakov, 2002]:

- 1. Modelos de engenharia;
- 2. Modelos de circuitos distribuídos;
- 3. Modelos eletromagnéticos;
- 4. Modelos baseados na dinâmica dos gases.

O modelo utilizado neste trabalho foi o primeiro (modelo de engenharia), que, embora não aborde adequadamente a física envolvida na corrente de retorno da descarga, enfatiza a obtenção de campos eletromagnéticos calculados idênticos àqueles obtidos experimentalmente [Rakov e Uman, 1998; Nucci *et al.*, 1990]. Este modelo é baseado em parâmetros medidos experimentalmente, tais como: corrente na base do canal, velocidade de propagação da frente de onda e extensão do canal. Desta forma, devido a capacidade de descrever com grande fidelidade os campos eletromagnéticos gerados e maior simplicidade de implementação computacional, este modelo foi escolhido.

O segundo modelo, modelo de circuitos distribuídos, considera o canal da descarga como sendo uma linha de transmissão e representa a descarga atmosférica como sendo um transitório em uma linha caracterizada por sua resistência, capacitância e indutância por unidade de comprimento. Este modelo é

utilizado com freqüência para a obtenção da corrente no canal em função do tempo e da altura e, conseqüentemente, para a determinação dos campos eletromagnéticos gerados pela descarga [Price e Pierce, 1972; Little, 1978; Caixeta e Pissolato, 1997; Zago *et al.*, 2004; Zago *et al.*, 2005].

O terceiro modelo, modelo eletromagnético, é freqüentemente baseado na teoria de antenas e aproxima o canal da descarga por um condutor fino com perdas. Estes modelos envolvem a solução das equações de Maxwell para encontrar a distribuição de corrente ao longo do canal [Moini *et al.*, 2000; Baba e Ishii, 2001; Rakov *et al.*, 2005].

O quarto modelo, modelo baseado na dinâmica dos gases, pode ser considerado aquele mais correto do ponto de vista da física das descargas e, também, o mais complexo, pois envolve parâmetros como temperatura, densidade de massa, pressão, etc [Plooster, 1970].

3.1.1 Modelos de engenharia

A seguir serão discutidos brevemente os principais tipos de modelos de engenharia existentes para os canais das descargas atmosféricas, uma vez que, alguns destes foram utilizados na implementação computacional desta tese de doutorado.

Modelo Bruce-Golde (BG) [Bruce e Golde, 1941]: Este modelo é descrito matematicamente por (3.1) e, segundo [Nucci *et al.*, 1990], existe uma descontinuidade na frente de onda da corrente representada por este modelo caracterizada por uma remoção instantânea de carga do canal a cada altura z'=vt pela frente de onda. Desta forma, cada ponto do canal assume instantaneamente o valor da corrente de retorno na posição da frente de onda e isto não é possível com uma velocidade finita.

$$i(z',t) = i_0(t) \quad \forall \ z' \le vt$$

$$i(z',t) = 0 \quad \forall \ z' > vt$$
(3.1)

onde v é a velocidade de propagação da frente de onda e $i_0(t)$ é a corrente na base do canal.

Modelo de linha de transmissão (TL) [Uman e McLain, 1969]: Este modelo é representado matematicamente por (3.2) e modela o canal da descarga como sendo uma linha de transmissão sem perdas, assim sendo, a corrente de retorno da descarga propaga-se ao longo do canal sem distorções e atenuações a uma velocidade de propagação constante (v).

$$i(z',t) = i_0(t-z'/v) \quad \forall \ z' \le vt$$

$$i(z',t) = 0 \qquad \forall \ z' > vt$$
(3.2)

onde v é a velocidade de propagação da frente de onda e $i_0(t)$ é a corrente na base do canal.

Segundo [Nucci *et al.*, 1990], este modelo não representa adequadamente os campos eletromagnéticos gerados a longas distâncias por não modelar a remoção de cargas do canal.

Modelos de linha de transmissão modificados (MTLE e MTLL): Estes modelos foram idealizados buscando-se resolver o problema da inexistência de remoção de cargas do canal representado pelo modelo TL. O modelo MTLE [Nucci *et al.*, 1988; Rachidi e Nucci, 1990], também chamado de modelo de linha de transmissão com atenuação exponencial com a altura, supõe uma atenuação exponencial na intensidade da corrente enquanto esta se propaga em direção ao topo do canal e é representado matematicamente por (3.3).

$$i(z',t) = i_0(t-z'/v)e^{-z'/\lambda} \quad \forall \ z' \le vt$$

$$i(z',t) = 0 \qquad \forall \ z' > vt$$
(3.3)

onde o fator λ é a constante de atenuação, que permite que a amplitude da corrente seja reduzida com a altura, v é a velocidade de propagação da frente de onda e $i_0(t)$ é a corrente na base do canal.

A constante de atenuação λ foi determinada experimentalmente por [Nucci e Rachidi, 1989] e seu valor foi estimado em aproximadamente 2km. Já o modelo MTLL [Rakov e Dulzon, 1987], também chamado de modelo de linha de transmissão com atenuação linear, supõe uma atenuação linear para a corrente de retorno da descarga enquanto esta se propaga em direção ao topo do canal e é representada matematicamente por (3.4).

$$i(z',t) = i_0 (t - z'/v) (1 - z'/H_{tot}) \quad \forall \ z' \le vt$$

$$i(z',t) = 0 \qquad \forall \ z' > vt$$
(3.4)

onde o H_{tot} é a altura ou comprimento total do canal da descarga, v é a velocidade de propagação da frente de onda e $i_0(t)$ é a corrente na base do canal.

Modelo da fonte de corrente viajante (TCS) [Heidler, 1985a]: Este modelo considera uma fonte de corrente viajando a uma velocidade v em direção ao topo do canal. A corrente injetada por esta fonte a uma altura z' propaga-se com velocidade igual a da luz (c) em direção à base do canal e é representada matematicamente por (3.5).

$$i(z',t) = i_0(t-z'/c) \quad \forall \ z' \le vt$$

$$i(z',t) = 0 \qquad \forall \ z' > vt$$
(3.5)

onde c é a velocidade da luz e $i_0(t)$ é a corrente na base do canal.

Os modelos de engenharia descritos acima foram representados de uma forma generalizada por [Rakov, 1997; Rakov, 2002], conforme (3.6), e a Tabela 3.1 resume os modelos vistos.

$$i(z',t) = u(t - z'/v^{*})P(z')i_{0}(t - z'/v^{*})$$
(3.6)

onde u é a função de Heaviside igual a 1 para $t \ge z'/v$ e igual a 0 caso contrário, P(z') é o fator de atenuação em função da altura , v^{*} é a velocidade de propagação da onda de corrente e i₀ é a corrente na base do canal.

Modelo	P(z')	v*
BG	1	8
TL	1	V
TCS	1	-C
MTLL	1- <i>z'</i> / <i>H</i> tot	V
MTLE	$\exp(-z'/\lambda)$	V

Tabela 3.1: Modelos de engenharia (adaptado de [Rakov, 1997])

A performance de alguns dos modelos de engenharia vistos acima, na capacidade de reprodução de importantes características peculiares ([Lin *et al.*, 1979]) das formas de onda dos campos eletromagnéticos gerados por descargas atmosféricas, foi testada por [Baba *et al.*, 2004] através de simulações computacionais e está resumida na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Performance dos modelos de engenharia (adaptado de [Baba et al., 2004]).

Modelo	E ("achatamento") d = 50m	H ("corcova") d = 5km	E ("rampa") d = 50m	E e H (Pico inicial) d = 5km	E e H (Passagem pelo zero) d = 100km
TL	Não reproduz	Reproduz	Não reproduz	Reproduz	Não reproduz
MTLL	Reproduz	Não reproduz	Reproduz	Reproduz	Reproduz
MTLE	Não reproduz	Não reproduz	Reproduz	Reproduz	Reproduz
TCS	Reproduz	Reproduz	Reproduz	Reproduz	Não reproduz

Na Tabela 3.2, d é a distância entre o ponto de impacto da descarga e o ponto de observação do campo, E é o campo elétrico vertical e H é o campo magnético horizontal. As características peculiares identificadas por [Lin *et al.*, 1979], foram:

- Pico inicial em ambos os campos, elétricos e magnéticos, medidos em torno de 5km de distância do canal;
- Uma rampa lenta seguindo o pico inicial para campos elétricos medidos a algumas dezenas de quilômetros;
- Uma "corcova" seguindo o pico inicial do campo magnético medido a alguns quilômetros de distância;
- Passagem pelo zero do pico inicial para ambos os campos, elétricos e magnéticos, para distâncias em torno de 5 km;
- Achatamento" do campo elétrico vertical em torno de 15µs para distâncias de algumas centenas de metros.

Com base no trabalho de [Baba *et al.*, 2004] optou-se por utilizar neste trabalho, na maior parte das simulações, o modelo MTLL, pois este é capaz de reproduzir o canal de uma descarga atmosférica de tal forma que as principais características dos campos eletromagnéticos gerados por estes eventos sejam alcançadas. Tendo em vista o modelo de acoplamento eletromagnético escolhido para calcular as tensões induzidas na linha vítima, onde o campo magnético horizontal não é levado em consideração na modelagem da linha de transmissão perturbada (modelo de Agrawal), o fato deste modelo de canal não conseguir reproduzir a "corcova" após o pico inicial do campo magnético para distâncias longas não foi considerada uma restrição. O modelo de Agrawal será discutido mais adiante, quando tratarmos da modelagem da linha vítima.

3.1.2 Corrente i₀(t) na base do canal

Independentemente do modelo escolhido para representar o canal da descarga, faz-se necessária a adoção de uma corrente $i_0(t)$ na base do canal adequadamente dimensionada para que o fenômeno seja descrito mais próximo do real. Existem diversas expressões para a corrente na base do canal, mas a mais eficiente e fácil de implementar é a chamada função de Heidler ([Heidler, 1985b]).

A função de Heidler é descrita por (3.7) e através da variação de poucos parâmetros é possível representar correntes na base do canal com diferentes amplitudes, tempos de frente e tempos de cauda. Usualmente são adotadas somas de funções de Heidler para obtenção de formas de onda que representem correntes medidas experimentalmente na base do canal.

$$i_0(t) = \frac{I_0}{\eta} \frac{(t/\tau_1)^n}{1 + (t/\tau_1)^n} e^{(-t/\tau_2)}$$
(3.7)

onde:

- \succ I₀ é a corrente de pico em [kA];
- > τ_1 é a constante de tempo de frente de onda (µs);
- > $\tau_2 \acute{e}$ a constante de tempo de cauda (µs);
- n é um expoente com valores entre 2 e 10;
- > η é representado pela equação (3.8).

$$\eta = \exp\left(-\left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right)\left(n\frac{\tau_2}{\tau_1}\right)^{\frac{1}{n}}\right)$$
(3.8)

Para reproduzir a forma de onda da corrente na base do canal típica da primeira descarga e, também, das descargas subseqüentes, de acordo [Rachidi *et al.*, 2001], que analisou os dados experimentais de Berger, é possível somar duas funções de Heidler com os parâmetros definidos na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Parâmetros das duas funções de Heidler para obtenção da corrente na base do canal.

	Io1(kA)	$\tau_1 1(\mu s)$	$\tau_2 1(\mu s)$	n1	Io2(kA)	$\tau_1 2(\mu s)$	$\tau_2 2(\mu s)$	n2
Primeira descarga	28	1,8	95	2	-	-	-	-
Descargas subseqüentes	10,7	0,25	2,5	2	6,5	2	230	2

Ao longo deste trabalho será utilizada nas simulações a corrente na base do canal definida pela Tabela 3.3, a menos que se afirme o contrário.

3.1.3 Descargas atmosféricas conectadas a objetos elevados

O aumento da urbanização no entorno de linhas aéreas de energia e de telecomunicações está intimamente relacionado com um aumento da densidade de edificações elevadas na área onde se encontram ou por onde passam estas linhas. Desta forma, a correta compreensão do comportamento dos campos eletromagnéticos gerados por descargas atmosféricas conectadas a objetos elevados aterrados, como torres de telefonia celular ou edifícios com seus SPDAs, pode levar a um correto entendimento sobre a influência destes objetos e, conseqüentemente, da urbanização nos níveis de tensões induzidas por descargas atmosféricas nas proximidades de linhas aéreas. Por sua vez, a obtenção dos campos eletromagnéticos gerados por este tipo de situação depende predominantemente das correntes resultantes nestes objetos e no próprio canal da descarga.

Muitos pesquisadores da área de descargas atmosféricas têm dedicado esforços na modelagem matemática de canais de descargas atmosféricas conectados a objetos elevados, bem como da corrente

resultante, neste sentido merece destaque os trabalhos realizados por [Baba e Ishii, 2001; Beierl, 1992; Fuchs, 1998; Guerrieri *et al.*, 1998; Janischewskyj *et al.*, 1996b; Montandon e Beyeler, 1994; Rakov, 2001; Shostak *et al.*, 1999b]. Além disso, muitos trabalhos relevantes tentando estender os modelos de canais discutidos anteriormente, concebidos inicialmente para tratarem somente descargas conectadas diretamente ao solo, têm sido ou já foram produzidos [Rakov e Baba, 2006; Bermudez *et al.*, 2005; Diendorfer e Uman, 1990; Goshima *et al.*, 2000; Guerrieri *et al.*, 1996; Guerrieri *et al.*, 2000; Guerrieri *et al.*, 1994; Guerrieri *et al.*, 1998; Janischewskyj *et al.*, 1998; Janischewskyj *et al.*, 1999; Kordi *et al.*, 2000; Motoyama *et al.*, 1996; Rachidi *et al.*, 1992; Rachidi *et al.*, 1998; Rachidi *et al.*, 2001; Rusan *et al.*, 1996; Shostak *et al.*, 2000; Shostak *et al.*, 1999a; Shostak *et al.*, 1999b; Zundl, 1994].

Este trabalho baseou-se nas pesquisas mais recentes e aceitas sobre o assunto ([Rakov e Baba, 2006; Bermudez *et al.*, 2005]) para descrever o comportamento da corrente de retorno no canal da descarga atmosférica quando este se conecta a um objeto elevado como, por exemplo, uma torre de telecomunicações. Quando se estuda este tipo de conexão do canal, costuma-se dividir os objetos elevados em duas categorias distintas, cujas expressões matemáticas que governam o comportamento da corrente no canal e no objeto elevado aterrado são diferentes em cada categoria, objetos eletricamente "pequenos" e objetos eletricamente "grandes".

Os objetos são considerados eletricamente "grandes" quando o tempo (t_f) de zero até o pico da onda de corrente satisfaz (3.9) [Bermudez *et al.*, 2005].

$$t_f < \frac{2h}{c} \tag{3.9}$$

onde h é a altura do objeto elevado e c é a velocidade da luz.

$$t_f \gg \frac{h}{c} \tag{3.10}$$

onde h é a altura do objeto elevado e c é a velocidade da luz.

A Figura 3.1 representa simbolicamente um objeto elevado sendo conectado ao canal de uma descarga atmosférica, as impedâncias características do canal (Z_{ch}), do objeto elevado ou torre (Z_t), do solo (Z_g), os coeficientes de reflexão de corrente na base da torre (ρ_g) e no topo (ρ_t), a altura da torre (h) e o comprimento do canal (H_{tot}). Os coeficientes de reflexão ρg e ρt são definidos por (3.11) e (3.12), respectivamente.



Figura 3.1: Torre aterrada conectada ao canal da descarga (adaptado de [Bermudez et al., 2005]).

$$\rho_g = \frac{Z_t - Z_g}{Z_t + Z_g} \tag{3.11}$$

$$\rho_t = \frac{Z_t - Z_{ch}}{Z_t + Z_{ch}} \tag{3.12}$$

As expressões apresentadas por [Bermudez *et al.*, 2005] baseiam-se no modelo TL, discutido anteriormente, para representar a conexão do canal da descarga atmosférica a uma torre aterrada. Para utilização no programa computacional desenvolvido nesta tese de doutorado, foram feitas modificações nestas expressões para que pudessem ser aproveitados todos os modelos de engenharia discutidos anteriormente, embora conforme explicado foi dada preferência ao uso do modelo MTLL.

Nas expressões a seguir, z é a altura observada, u(t) é o degrau unitário de Heaviside, c é a velocidade da luz (propagação na torre), v é a velocidade de propagação da frente de onda da corrente no canal, $i_0(t)$ é a chamada corrente sem perturbação (igual a corrente que seria observada caso não existissem reflexões) e P(z') é definido conforme o modelo de canal adotado, de acordo com a Tabela 3.1. Ao longo deste trabalho, a corrente $i_0(t)$ será definida pela soma de duas funções de Heidler (3.7) com os parâmetros expostos na Tabela 3.3, a menos que se afirme o contrário.

As expressões matemáticas que descrevem o comportamento das correntes no canal da descarga atmosférica e no objeto elevado aterrado, para o caso de objeto eletricamente "grande", são (3.13) e (3.14), respectivamente.

$$i(z,t) = (1 - \rho_t) P(z - h) i_0 \left(h, t - \frac{z - h}{v} \right) u \left(t - \frac{z - h}{v} \right) +$$

$$(1 - \rho_t) (1 + \rho_t) \left[\sum_{n=0}^{\infty} \rho_g^{n+1} \rho_t^n i_0 \left(h, t - \frac{z - h}{v} - \frac{2(n+1)h}{c} \right) \right]$$
para $h < z < H_{tot}$ (3.13)

$$i(z,t) = (1 - \rho_t) \sum_{n=0}^{\infty} \left[\rho_g^{\ n} \rho_t^{\ n} \ i_0 \left(h, t - \frac{h-z}{c} - \frac{2nh}{c} \right) u \left(t - \frac{h-z}{c} - \frac{2nh}{c} \right) + \rho_g^{\ n+1} \rho_t^{\ n} \ i_0 \left(h, t - \frac{h+z}{c} - \frac{2nh}{c} \right) u \left(t - \frac{h+z}{c} - \frac{2nh}{c} \right) \right] \text{ para } 0 \le z \le h$$
(3.14)

$$i(z,t) = P(z-h) \left[i_0 \left(h, t - \frac{z-h}{v} \right) + \rho_{ch-g} i_0 \left(h, t - \frac{z-h}{c} \right) \right] u \left(h, t - \frac{z-h}{v} \right) \quad \text{para } h < z < H_{tot}$$
(3.15)

$$i(z,t) = (1 + \rho_{ch-g})i_0(h,t)u(t)$$
 para $0 \le z \le h$ (3.16)

onde:
$$\rho_{ch-g} = \frac{Z_{ch} - Z_g}{Z_{ch} + Z_g}$$
 (3.17)

A corrente $i_0(t)$ nas expressões (3.13) a (3.16) pode ser definida, também, como a corrente da descarga atmosférica na condição de casamento perfeito das impedâncias: $Z_{ch} = Z_t = Z_g$. Os valores sugeridos por [Rakov e Baba, 2006] para as impedâncias características e para os coeficientes de reflexão vistos, estão resumidos na Tabela 3.4.

ρ _t	ρ _g	Impedâncias	ρ _{ch-g}
-0,5	1	$Z_{g} = 0, Z_{t} = Z_{ch}/3$	1
0	1	$Z_g = 0, Z_t = Z_{ch}$	1
-0,5	0	$Z_g = Z_t, Z_t = Z_{ch}/3$	0,5
0	0	$Z_{ch} = Z_t = Z_g$	0

Tabela 3.4: Coeficientes de reflexão e impedâncias típicas (adaptado de [Rakov e Baba, 2006])

A correta modelagem matemática da corrente presente no canal de uma descarga atmosférica conectada a um objeto elevado, foi essencial para a realização do estudo proposto neste trabalho, pois é a partir desta corrente de retorno que os campos eletromagnéticos gerados são obtidos e, conseqüentemente, a tensão induzida nas linhas aéreas perturbadas. Assim sendo, a modelagem da corrente constituiu o primeiro passo em direção ao objetivo final de avaliar os possíveis efeitos da urbanização nos níveis das tensões induzidas nas linhas vítimas.

É importante ressaltar que as descargas atmosféricas conectadas diretamente ao solo podem ser descritas pela expressão (3.15) considerando-se $h \rightarrow 0$. Desta forma, a partir das expressões (3.13) a (3.16) é possível realizar o mapeamento de uma dada região de interesse em torno da linha de transmissão vítima levando-se em conta conexões de descargas com pontos dentro do raio de atração de objetos elevados (torres) e com pontos fora destes raios de atração no nível do solo, conforme será explicado com maiores detalhes mais adiante.

3.2 Expressões para o cálculo dos campos eletromagnéticos

O próximo passo na modelagem matemática do problema analisado, é a determinação dos campos eletromagnéticos gerados por descargas atmosféricas, cujas correntes de retorno sejam descritas pelas expressões (3.13) a (3.16). Neste sentido, serão determinados os campos gerados por descargas conectadas tanto ao solo quanto a objetos elevados e, desta forma, serão estabelecidas relações entre parâmetros intrínsecos das torres (altura, posicionamento, impedância Z_t , raio de atração, etc) e do solo (condutividade, posição de impacto, Z_g , etc) com os campos eletromagnéticos gerados, que perturbarão a linha vítima estudada.

Embora considerar na modelagem dos campos eletromagnéticos solos com condutividades finitas seja relativamente mais complexo que solos com condutividade infinita, optou-se pela primeira opção como forma de criar um programa computacional de abordagem ampla e que fosse capaz de analisar casos maiores e mais genéricos, onde as distâncias entre as descargas e a linha vítima fossem maiores e o efeito da condutividade finita alteraria significativamente os campos gerados. Além disso, conforme

será visto mais adiante, a condutividade finita do solo também foi considerada para representar o acoplamento eletromagnético entre os campos gerados e a linha vítima, assim como, para determinar os parâmetros desta.

A modelagem matemática dos campos eletromagnéticos seguiu a abordagem clássica do canal da descarga atmosférica como sendo composto por um conjunto de dipolos hertzianos e, desta forma, buscaram-se expressões adequadas que representassem dipolos verticais localizados no ar e sobre um meio com condutividade finita. Neste contexto, as abordagens de [King, 1990; King e Sandler, 1994] foram as que mais se encaixaram às necessidades do problema, além de carregarem consigo um grande potencial de extensão para tratamento futuro de linhas de transmissão de energia ou de telecomunicações subterrâneas.

As ondas eletromagnéticas que se propagam ao longo da superfície terrestre não apresentam comportamento idêntico àquelas que se propagam no espaço livre. As diferenças entre dois meios como, por exemplo, o ar e o solo (água doce, água salgada, rochas, areia, gelo, etc) alteram significativamente as características de propagação das ondas provenientes de um dipolo vertical localizado próximo à superfície. Isto foi demonstrado analiticamente por [Sommerfeld, 1909; Sommerfeld, 1926; Sommerfeld, 1935] em uma série de artigos que servem de base teórica para as pesquisas na área até os dias de hoje.

A solução obtida por Sommerfeld foi para o potencial de Hertz de uma fonte do tipo dipolo elétrico oscilante localizado sobre a superfície ou fronteira entre dois meios diferentes. Na ocasião, os efeitos da curvatura da Terra e as reflexões na ionosfera não foram incluídos.

Os empecilhos criados pela solução em termos do potencial de Hertz associado à resolução de transformadas com integrais complexas levaram inúmeros cientistas e pesquisadores a tentarem superar

estes obstáculos. Neste contexto, destacaram-se os trabalhos de [Norton, 1936; Norton, 1941], representando o termo de superfície de onda, e os de [Baños, 1966; Wait e Campbell, 1953], desenvolvendo expressões aproximadas para as componentes dos campos eletromagnéticos associados. Algumas limitações destas expressões foram removidas por [King, 1982], que desenvolveu um conjunto de fórmulas válidas em todo o espaço e mesmo para dipolos localizados na fronteira entre os dois meios ou a uma da profundidade no interior do solo.

As expressões deduzidas a seguir foram adaptações feitas nas expressões de dipolos elétricos verticais de [King e Sandler, 1994], objetivando tratar o canal de uma descarga atmosférica como sendo composto por um conjunto de dipolos hertzianos, de tal forma que a corrente presente em cada um destes dipolos fosse determinada pelas expressões (3.13) a (3.16) dependendo da altura e do instante de tempo considerados. A dedução parte da Figura 3.2, que representa um dipolo elétrico vertical localizado a uma altura *d* do solo (com condutividade finita) e a sua imagem.



Figura 3.2: Esquema espacial do dipolo elétrico vertical e dos campos observados no ponto (ρ ,z').

A região 1 é caracterizada por sua permissividade dielétrica (ε_1), condutividade (σ_1) e número de onda k_1 , enquanto a região 2 por $\varepsilon_1 = \varepsilon_0 = 8,854.10^{-12}$ [F/m], $\sigma_2 = 0$ [S/m] e k_2 . As variáveis presentes na Figura 3.2 são definidas a seguir:

$$k_1 = \beta_1 + i\alpha_1 = \omega \left[\mu_0 \left(\varepsilon_1 + i \frac{\sigma_1}{\omega} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$
(3.18)

onde $\mu_0 = 4\pi . 10^{-7}$ [H/m] é a permeabilidade magnética do ar e ω é a freqüência angular;

$$k_2 = \omega \left(\mu_0 \varepsilon_0\right)^{1/2} = \frac{\omega}{c} \tag{3.19}$$

onde c é a velocidade da luz no vácuo;

$$r_1 = \left[\rho^2 + (z' - d)^2\right]^{\frac{1}{2}}$$
(3.20)

$$r_2 = \left[\rho^2 + (z'+d)^2\right]^{\frac{1}{2}}$$
(3.21)

Para serem válidas, as expressões dos campos eletromagnéticos, que serão mostradas a seguir, devem respeitar a seguinte condição:

$$|k_1^2| \gg |k_2^2|$$
 ou $|k_1| \ge 3 |k_2|$ (3.22)

Definindo as variáveis

$$\gamma_{j} = \left(k_{j}^{2} - \lambda^{2}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad j = 1, 2$$
(3.23)

onde λ é a variável de integração no espaço transformado usada na representação do dipolo por integrais de Sommerfeld,

$$N \equiv k_1^2 \gamma_2 + k_2^2 \gamma_1 \tag{3.24}$$

$$N_0 = k_1^2 \gamma_2 \tag{3.25}$$

as expressões dos campos eletromagnéticos de interesse para um único dipolo elétrico vertical são:

$$H_{2\phi}(\rho, z', \omega) = \frac{i I_L}{2\pi} \int_0^{\infty} \left[\frac{e^{i \gamma_2 |z'-d|}}{2\gamma_2} + \frac{e^{i \gamma_2 (z'+d)}}{2\gamma_2} + k_1^2 e^{i \gamma_2 (z'+d)} \left(\frac{1}{N} - \frac{1}{N_0} \right) \right] J_1(\lambda \rho) \ \lambda^2 \ d\lambda$$
(3.26)

onde IL é o momento elétrico do dipolo e J1 é a função de Bessel de ordem 1,

$$E_{2\rho}(\rho, z', \omega) = \frac{i \,\omega \,\mu_0 \,I_L}{2\pi \,k_2^2} \int_0^{\infty} \left[\pm \frac{e^{i \,\gamma_2 |z'-d|}}{2} + \frac{e^{i \,\gamma_2 (z'+d)}}{2} + k_1^2 e^{i \,\gamma_2 (z'+d)} \,\gamma_2 \left(\frac{1}{N} - \frac{1}{N_0}\right) \right] J_1(\lambda \rho) \,\lambda^2 \,d\lambda \tag{3.27}$$

onde I_L é o momento elétrico do dipolo, o sinal + é usado para z' > d e o sinal – para $0 \le z' \le d$,

$$E_{2z'}(\rho, z', \omega) = -\frac{i\omega \mu_0 I_L}{2\pi k_2^2} \int_0^{\infty} \left[\frac{e^{i\gamma_2|z'-d|}}{2\gamma_2} + \frac{e^{i\gamma_2(z'+d)}}{2\gamma_2} + k_1^2 e^{i\gamma_2(z'+d)} \left(\frac{1}{N} - \frac{1}{N_0}\right) \right] J_0(\lambda \rho) \,\lambda^3 \,d\lambda \tag{3.28}$$

onde I_L é o momento elétrico do dipolo e J_0 é a função de Bessel de ordem 0.

Nas expressões (3.26) a (3.28), os dois primeiros termos são o campo direto e o campo imagem, respectivamente, e o terceiro termo representa a onda de superfície.

Reescrevendo (3.26) a (3.28) em termos das componentes de campo direto, de campo imagem e de onda de superfície, temos:

$$H_{2\phi}(\rho, z', \omega) = H_{2\phi}^{\ \ d}(\rho, z', \omega) + H_{2\phi}^{\ \ i}(\rho, z', \omega) + H_{2\phi}^{\ \ s}(\rho, z', \omega)$$
(3.29)

$$E_{2\rho}(\rho, z', \omega) = E_{2\rho}^{\ d}(\rho, z', \omega) + E_{2\rho}^{\ i}(\rho, z', \omega) + E_{2\rho}^{\ s}(\rho, z', \omega)$$
(3.30)

$$E_{2z'}(\rho, z', \omega) = E_{2z'}^{\ d}(\rho, z', \omega) + E_{2z'}^{\ i}(\rho, z', \omega) + E_{2z'}^{\ s}(\rho, z', \omega)$$
(3.31)

As componentes para o campo direto são:

$$H_{2\phi}^{\ d}(\rho, z', \omega) = \frac{i I_L}{4\pi} \int_0^{\infty} \left[\frac{e^{i \gamma_2 |z' - d|}}{\gamma_2} J_1(\lambda \rho) \,\lambda^2 \, d\lambda \right] = -\frac{I_L}{4\pi} e^{i k_2 r_1} \left(\frac{i k_2}{r_1} - \frac{1}{r_1^2} \right) \left(\frac{\rho}{r_1} \right)$$
(3.32)

$$E_{2\rho}^{d}(\rho, z', \omega) = \frac{i\omega\mu_{0}I_{L}}{4\pi k_{2}^{2}} \int_{0}^{\infty} \left[\pm e^{i\gamma_{2}|z'-d|} J_{1}(\lambda\rho) \lambda^{2} d\lambda \right] = -\frac{\omega\mu_{0}I_{L}}{4\pi k_{2}^{2}} e^{ik_{2}r_{1}} \left(\frac{ik_{2}^{2}}{r_{1}} - \frac{3k_{2}}{r_{1}^{2}} - \frac{3i}{r_{1}^{3}} \right) \left(\frac{\rho}{r_{1}} \right) \left(\frac{z'-d}{r_{1}} \right)$$
(3.33)

onde o sinal + é usado para z' > d e o sinal – para $0 \le z' \le d$,

$$E_{2z'}{}^{d}(\rho, z', \omega) = \frac{\omega \mu_{0} I_{L}}{4\pi k_{2}^{2}} \int_{0}^{\infty} \left[e^{i\gamma_{2}|z'-d|} J_{0}(\lambda\rho) \lambda^{3} d\lambda \right] = \frac{\omega \mu_{0} I_{L}}{4\pi k_{2}^{2}} e^{ik_{2}r_{1}} \left[\frac{ik_{2}^{2}}{r_{1}} - \frac{k_{2}}{r_{1}^{2}} - \frac{i}{r_{1}^{3}} - \left(\frac{z'-d}{r_{1}}\right)^{2} \left(\frac{ik_{2}^{2}}{r_{1}} - \frac{3k_{2}}{r_{1}^{2}} - \frac{3i}{r_{1}^{3}}\right) \right]$$
(3.34)

As componentes para o campo imagem são:

$$H_{2\phi}{}^{i}(\rho, z', \omega) = \frac{iI_{L}}{4\pi} \int_{0}^{\infty} \left[\frac{e^{i\gamma_{2}(z'+d)}}{\gamma_{2}} J_{1}(\lambda\rho) \lambda^{2} d\lambda \right] = -\frac{I_{L}}{4\pi} e^{ik_{2}r_{2}} \left(\frac{ik_{2}}{r_{2}} - \frac{1}{r_{2}^{2}} \right) \left(\frac{\rho}{r_{2}} \right)$$
(3.35)

$$E_{2\rho}{}^{i}(\rho, z', \omega) = \frac{i\omega\mu_{0}I_{L}}{4\pi k_{2}^{2}} \int_{0}^{\infty} \left[e^{i\gamma_{2}(z'+d)} J_{1}(\lambda\rho) \lambda^{2} d\lambda \right] = -\frac{\omega\mu_{0}I_{L}}{4\pi k_{2}^{2}} e^{ik_{2}r_{2}} \left(\frac{ik_{2}^{2}}{r_{2}} - \frac{3k_{2}}{r_{2}^{2}} - \frac{3i}{r_{2}^{3}} \right) \left(\frac{\rho}{r_{2}} \right) \left(\frac{z'+d}{r_{2}} \right)$$
(3.36)

$$E_{2z'}{}^{i}(\rho, z', \omega) = -\frac{\omega \mu_{0} I_{L}}{4\pi k_{2}^{2}} \int_{0}^{\infty} \left[e^{i\gamma_{2}(z'+d)} J_{0}(\lambda\rho) \lambda^{3} d\lambda \right] = \frac{\omega \mu_{0} I_{L}}{4\pi k_{2}^{2}} e^{ik_{2}r_{2}} \left[\frac{ik_{2}^{2}}{r_{2}} - \frac{k_{2}}{r_{2}^{2}} - \frac{i}{r_{2}^{3}} - \left(\frac{z'+d}{r_{2}}\right)^{2} \left(\frac{ik_{2}^{2}}{r_{2}} - \frac{3k_{2}}{r_{2}^{2}} - \frac{3i}{r_{2}^{3}}\right) \right]$$
(3.37)

As componentes para a onda de superfície são:

$$H_{2\phi}{}^{s}(\rho, z', \omega) = \frac{i I_{L} k_{1}^{2}}{2\pi} G_{2\phi}(\rho, z' + d, \omega)$$
(3.38)

$$E_{2\rho}^{s}(\rho, z', \omega) = \frac{i\omega\mu_{0}I_{L}k_{1}^{2}}{2\pi k_{2}^{2}}G_{2\rho}(\rho, z'+d, \omega)$$
(3.39)

$$E_{2z'}{}^{s}(\rho, z', \omega) = -\frac{\omega \mu_0 I_L k_1^2}{2\pi k_2^2} G_{2z'}(\rho, z' + d, \omega)$$
(3.40)

onde

$$G_{2\phi}(\rho, z'+d, \omega) = \int_{0}^{\infty} \left(\frac{1}{N} - \frac{1}{N_0}\right) e^{i\gamma_2(z'+d)} J_1(\lambda\rho) \lambda^2 d\lambda$$
(3.41)

$$G_{2\rho}(\rho, z'+d, \omega) = \int_{0}^{\infty} \gamma_2 \left(\frac{1}{N} - \frac{1}{N_0}\right) e^{i\gamma_2(z'+d)} J_1(\lambda\rho) \lambda^2 d\lambda$$
(3.42)

$$G_{2z'}(\rho, z'+d, \omega) = \int_{0}^{\infty} \left(\frac{1}{N} - \frac{1}{N_0}\right) e^{i\gamma_2(z'+d)} J_0(\lambda\rho) \lambda^3 d\lambda$$
(3.43)

Resolvendo as integrais em (3.41) a (3.43) para a condição (3.22), temos para os termos de onda de superfície:

$$H_{2\phi}{}^{s}(\rho, z', \omega) = \frac{i I_{L} k_{2}{}^{3}}{2\pi k_{1}} e^{i k_{2} r_{2}} \left(\frac{\pi}{k_{2} r_{2}}\right)^{\frac{1}{2}} e^{-i P} F(P)$$
(3.44)

$$E_{2\rho}{}^{s}(\rho, z', \omega) = \frac{\omega \mu_{0} I_{L}}{2\pi k_{1}} e^{ik_{2}r_{2}} \left[\left(\frac{\rho}{r_{2}} \right) \left(\frac{ik_{2}}{r_{2}} - \frac{1}{r_{2}^{2}} \right) - \frac{k_{2}^{3}}{k_{1}} \left(\frac{\pi}{k_{2}r_{2}} \right)^{1/2} e^{-iP} F(P) \right]$$
(3.45)

$$E_{2z'}{}^{s}(\rho, z', \omega) = -\frac{\omega \mu_0 I_L k_2^{2}}{2\pi k_1} e^{ik_2 r_2} \left(\frac{\pi}{k_2 r_2}\right)^{1/2} \left(\frac{\rho}{r_2}\right) e^{-iP} F(P)$$
(3.46)

onde

$$P = \frac{k_2^3 r_2}{2k_1^2} \left(\frac{k_2 r_2 + k_1 (z'+d)}{k_2 \rho} \right)^2$$
(3.47)

$$F(P) = \int_{P}^{\infty} \frac{e^{it}}{(2\pi t)^{\frac{1}{2}}} dt = \frac{1}{2} (1+i) - C_2(P) - iS_2(P)$$
(3.48)

O termo C_2 + iS_2 em (3.48) é a chamada integral de Fresnel de argumento complexo [Abramowitz, 1970].

É interessante deixar registrado que quando o dipolo está localizado dentro da região 1 a onda de superfície é chamada de onda lateral e quando ele está localizado na região 2 (Figura 3.2) a onda de superfície é chamada de onda de superfície de Norton.

As expressões completas para os campos eletromagnéticos gerados por um único dipolo elétrico vertical sujeito a (3.22) são descritas por:

$$H_{2\phi}(\rho, z', \omega) = -\frac{I_L}{2\pi} \begin{bmatrix} \frac{e^{ik_2 r_1}}{2} \left(\frac{\rho}{r_1}\right) \left(\frac{ik_2}{r_1} - \frac{1}{r_1^2}\right) \frac{e^{ik_2 r_2}}{2} \left(\frac{\rho}{r_2}\right) \left(\frac{ik_2}{r_2} - \frac{1}{r_2^2}\right) \\ -e^{ik_2 r_2} \frac{k_2^3}{k_1} \left(\frac{\pi}{k_2 r_2}\right)^{\frac{1}{2}} e^{-iP} F(P) \end{bmatrix}$$
(3.49)

$$E_{2\rho}(\rho, z', \omega) = -\frac{i\omega\mu_0 I_L}{2\pi k_2} \begin{cases} \frac{e^{ik_2r_1}}{2} \left(\frac{\rho}{r_1}\right) \left(\frac{z'-d}{r_1}\right) \left(\frac{ik_2^2}{r_1} - \frac{3}{r_1^2} - \frac{3i}{k_2 r_1^3}\right) + \\ \frac{e^{ik_2r_2}}{2\pi k_2} \left\{\frac{\rho}{r_2}\right) \left(\frac{z'+d}{r_2}\right) \left(\frac{ik_2^2}{r_2} - \frac{3}{r_2^2} - \frac{3i}{k_2 r_2^3}\right) - \left(\frac{k_2}{k_1}\right) e^{ik_2r_2} \\ \left[\left(\frac{\rho}{r_2}\right) \left(\frac{ik_2^2}{r_2} - \frac{1}{r_2^2}\right) - \left(\frac{k_2^3}{k_1}\right) \left(\frac{\pi}{k_2 r_2}\right)^{\frac{1}{2}} e^{-iP} F(P) \right] \end{cases} \end{cases}$$
(3.50)

$$E_{2z'}(\rho, z', \omega) = \frac{\omega \mu_0 I_L}{2\pi k_2} \begin{cases} \frac{e^{ik_2 r_1}}{2} \left[\frac{ik_2^2}{r_1} - \frac{1}{r_1^2} - \frac{i}{k_2 r_1^3} - \left(\frac{z'-d}{r_1} \right)^2 \left(\frac{ik_2^2}{r_1} - \frac{3}{r_1^2} - \frac{3i}{k_2 r_1^3} \right) \right] + \\ \frac{e^{ik_2 r_2}}{2\pi k_2} \left\{ \frac{e^{ik_2 r_2}}{2} \left[\frac{ik_2^2}{r_2} - \frac{1}{r_2^2} - \frac{i}{k_2 r_2^3} - \left(\frac{z'+d}{r_2} \right)^2 \left(\frac{ik_2^2}{r_2} - \frac{3}{r_2^2} - \frac{3i}{k_2 r_2^3} \right) \right] \\ - e^{ik_2 r_2} \left(\frac{k_2^3}{k_1} \right) \left(\frac{\pi}{k_2 r_2} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-iP} F(P) \end{cases}$$

$$(3.51)$$

Representando o canal da descarga atmosférica como um conjunto de dipolos elétricos verticais de comprimento infinitesimal, as expressões (3.49) a (3.51) nos fornece:

$$H_{2\phi}(\rho, z', \omega) = \int_{0}^{L} -\frac{I_{L}(z_{canal}, \omega)}{2\pi} \left[\frac{e^{ik_{2}r_{1}}}{2} \left(\frac{\rho}{r_{1}}\right) \left(\frac{ik_{2}}{r_{1}} - \frac{1}{r_{1}^{2}}\right) \frac{e^{ik_{2}r_{2}}}{2} \left(\frac{\rho}{r_{2}}\right) \left(\frac{ik_{2}}{r_{2}} - \frac{1}{r_{2}^{2}}\right) \right] dz_{canal}$$
$$-e^{ik_{2}r_{2}} \frac{k_{2}^{3}}{k_{1}} \left(\frac{\pi}{k_{2}r_{2}}\right)^{\frac{1}{2}} e^{-iP} F(P)$$

(3.52)

$$E_{2\rho}(\rho, z', \omega) = \int_{0}^{L} -\frac{i\omega \mu_{0} I_{L}(z_{canal}, \omega)}{2\pi k_{2}} \begin{cases} \frac{e^{ik_{2}r_{1}}}{2} \left(\frac{\rho}{r_{1}}\right) \left(\frac{z'-d}{r_{1}}\right) \left(\frac{ik_{2}^{2}}{r_{1}} - \frac{3}{r_{1}^{2}} - \frac{3i}{k_{2}r_{1}^{3}}\right) + \frac{e^{ik_{2}r_{2}}}{2} \\ \left(\frac{\rho}{r_{2}}\right) \left(\frac{z'+d}{r_{2}}\right) \left(\frac{ik_{2}^{2}}{r_{2}} - \frac{3}{r_{2}^{2}} - \frac{3i}{k_{2}r_{2}^{3}}\right) - \left(\frac{k_{2}}{k_{1}}\right) e^{ik_{2}r_{2}} \\ \left[\left(\frac{\rho}{r_{2}}\right) \left(\frac{ik_{2}^{2}}{r_{2}} - \frac{1}{r_{2}^{2}}\right) - \left(\frac{k_{2}^{3}}{k_{1}}\right) \left(\frac{\pi}{k_{2}r_{2}}\right)^{1/2} e^{-iP} F(P) \end{bmatrix} \right] dz_{canal}$$

(3.53)

$$E_{2z'}(\rho, z', \omega) = \int_{0}^{L} \frac{\omega \mu_{0} I_{L}(z_{canal}, \omega)}{2\pi k_{2}} \begin{cases} \frac{e^{ik_{2}r_{1}}}{2} \left[\frac{ik_{2}^{2}}{r_{1}} - \frac{1}{r_{1}^{2}} - \frac{i}{k_{2}r_{1}^{3}} - \left(\frac{z'-d}{r_{1}} \right)^{2} \left(\frac{ik_{2}^{2}}{r_{1}} - \frac{3}{r_{1}^{2}} - \frac{3i}{k_{2}r_{1}^{3}} \right) \right] + \\ \frac{e^{ik_{2}r_{2}}}{2} \left[\frac{ik_{2}^{2}}{r_{2}} - \frac{1}{r_{2}^{2}} - \frac{i}{k_{2}r_{2}^{3}} - \left(\frac{z'+d}{r_{2}} \right)^{2} \left(\frac{ik_{2}^{2}}{r_{2}} - \frac{3}{r_{2}^{2}} - \frac{3i}{k_{2}r_{2}^{3}} \right) \right] \\ - e^{ik_{2}r_{2}} \left(\frac{k_{2}^{3}}{k_{1}} \right) \left(\frac{\pi}{k_{2}r_{2}} \right)^{1/2} e^{-iP} F(P) \end{cases} dz_{canal}$$

(3.54)

Nas expressões de (3.52) a (3.54), o limite superior *L* das integrais é o comprimento total do canal da descarga atmosférica e a corrente $I_L(z_{canal}, i\omega)$ é a corrente determinada por (3.13) a (3.16), cujos valores variam para cada segmento do canal, ou seja, para cada dipolo que o compõe, e para cada freqüência desejada. Desta forma, ao longo da execução deste trabalho foi necessário o uso constante de algoritmos de FFT (Fast Fourier Transform) e de IFFT (Inverse Fast Fourier Transform) para levar a corrente de retorno presente no canal da descarga atmosférica do domínio do tempo para o domínio da freqüência e, também, para levar do domínio da freqüência os campos eletromagnéticos e tensões induzidas calculadas para o domínio do tempo. Isto foi feito cuidadosamente, pois estudar fenômenos transitórios no domínio da freqüência requer atenção na escolha do número de pontos usados e no tamanho dos intervalos empregados para se realizar a amostragem do sinal no domínio do tempo, assim busca-se evitar problemas como o surgimento na resposta de oscilações ("rippling effect") ou de deformações ("aliasing") inexistentes no sinal real. Uma discussão mais aprofundada sobre o tema pode ser encontrada em [Peled e Liu, 1976; Oppenheim e Schafer, 1975].

Nas expressões (3.52) a (3.54), utilizadas no programa computacional desenvolvido nesta tese de doutorado, quando é considerado um solo (região 1 na Figura 3.2) com condutividade infinita $(\sigma_1 \rightarrow \infty)$, os termos relacionados com a onda de superfície desaparecem e o campo total é dado exclusivamente pelos termos relativos ao campo direto e ao campo imagem. Estudos recentes ([Rakov *et al.*, 2005]) mostram que a chamada formula de Cooray-Rubinstein ([Rubinstein, 1996]), largamente utilizada por diversos pesquisadores da área, é apenas um caso particular de expressões gerais como (3.52) a (3.54) onde a porção do campo elétrico horizontal contendo o termo de onda de superfície é ignorado, resultando em representações errôneas desta componente do campo elétrico quando a distância entre o ponto de conexão da descarga e o ponto de observação do campo estão bastante distantes entre si, embora para distâncias curtas a fórmula forneça bons resultados. Os mesmos

estudos recentes mostram que a propagação dos campos eletromagnéticos provenientes de descargas atmosféricas sofre alterações significativas quanto maior a distância do ponto de observação e quanto menor a condutividade do solo, aumentando o tempo de subida da onda e diminuindo a intensidade do campo. Este tipo de comportamento pode afetar, por exemplo, sistemas de localização de descargas atmosféricas, que sejam baseados em expressões que não considerem o termo de onda de superfície.

O próximo passo na modelagem matemática do estudo feito neste trabalho é utilizar os campos eletromagnéticos apresentados anteriormente em conjunto com as expressões para as correntes de retorno presentes no canal da descarga atmosférica, quando esta se conecta ao solo ou a um objeto elevado metálico aterrado, por exemplo uma torre de telefonia celular, em conjunto com um modelo de acoplamento eletromagnético adequado, que descreva a interação entre uma descarga atmosférica e uma determinada linha vítima aérea nos fornecendo as tensões e correntes induzidas a partir dos campos eletromagnéticos nos quais estas linhas estão imersas.

3.3 Tensões induzidas a partir do campo eletromagnético incidente

Diferentes técnicas para o cálculo de tensões induzidas em linhas de transmissão foram propostas desde o ano de 1945, sendo a grande maioria delas equivalentes entre si, as quais geralmente modelam o acoplamento de campo eletromagnético de origem externa com a linha como fontes de tensão ou de corrente distribuídas ao longo desta. A diferença entre cada técnica reside essencialmente na forma de representação das fontes distribuídas ao longo de linhas de transmissão como a ilustrada na Figura 3.3 [Zago, 2004].

Na formulação apresentada por [Taylor *et al.*, 1965], as fontes distribuídas ao longo da linha são funções do campo elétrico e também do campo magnético, conforme é representado em (3.55) e (3.56).



Figura 3.3: Linha de transmissão terminada em cargas distintas.

$$\frac{\partial v(z,t)}{\partial z} + L \frac{\partial i(z,t)}{\partial t} = \int_{0}^{h} \frac{\partial B_{y}^{e}(x,z,t)}{\partial t} dx$$
(3.55)

$$\frac{\partial i(z,t)}{\partial z} + C \frac{\partial v(z,t)}{\partial t} = -C \int_{0}^{h} \frac{\partial E_{x}^{e}(x,z,t)}{\partial t} dx$$
(3.56)

onde:

- ➤ v (z, t): tensão na linha em função do tempo e da posição;
- ➢ i (z, t): corrente na linha em função do tempo e da posição;
- C: capacitância por unidade de comprimento da linha;
- L: indutância por unidade de comprimento da linha.

As condições de contorno, na formulação de Taylor, para a linha da Figura 3.3, são:

$$v(0,t) = -Z_{L1} i(0,t)$$
(3.57)

$$v(l,t) = Z_{L2} i(l,t)$$
(3.58)

Os segundos membros das equações (3.55) e (3.56) representam fontes distribuídas em função da densidade de fluxo magnético transverso (componente y) e em função da componente vertical do campo elétrico (componente x), respectivamente.

Na formulação proposta por [Agrawal *et al.*, 1980], as fontes distribuídas ao longo da linha são funções apenas das componentes do campo elétrico externo, conforme é representado em (3.59) e (3.60).

$$\frac{\partial v^{s}(z,t)}{\partial z} + L \frac{\partial i(z,t)}{\partial t} = E_{z}^{e}(h,z,t)$$
(3.59)

$$\frac{\partial i(z,t)}{\partial z} + C \frac{\partial v^s(z,t)}{\partial t} = 0$$
(3.60)

onde $v^{s}(z,t)$ representa a tensão de espalhamento, relacionada à tensão total na linha pelas equações (3.61) e (3.62).

$$v^{s}(z,t) = v(z,t) - v^{e}(z,t)$$
(3.61)

$$v^{e}(z,t) = -\int_{0}^{h} E_{x}^{e}(x,z,t)dx$$
(3.62)

onde $v^{e}(z,t)$ é a tensão de excitação.

As condições de contorno, na formulação de Agrawal, para a linha ilustrada na Figura 3.3, são:

$$v^{s}(0,t) = -Z_{L1} i(0,t) + \int_{0}^{h} E_{x}^{e}(x,0,t) dx$$
(3.63)
$$v^{s}(l,t) = Z_{L2} \ i(l,t) + \int_{0}^{h} E_{x}^{e}(x,l,t) dx$$
(3.64)

Já na formulação proposta por [Rachidi, 1993], as fontes distribuídas ao longo da linha são funções apenas das componentes do campo magnético externo, conforme é representado em (3.65) e (3.66).

$$\frac{\partial v(z,t)}{\partial z} + L \frac{\partial i^s(z,t)}{\partial t} = 0$$
(3.65)

$$\frac{\partial i^{s}(z,t)}{\partial z} + C \frac{\partial v(z,t)}{\partial t} = -\frac{1}{L} \int_{0}^{h} \frac{\partial B_{z}^{e}(x,z,t)}{\partial y} dx$$
(3.66)

onde $i^{s}(z,t)$ é a corrente de espalhamento, relacionada à corrente total na linha pelas equações (3.67) e (3.68).

$$i(z,t) = i^{s}(z,t) + i^{e}(z,t)$$
(3.67)

$$i^{e}(z,t) = \frac{1}{L} \int_{0}^{h} B_{y}^{e}(x,z,t) dx$$
(3.68)

onde $i^{e}(z,t)$ é a corrente de excitação (ou incidente).

As condições de contorno, na formulação de Rachidi, para a linha ilustrada na Figura 3.3, são:

$$i^{s}(0,t) = -\frac{v(0,t)}{Z_{L1}} - \frac{1}{L} \int_{0}^{h} B_{y}^{e}(x,0,t) dx$$
(3.69)

$$i^{s}(l,t) = \frac{v(l,t)}{Z_{L2}} - \frac{1}{L} \int_{0}^{h} B_{y}^{e}(x,l,t) dx$$
(3.70)

Além destes três modelos apresentados, merece destaque o modelo de Agrawal modificado por [Uman *et al.*, 1989], pois se trata de um modelo obtido experimentalmente e que considera linhas com múltiplos condutores, conforme é descrito a seguir.

Para o caso de uma linha de transmissão aérea com múltiplos condutores perfeitos, posicionada sobre um solo com condutividade infinita, as expressões em forma matricial obtidas pelas equações de Maxwell sobre a curva de integração *C*, representada na Figura 3.3, são mostradas em (3.71) a (3.73).

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[V_i^s(z) \right] + \left[R_{ij} \right] \left[I_i(z) \right] + \left[L_{ij} \right] \frac{\partial}{\partial t} \left[I_i(z) \right] = \left[E_z^{i}(z, h_i) \right]$$
(3.71)

$$\frac{\partial}{\partial z} [I_i(z)] + [C_{ij}] \frac{\partial}{\partial t} [V_i^s(z)] = 0$$
(3.72)

$$\left[V_{i}^{t}(z)\right] = \left[V_{i}^{s}(z)\right] - \left[\int_{0}^{h_{i}} E_{x}^{i}(x,z)dx\right]$$
(3.73)

onde:

- ➢ Vs (x): tensão de espalhamento;
- ➤ Vt (x): tensão total;
- \blacktriangleright E_xⁱ (x,z): campo elétrico vertical incidente;
- > $E_z^{i}(x,z)$: campo elétrico horizontal (tangencial) incidente.

A linha considerada no desenvolvimento matemático deste modelo está posicionada ao longo do eixo z sendo o eixo x vertical em relação à linha e com origem no plano de terra. A altura da linha é h e o índice i denota um condutor qualquer da linha, que é composta por múltiplos condutores.

Nas equações (3.71) a (3.73), a matriz I é a matriz das correntes. L, C e R são a indutância, a capacitância e a resistência por unidade de comprimento da linha, respectivamente. O índice *ij* em R, C e L denota os valores mútuos para estas grandezas (entre os fios i e j).

Na dedução das equações (3.71) a (3.73), as seguintes suposições foram feitas [Uman et al., 1989]:

- A soma das correntes entre a linha aérea e o plano de terra é zero;
- ➢ As indutâncias internas da terra e do fio podem ser desprezadas;
- A resistência da terra é independente da freqüência;
- A capacitância e a indutância por unidade de comprimento da linha aérea foram definidas para os campos incidentes como sendo iguais aos valores apresentados por ondas eletromagnéticas se propagando no modo TEM sobre um plano de terra perfeitamente condutor.

A Figura 3.4 ilustra o modelo adotado por [Uman *et al.*, 1989] para representar o acoplamento eletromagnético entre descargas atmosféricas e os condutores aéreos. Nesta figura, as fontes de tensão compostas pelo campo elétrico vertical nas extremidades da linha e em sua parte inferior, assim como, as fontes de tensão compostas pelo campo elétrico tangencial ao longo da linha, representam os campos em cada trecho da linha e, portanto, eles são afetados por atrasos no tempo, mudanças de amplitude e de forma de onda em cada posição considerada.



Figura 3.4: Circuito representativo do acoplamento eletromagnético entre uma linha de transmissão e os campos gerados por uma descarga atmosférica.

A principal vantagem de se utilizar o modelo ilustrado na Figura 3.4 é o fato de serem empregadas somente componentes do campo elétrico para a obtenção da tensão induzida na linha e, também, a consideração dos parâmetros da linha vítima como sendo constantes em relação à freqüência, o que simplifica bastante o problema, embora acarrete em representações com menos informações do ponto de vista de um estudo mais próximo da realidade.

É necessário salientar que todos estes métodos ou modelos de acoplamento mencionados apresentam resultados praticamente idênticos [Nucci e Rachidi, 1995], principalmente, com relação aos valores de pico das tensões ou das correntes obtidas, embora, em alguns casos, seja perceptível uma pequena variação entre eles com relação às formas de onda.

Buscando manter a mesma generalidade de abordagem adotada na modelagem da corrente de retorno no canal da descarga atmosférica e da modelagem dos campos eletromagnéticos gerados, foi empregado na implementação do programa computacional, desenvolvido neste trabalho, um modelo de acoplamento eletromagnético que também considera um solo com condutividade finita (solo com perdas). Isto foi possível através da inserção de parâmetros dependentes da freqüência na linha vítima e através da adoção do modelo de acoplamento de Agrawal, pois este é sem dúvida o modelo mais utilizado por diversos autores para a representação do fenômeno da indução de tensões em linhas aéreas a partir do campo elétrico no qual estas estão imersas.

As expressões de Agrawal (3.59) e (3.60) para uma linha aérea situada sobre um solo sem perdas foram modificadas e tratadas no domínio da freqüência para poderem representar um solo com condutividade finita e adquiriram a seguinte forma ([Tesche, 1992]):

$$\frac{\partial V^{s}(z)}{\partial z} + Z'I(z) = E_{z}^{e}(z,h)$$
(3.74)

$$\frac{\partial I(z)}{\partial z} + Y'V^s(z) = 0 \tag{3.75}$$

$$V(z) = V^{s}(z) - \int_{0}^{h} E_{x}^{e}(x, z) dx$$
(3.76)

onde Z' e Y' são a impedância longitudinal e a admitância transversa por unidade de comprimento, respectivamente, E_x^e é o campo elétrico vertical à linha, E_z^e é o campo elétrico tangencial à linha, V^s é a tensão de espalhamento, V é a tensão total induzida na linha e h é a altura da linha horizontal em relação ao solo.

No programa computacional desenvolvido neste trabalho, os campos elétricos verticais e tangenciais à linha (E_x^e e E_z^e) são obtidos a partir das expressões (3.53) e (3.54) para cada segmento ΔL da linha vítima e para cada freqüência dentro da faixa de interesse.

A impedância longitudinal por unidade de comprimento é dada por ([Tesche, 1992]):

$$Z' = i\omega L' + Z'_{\omega} + Z'_{g} \tag{3.77}$$

onde Z'_{ω} e Z'_{g} são as impedâncias por unidade de comprimento do fio e da terra, respectivamente. L' é a indutância por unidade de comprimento, calculada para um condutor sem perdas localizado sobre um solo com condutividade infinita

$$L' = \frac{\mu_0}{2\pi} \cosh^{-1}\left(\frac{h}{a}\right) \cong \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{2h}{a}\right) \quad para \ h \gg a \tag{3.78}$$

onde h é a altura em relação ao solo e a é o raio do condutor horizontal, respectivamente.

Segundo [Rachidi *et al.*, 1996], a impedância Z'_{ω} pode ser considerada próxima de zero para a faixa de freqüências envolvidas em uma descarga atmosférica e é definida por ([Ramo *et al.*, 1984]):

$$Z'_{\omega} = \frac{E_z}{I} \tag{3.79}$$

onde E_z é o campo elétrico tangencial à superfície do condutor e I é a corrente total que o atravessa.

Uma aproximação para a impedância Z'_g foi proposta por [Sunde, 1940], embora segundo [Rachidi *et al.*, 1996] para linhas maiores que 2 km esta possa ser considerada igual a zero em se tratando de estudos de tensões induzidas por descargas atmosféricas. A aproximação proposta por [Sunde, 1940] foi:

$$Z'_{g} = \frac{i\omega\mu_{0}}{2\pi} \ln\left(\frac{1+\gamma_{g}h}{\gamma_{g}h}\right)$$
(3.80)

onde *h* é a altura do condutor horizontal em relação ao solo, μ_0 é a permeabilidade magnética do ar e γ_g é a constante de propagação na terra.

A admitância transversa por unidade de comprimento, é dada por ([Tesche, 1992]):

$$Y' = \frac{\left(G' + i\,\omega\,C'\right)Y'_g}{G' + i\,\omega\,C' + Y'_g} \tag{3.81}$$

C' é a capacitância transversa calculada para um condutor horizontal perfeito localizado sobre um solo com condutividade infinita

$$C' = \frac{2\pi\varepsilon_0}{\cosh^{-1}(h/a)} \cong \frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln\left(\frac{2h}{a}\right)} \quad para \ h \gg a \tag{3.82}$$

onde h é a altura em relação ao solo e a é o raio do condutor horizontal, respectivamente.

G' é a condutância transversa por unidade de comprimento

$$G' = \frac{\sigma_{air}}{\varepsilon_0} C' \tag{3.83}$$

onde σ_{air} é a condutividade do ar e ε_0 é permissividade dielétrica do ar.

Y'g é admitância de terra

$$Y'_g \cong \frac{\gamma_g^2}{Z'_g} \tag{3.84}$$

onde γ_g é a constante de propagação na terra definida por

$$\gamma_g = \sqrt{i\,\omega\,\mu_0\left(\sigma_g + i\,\omega\varepsilon_0\varepsilon_{rg}\right)} \tag{3.85}$$

onde σ_g e ε_{rg} são a condutividade e a permissividade dielétrica relativa do solo, respectivamente.

Em situações convencionais, [Rachidi *et al.*, 1996] afirmam que a admitância Y'_g pode ser considerada infinita. Desta forma, a expressão para a admitância transversa (3.81) assume a seguinte forma:

$$Y' \cong G' + i\,\omega\,C'\tag{3.86}$$

Além dos métodos para cálculo de tensões induzidas em linhas aéreas a partir dos campos eletromagnéticos incidentes expostos neste trabalho, existem inúmeros outros, cuja escolha ou aplicação dependem, dentre outros fatores, do tamanho do problema tratado, da faixa de freqüências em questão, de características da linha vítima e do grau de precisão com que é necessário representar o fenômeno. Dentre estes métodos não tratados neste trabalho, merece destaque, devido ao seu pioneirismo, aquele criado por [Rusck, 1958] e que até hoje é utilizado por inúmeros pesquisadores da área ([Oliveira, 2001]) devido, principalmente, a sua eficácia relativamente boa, a sua simplicidade de implementação computacional e ao seu baixo requerimento de capacidade de processamento por parte dos computadores quando comparado com os demais métodos.

Após ter sido feita toda a modelagem matemática referente às tensões induzidas em uma linha aérea, com parâmetros dependentes da freqüência, ocasionadas por descargas atmosféricas próximas ou distantes, conectadas a objetos metálicos elevados e aterrados ou, simplesmente, ao solo, faz-se necessário mapear a região em torno da linha vítima como forma de analisar os efeitos de aglomerações urbanas nos níveis das tensões induzidas por descargas atmosféricas. A maneira encontrada para se tratar isto foi levar em consideração os raios de atração de tais objetos metálicos elevados e aterrados como se estes pudessem ser aproximados por torres metálicas, cujos raios de atração pudessem ser

facilmente determinados, bem como, a interação entre estes quando as torres estão próximas umas das outras.

3.4 Raios de atração das torres

A capacidade de um objeto elevado metálico e aterrado atrair descargas atmosféricas, é medida através do seu raio de atração. Inúmeras expressões para modelar matematicamente este fenômeno foram propostas ao longo da história da pesquisa com descargas atmosféricas, sendo que todas as mais recentes relacionam a um aumento da corrente presente no canal da descarga atmosférica um aumento proporcional no tamanho do raio de atração do objeto em questão ([Golde, 1945; Armstrong e Whitehead, 1968; Love, 1973; Eriksson, 1987; Rizk, 1990; Dellera e Garbagnati, 1990; Bernardi *et al.*, 1996]).

Segundo [Rizk, 1994], o raio de atração depende de diversos fatores como: da carga presente no líder, de sua distância em relação à estrutura, do tipo de estrutura (horizontal ou vertical), da altura da estrutura em relação ao solo, do tipo de solo (plano ou ondulado) e do campo elétrico no nível do solo devido às cargas das nuvens.

As expressões criadas para descrever os raios de atração podem ser obtidas de dois tipos de modelos principais: dos modelos eletrogeométricos e dos modelos físicos. Os modelos físicos são mais complexos que os eletrogeométricos por levarem em consideração um número maior de variáveis nas suas elaborações.

Os trabalhos de [Golde, 1945; Armstrong e Whitehead, 1968; Love, 1973] são baseados no modelo eletrogeométrico, cujas expressões são mostradas a seguir:

$$r = \sqrt{r_s^2 - (r_g - h)^2} \qquad \text{para } h < r_g \qquad (3.87)$$

$$r = r_s$$
 para $h \ge r_g$ (3.88)

onde *r* é o raio de atração da estrutura vertical, r_s é a distância de impacto da estrutura, r_g é a distância de impacto do solo e *h* é a altura da estrutura vertical.

 r_s e r_g estão relacionadas com a corrente de pico I_P presente no canal da descarga atmosférica por:

$$r_{\rm s} = \alpha \, I_P^{\,\beta} \tag{3.89}$$

$$r_g = k r_s \tag{3.90}$$

onde os valore α , $\beta \in k$ são independentes de I_P .

Já os trabalhos de [Eriksson, 1987; Rizk, 1990; Dellera e Garbagnati, 1990; Bernardi *et al.*, 1996] são baseados em modelos físicos, cuja expressão é mostrada a seguir:

$$r = c + a I_p^b \tag{3.91}$$

onde os valore a, $b \in c$ são independentes de I_P , e r é o raio de atração da estrutura vertical.

Os valores das constantes α , β , k, a, b e c nas expressões (3.89) a (3.91) são motivos de muitas controvérsias entre os pesquisadores da área de descargas atmosféricas, desta forma, estas constantes recebem valores diferentes dependendo da abordagem adotada e, conseqüentemente, do autor considerado. As Tabelas 3.5 e 3.6 (adaptadas de [Nucci *et al.*, 2004]) resumem alguns destes valores

em função de diferentes autores para os modelos eletrogeométrico e físico, respectivamente. Nestas tabelas, h é a altura da estrutura considerada.

Modelos Eletrogeométricos	α	β	k
[Armstrong e Whitehead, 1968]	6,7	0,8	0,9
Norma IEEE 1243, 1997**	10	0,65	0,55*
[Golde, 1945; Suzuki et al.,1981]	3,3	0,78	1

Tabela 3.5: Constantes do modelo eletrogeométrico propostas por diferentes autores.

* para uma altura média da estrutura de 40m.

** "IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines", IEEE Std. 1243-1997, Dec. 1997.

Tabela 3.6: Constantes do modelo fí	ísico propostas por diferentes autores.
-------------------------------------	---

Modelos Físicos	c	a	b
[Eriksson, 1987]	0	0,84 h ^{0,6}	$0,7 h^{0,002}$
[Rizk, 1994]	0	4,27 h ^{0,41}	0,55
[Dellera e Garbagnati, 1990; Bernardi et al., 1996]	3 h ^{0,6}	0,028 h	1

O programa computacional criado neste trabalho é capaz de considerar qualquer um dos modelos de raio de atração descritos anteriormente. Assim sendo, os fatores determinantes para a obtenção dos raios de atração médios de cada uma das torres presentes nas proximidades da linha vítima são a corrente de pico presente no canal da descarga atmosférica, calculada a partir das expressões (3.13) a (3.16), a altura do objeto elevado metálico aterrado, podendo variar de zero até centenas de metros, e o modelo de raio de atração escolhido em conjunto com as constantes de um dado autor. Na realização do

mapeamento em torno da linha vítima, que será descrito mais adiante, os pontos de conexão da descarga atmosférica localizados no interior do perímetro de atração de duas ou mais torres foram tratados de tal forma que a conexão da descarga fosse assegurada com a torre mais próxima deste ponto.

Após a obtenção das tensões induzidas em linhas aéreas, obtidas a partir do equacionamento do modelo do canal da descarga atmosférica, do tipo do ponto de conexão da descarga (solo ou objeto elevado: eletricamente grande ou pequeno), das expressões para campos eletromagnéticos gerados sobre solos com condutividade finita, dos modelos de acoplamento eletromagnético entre linhas aéreas, com parâmetros variando com a freqüência, e os campos elétricos incidentes e, finalmente, dos raios de atração destas estruturas, bem como da interação entre eles, faz-se necessário unir tudo isso de tal forma que seja possível extrair a influência das aglomerações de objetos metálicos elevados e aterrados, localizados nas proximidades de linhas aéreas, com relação às alterações nos padrões de ocorrência das tensões induzidas por descargas atmosféricas.

3.5 Mapeamento das tensões induzidas

O mapeamento das tensões induzidas por descargas atmosféricas nas proximidades de uma linha aérea de energia ou de telecomunicações, foi a maneira encontrada neste trabalho para tentar estabelecer algumas relações entre os fatores vinculados à urbanização e as alterações nos padrões de ocorrência destes surtos de tensões.

Como fora dito no início deste texto, intuitivamente sabe-se que os objetos metálicos elevados e aterrados, localizados próximos de linhas aéreas de energia ou de telecomunicações, exercem algum tipo de influência ou de modificação indireta nos padrões de ocorrência das tensões induzidas nestas

linhas. Um dos principais objetivos deste trabalho é identificar e quantificar estas modificações ocasionadas de forma indireta, ou seja, geradas através de alterações nos acoplamentos eletromagnéticos entre a descarga e a linha vítima, desconsiderando eventuais circulações de correntes entre as malhas (ou sistemas) de aterramento dos objetos elevados e das linhas aéreas.

A etapa inicial daquilo que batizamos de mapeamento das tensões induzidas consiste na definição de uma área de estudos em torno de uma linha vítima localizada em uma determinada região cujos parâmetros médios das descargas sejam conhecidos ou possam ser estimados. Isto é feito de tal forma que, para um valor de pico da corrente de retorno, obtido através de tabelas como a Tabela 2.1, e para um nível mínimo de tensão induzida de interesse, o ponto de conexão da descarga atmosférica seja variado de forma a se aproximar a uma distância crítica do centro da linha vítima (ponto crítico) onde estes valores mínimos de tensão comecem a serem observados na linha. Assim, com esta distância conhecida, define-se uma área quadrada em torno da linha vítima onde serão realizadas as análises relativas à urbanização, conforme é esquematizado na Figura 3.5.



Figura 3.5: Definição da área em torno da linha vítima (área ou grid do mapeamento).

Na Figura 3.5, as tensões relativas às descargas atmosféricas conectadas aos pontos localizados exatamente sobre o eixo da linha vítima não são consideradas, pois isto introduz uma simplificação na análise evitando a existência de descargas diretas na linha, uma vez que, neste trabalho são realizadas somente análises das tensões induzidas (descargas indiretas).

A partir da determinação do ponto crítico, a distância *d* é fixada e, com ela, o perímetro externo da área de estudo (grid). É importante ressaltar que, após a definição do perímetro externo do grid, não ocorrerão fora desta área pontos de conexão da descarga atmosférica (solo ou objeto elevado com uma dada altura limite) capazes de produzirem picos de tensões induzidas superiores ao valor mínimo estipulado como sendo o de interesse. O ponto crítico sempre estará localizado sobre o eixo que corta o centro da linha vítima, conforme será visualizado mais adiante através das simulações computacionais.

Após a definição do perímetro externo da área a ser mapeada, é escolhida uma forma de onda de corrente para a base do canal da descarga atmosférica com valor de pico menor ou igual a corrente máxima empregada na determinação do ponto crítico e da distância *d*. Modelando o problema desta maneira, não ocorrerão valores de pico de tensão induzida em qualquer ponto fora do grid superiores à tensão mínima escolhida na definição do ponto crítico. A principal função do nível mínimo de tensão de interesse será, posteriormente, possibilitar a comparação percentual entre o perfil de tensões obtidas no caso base com aquelas obtidas nos caso onde existam torres localizadas dentro do grid, pois sem a definição deste valor mínimo (condição de contorno) o tamanho do grid seria infinito (incluiria todos os pontos capazes de gerar tensões iguais ou próximas de zero), assim como, as porcentagens de tensões induzidas acima de dados níveis, em relação ao total de pontos considerados, tenderiam todas a zero em todos os casos. Este efeito ficará claro mais adiante, a partir das simulações computacionais.

A descarga com a corrente escolhida é, então, conectada a cada ponto interno do grid, inicialmente sem objetos elevados (torres) em seu interior, criando, assim, o perfil de distribuição das tensões induzidas do caso base. Desta forma, a cada ponto do grid é associando um valor de pico de tensão induzida na linha que correspondente à conexão do canal a cada um destes pontos, conforme é ilustrado na Figura 3.6.

A utilização do mesmo valor de corrente (*I*) no canal da descarga para cada ponto de conexão com o grid visa avaliar exclusivamente o efeito da disposição espacial do canal em relação à linha e o seu efeito sobre o valor de pico da tensão induzida.



Figura 3.6: Conexão do canal da descarga ao solo em todos os pontos no interior do grid (caso base).

Depois da determinação da distribuição da tensão induzida conectando-se a descarga atmosférica a cada um dos pontos localizados no interior do grid (todos no nível do solo), o mesmo procedimento é adotado, porém, agora, considerando cada ponto do interior do grid como sendo uma torre metálica de

altura *h* aterrada ao solo, desta forma, é associado a cada ponto do grid o valor das tensões induzidas na linha vítima provenientes de descargas conectadas a objetos elevados, conforme é ilustrado na Figura 3.7.



Figura 3.7: Conexão da descarga atmosférica às torres sobre todos os pontos no interior do grid.

A partir de simulações das configurações adotadas nas Figuras 3.6 e 3.7, são criados arquivos de dados pelo programa computacional desenvolvido. Estes arquivos armazenam dados relativos às tensões induzidas na linha vítima para um determinado conjunto de variáveis, como: posição espacial do ponto de conexão da descarga e tipo de ponto de conexão (solo ou objeto elevado). Em todos os casos, são utilizadas as mesmas correntes de excitação na base do canal da descarga atmosférica e a mesma

condutividade do solo. Desta forma, é possível extrair e avaliar somente a influência da presença das torres (ou objetos elevados) em relação ao caso base (sem nenhuma torre).

As comparações serão feitas sempre em relação a um caso base onde não existem objetos elevados (torres) nas proximidades da linha vítima. A partir deste caso base serão acrescentados objetos elevados localizados a diferentes distâncias da linha, em diferentes números e em diferentes densidades (número de torres / m²), e, desta forma, serão avaliadas as modificações nos padrões de ocorrência das tensões induzidas na linha vítima em função dos parâmetros vinculados à urbanização.

O próximo passo do mapeamento constitui em avaliar a interação entre as diversas torres presentes no grid e entre estas e os pontos localizados no nível do solo. Isto é feito levando-se em consideração os pontos localizados dentro dos raios de atração de cada torre, sendo que as descargas dentro dos raios de atração de mais altas cujas distâncias forem menores, e os pontos fora do raio de atração de qualquer torre presente no grid, conectados diretamente ao solo. Assim sendo, os arquivos gerados separadamente a partir das configurações das Figuras 3.6 e 3.7 passam a se relacionarem entre si possibilitando o estudo de casos particulares onde nem todos os pontos estão no nível do solo e nem todos os pontos dizem respeito a objetos elevados.

A Figura 3.8 ilustra os pontos conectados a cada uma das torres presentes em um determinado caso analisado, bem como os pontos de conexão direta com o solo. Os pontos representados por cruzes cinzas estão dentro do raio de atração da torre localizada sobre o *Ponto A* do grid, portanto qualquer descarga conectada a cada um destes pontos gerará uma tensão induzida na linha vítima igual à gerada por uma descarga conectada a uma torre localizada sobre o *Ponto A*. O mesmo acontece para as cruzes brancas dentro do raio de atração da torre localizada sobre o *Ponto B*. Desta forma, por exemplo, a ocorrência das tensões induzidas na linha vítima, provenientes do *Ponto A*, é igual ao número de pontos

dentro do raio de atração (*npdr*) da respectiva torre (cruzes cinzas). Os demais pontos do grid (sem cruzes brancas ou cinzas) representam conexões do canal da descarga diretamente com o solo.



Figura 3.8: Pontos dentro (cruzes) e fora do raio de atração das torres para raio de atração = $2x\Delta$ grid.

Nota-se, a partir da Figura 3.8, que o raio de atração deve ser um múltiplo inteiro de $\Delta grid$ e que o aumento ou diminuição do número de pontos localizados no interior do grid não afetará a análise das ocorrências das tensões induzidas, uma vez que, a razão entre o número de pontos dentro da área circular, proporcional ao raio de atração de uma dada torre, pelo número total de pontos do grid independe do tamanho do $\Delta grid$, embora quanto menor for o $\Delta grid$ menor será o erro proveniente do arredondamento dos raios de atração das torres.

Uma vez determinada a matriz que associa a cada ponto do grid a tensão induzida resultante na linha vítima, dependendo do ponto ser uma torre, estar dentro do raio de atração de alguma torre, ou ser o solo, é necessário somar as ocorrências de tensões acima de determinados valores e comparar os resultados fornecidos com os valores obtidos para o caso base.

Conforme será visto adiante, na parte das simulações computacionais, a elaboração do problema da maneira como fora mostrado permite a análise da influência da urbanização em um determinado cenário sempre em relação ao caso base (sem torres nas proximidades), portanto, não terá sentido uma eventual análise de valores absolutos, somente a de valores relativos. Além disso, para que sejam possíveis as comparações, é imprescindível que as condições da linha vítima, do solo e da corrente presente na base do canal da descarga para o caso base sejam as mesmas para o caso com torres.

A técnica sugerida de mapeamento da região em torno de uma dada linha aérea busca, através da fixação da forma de onda da corrente na base do canal da descarga, conectada a diversos pontos localizados no interior desta região, avaliar somente a influência do aumento do número de objetos elevados nas proximidades da linha no que diz respeito às tensões induzidas.

Embora os resultados fornecidos pelo método do mapeamento proposto neste trabalho sejam claramente dependentes da corrente escolhida para a base do canal, a partir de valores médios dos parâmetros das descargas medidos experimentalmente para uma dada região no globo terrestre, é possível escolher uma corrente média para o mapeamento e com isto avaliar qualitativamente os efeitos do aumento da concentração e do número de torres em torno de linhas aéreas localizadas nesta mesma região.

Caso uma análise estatística mais refinada seja pretendida, podem-se realizar simulações adicionais que incluam a variação ou distribuição estatística (Tabelas 2.1 a 2.5) dos parâmetros da corrente de

retorno de forma a verificar como os picos das tensões induzidas acabam sendo influenciados por esta variação, embora um estudo deste tipo requeira um esforço computacional consideravelmente maior.

CAPÍTULO 4

Validação e teste dos Modelos e métodos

E ste capítulo apresentará a validação dos modelos programados utilizando o software Matlab 7[®] através de comparações com trabalhos publicados por outros autores. Os testes serão apresentados passo a passo seguindo a seqüência lógica de formulação estabelecida no capítulo anterior sobre a modelagem matemática.

A eficiência de um modelo físico, matemático ou computacional pode ser avaliada levando-se em consideração a fidelidade com a qual é capaz de prever o comportamento do que está sendo modelado frente a uma infinidade de condições de contorno diferentes. Para medir esta eficiência e, por vezes, ajustar o próprio modelo, acaba sendo necessária a realização de exaustivos experimentos onde todas as variáveis de interesse devem ser cuidadosamente controladas e monitoradas.

Experimentos grandes e com muitos parâmetros envolvidos consomem muito tempo e dinheiro, mas são absolutamente indispensáveis para o desenvolvimento da ciência em suas diversas áreas. Atualmente, existe a tendência de realização de tais experimentos em conjunto com simulações feitas em computador, pois, através de um bom modelo computacional, é possível extrapolar dados obtidos experimentalmente e, até mesmo, corrigir eventuais falhas no processo experimental. Isto acaba sugerindo uma espécie de ciclo, à medida que, os próprios modelos computacionais requerem a realização de inúmeros experimentos reais que possibilitem o seu desenvolvimento. Neste sentido, existe o sistema torre-linha aérea no CIPTR do INPE de Cachoeira Paulista – SP, que constitui um experimento capaz de se beneficiar do programa computacional desenvolvido neste trabalho e que, também, futuramente beneficiará este trabalho lhe fornecendo dados experimentais capazes de contribuir com o aprimoramento dos modelos e das técnicas empregadas em sua implementação.

Embora ainda não existam estudos semelhantes ao abordado neste trabalho, os passos que levaram a sua implementação podem ser testados facilmente devido à diversidade de trabalhos publicados sobre eles. Espera-se que a partir do teste e validação individual de tais passos se garanta, ao menos teoricamente, a validade dos resultados que serão obtidos mais adiante a respeito da influência da urbanização nos níveis das tensões induzidas por descargas nas proximidades de linhas aéreas.

4.1 As correntes de retorno

O teste do programa computacional desenvolvido neste trabalho deve obrigatoriamente começar pelo código relativo a representação das correntes de retorno no canal da descarga atmosférica, pois este é o alicerce de todo o estudo apresentado, uma vez que, qualquer erro ou distorção, em relação ao que é observado na realidade, introduzido pelo modelo adotado para representar as correntes, acarretaria conclusões completamente erradas com respeito à influência da urbanização nos níveis das tensões induzidas em linhas aéreas.

Analisar o comportamento das correntes presentes no canal da descarga atmosférica quando este é conectado ao solo ou a um objeto elevado para diferentes valores de impedâncias equivalentes do solo, do canal, do objeto elevado e, ainda, para diferentes alturas de torres, modelos de canal, velocidades de propagação da frente de onda de corrente, é fundamental para compreender a influência de tais parâmetros nas tensões induzidas na linha vítima.

Conforme citado anteriormente, o canal da descarga atmosférica foi tratado como sendo composto por centenas de segmentos pequenos o suficiente para que a corrente pudesse ser considerada constante ao longo de suas extensões, cada um dos quais tratados como dipolos elétricos hertzianos pelas expressões para cálculo dos campos eletromagnéticos gerados. Desta forma, é possível saber o valor da corrente elétrica em qualquer um dos segmentos em qualquer instante de tempo desejado.

Os parâmetros da expressão analítica (4.1) de [Heidler, 1987], utilizadas para descrever matematicamente a corrente na base do canal utilizado nesta seção, estão expostos na Tabela 4.1. Esta expressão foi adotada para possibilitar a comparação exata com o trabalho publicado por [Rakov e Baba, 2006]. Os parâmetros do canal adotados foram: comprimento de 2,6 km, impedância (Z_{ch}) de 1000 Ω , velocidade de propagação da frente de onda da corrente (v) de 1x10⁸m/s e modelo *TL*. O canal encontra-se paralelo ao eixo z de coordenadas cartesianas.

$$i_{0}(t) = \frac{I_{01}}{\eta} \frac{(t/\tau_{1})^{n}}{1 + (t/\tau_{1})^{n}} e^{(-t/\tau_{2})} + I_{02} \left(e^{(-t/\tau_{3})} - e^{(-t/\tau_{4})} \right)$$
(4.1)

Tabela 4.1: Parâmetros da corrente na base do canal (adaptado de [Nucci et al., 1990]).

	Io1(kA)	$\tau_1(\mu s)$	$\tau_2(\mu s)$	n	Io2(kA)	$\tau_3(\mu s)$	$\tau_4(\mu s)$	η
Descargas subseqüentes	9,9	0,072	5	2	7,5	100	6,5	0,845

A primeira análise a ser feita é a da corrente de retorno presente no canal da descarga, quando esta se conecta diretamente ao solo, em função da impedância equivalente de terra (Z_g), conforme está registrado na Figura 4.1.



Figura 4.1: Corrente de retorno na posição z = 200m em função da impedância de terra (Z_g).

A Figura 4.2 registra a análise do comportamento da corrente de retorno em função da velocidade de propagação (v) da frente de onda da corrente ao longo do canal quando este se conecta diretamente ao solo. Neste caso, foram adotados para a impedância equivalente de terra (Z_g) e do canal (Z_{ch}) os valores de 0 Ω e de 1000 Ω , respectivamente.

A mesma sequência de testes apresentados nas Figuras 4.1 e 4.2 foram realizados considerando a conexão do canal da descarga atmosférica diretamente com um objeto elevado metálico e aterrado. Estes testes são mostrados nas Figuras 4.3 e 4.4 para um objeto com 100m de altura (h) e com impedância equivalente (Z_t) de 333 Ω .



Figura 4.2: Corrente de retorno na posição z = 200m em função da velocidade de propagação (v).



Correntes da descarga atmosférica para torre com altura = 100m em função de Zg ($Zt = 333\Omega$ e Zch = 1000 Ω)

Figura 4.3: Corrente de retorno na posição z = 200m em função da impedância de terra (Z_g).



Figura 4.4: Corrente de retorno na posição z = 200m em função da velocidade de propagação (v).

Não foram realizadas simulações da corrente de retorno em função da impedância equivalente do objeto elevado, pois através das variações das impedâncias equivalentes de terra e do canal já é possível visualizar os efeitos das variações dos coeficientes de reflexão no topo e na base da torre.

Visando compreender a influência da altura do objeto elevado metálico e aterrado, foi feita a simulação da corrente de retorno em função da altura (*h*) da torre, os resultados estão registrados na Figura 4.5. Neste caso, foram adotados para a impedância equivalente de terra (Z_g), do canal (Z_{ch}) e da torre (Z_t) os valores de 0 Ω , 1000 Ω e 333 Ω , respectivamente, e para a velocidade de propagação (v) o valor de 1x10⁸m/s.

A Figura 4.6 representa a corrente de retorno no canal da descarga atmosférica em função da impedância do canal (Z_{ch}) quando este se conecta ao objeto elevado metálico e aterrado.



Correntes da descarga atmosférica em função da altura da torre ($Zg = 0\Omega$, $Zt = 333\Omega$ e Zch = 1000 Ω)

Figura 4.5: Corrente de retorno na posição z = 200m em função da altura (*h*) do objeto elevado.





Figura 4.6: Corrente de retorno na posição z = 200m em função da impedância (Z_{ch}) do canal.

O teste registrado na Figura 4.7 verifica as poucas diferenças existentes, para a pequena altura de 200m, entre alguns dos modelos de canal apresentados anteriormente no Capítulo 3. Neste caso, foram utilizados os mesmos parâmetros da Figura 4.1, porém com Z_g fixo em 0 Ω .



Figura 4.7: Corrente de retorno na posição z = 200m em função do modelo de canal adotado.

A validação dos modelos empregados para representar as correntes de retorno das descargas atmosféricas, bem como de suas implementações computacionais, é obtida através de comparações com os resultados apresentados por [Rakov e Baba, 2006]. Comparando-se a curva da Figura 4.1 para $Z_g = 0\Omega$ com a Figura A.1 do anexo para z = 200m, os resultados foram similares. Agora, comparando-se a curva da Figura 4.3 para $Z_g = 0\Omega$ com a Figura A.2 do anexo para z = 200m, obtemos novamente uma grande similaridade. Finalmente, a comparação da curva da Figura 4.6 para $Z_{ch} = 333\Omega$ (casado com o objeto elevado) com a Figura A.3 do anexo para z = 200m, nos fornece outra similaridade.

A partir de comparações com [Rakov e Baba, 2006], foi verificado que os modelos escolhidos e programados para representar as correntes presentes no canal da descarga atmosférica em função de diversos parâmetros, foram adequados. O esforço computacional para calcular estas correntes foi diretamente proporcional ao comprimento do canal e inversamente proporcional à segmentação adotada para este. Na maior parte das simulações, o comprimento total do canal de 2,6 km em conjunto com uma segmentação de 3,25m mostrou-se suficiente para a correta determinação dos campos eletromagnéticos gerados, da mesma maneira como fora reportado por [Rakov *et al.*, 2005].

4.2 Os campos eletromagnéticos gerados

Os testes relacionados com os campos eletromagnéticos gerados por uma descarga atmosférica visam não somente determinar a validade das expressões apresentadas no Capítulo 3, mas, também, encontrar valores adequados para os comprimentos dos dipolos elétricos (Δl), para os intervalos de tempo (Δt) e de freqüência ($\Delta \omega$), para o comprimento total do canal (H_{tot}) e, desta forma, encontrar um equilíbrio entre esforço computacional e convergência das expressões programadas. Para cumprir este objetivo, foram feitas comparações com trabalhos de outros autores baseados em simulações computacionais e medições experimentais dos transitórios dos campos eletromagnéticos gerados.

Conforme dito anteriormente, o equacionamento dos campos eletromagnéticos fora feito no domínio da freqüência, enquanto as correntes presentes no canal da descarga atmosférica foram descritas por expressões no domínio do tempo. Isto fez com que fosse necessária a passagem das correntes obtidas para o domínio da freqüência antes que estas pudessem ser utilizadas como fontes de excitação pelas expressões dos campos.

As Figuras 4.8 e 4.9, obtidas a partir da utilização do algoritmo de FFT, exemplificam o módulo e a fase, respectivamente, da forma de onda da corrente de retorno para as mesmas condições da Figura 4.2, considerando v = $1,3x10^8$ m/s.



Figura 4.8: Módulo da corrente no canal da descarga (conexão direta com o solo).



Figura 4.9: Fase da corrente no canal da descarga (conexão direta com o solo).

O funcionamento adequado das expressões para cálculo dos campos eletromagnéticos pode ser atestado através da verificação da capacidade destas em reproduzir os campos para diferentes distâncias em relação à fonte (canal da descarga), diferentes alturas do ponto de observação em relação ao solo e diferentes tipos de solo.

Visando compreender a influência da distância do ponto de observação dos campos eletromagnéticos ao canal da descarga, foram feitas as simulações registradas nas Figuras 4.10 a 4.12, onde a forma de onda da corrente presente no canal da descarga, usada como excitação, foi a representada nas Figuras 4.8 e 4.9, o ponto de observação do campo foi localizado na interface entre os dois meios (ar e solo) e os parâmetros da superfície sobre a qual ocorre a propagação, utilizados nestas simulações, foram os da água do mar conforme a Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Parâmetros dos meios com condutividade finita (adaptado de [Rakov et al., 2005]).

Meio	$\sigma_2 \text{ S/m}$	$\varepsilon_r = \varepsilon_2 / \varepsilon_0$
Água do mar	4,0	80
Solo com condutividade relativamente alta	0,4	12
Solo com condutividade relativamente baixa	0,04	8

A Figura 4.13 também representa o campo elétrico horizontal em função da distância, porém nas seguintes condições de forma a possibilitar a comparação com [Rubinstein, 1996]: solo com $\sigma_2 = 0,01$ S/m e $\varepsilon_r = 10$, ponto de observação localizado a 6m de altura em relação ao solo, corrente descrita pela equação (4.1) com I₀₁ = 0, I₀₂ = 10kA, $\tau_3 = 0.33 \times 10^{-4}$ s, $\tau_4 = 1 \times 10^{-7}$ s e v = 1,1x10⁸ m/s.



Figura 4.10: Campo elétrico vertical em função da distância do ponto de observação ao canal.



Figura 4.11: Campo elétrico horizontal em função da distância do ponto de observação ao canal.



Figura 4.12: Campo magnético horizontal em função da distância do ponto de observação ao canal.



Figura 4.13: Campo elétrico horizontal em função da distância do ponto de observação ao canal para

 $\sigma_2 = 0.01 \text{ S/m e } \epsilon_r = 10.$

O comportamento dos campos eletromagnéticos observados em função dos três diferentes tipos de meios mostrados na Tabela 4.2, sobre os quais se dá a propagação das ondas eletromagnéticas, está registrado nas Figuras 4.14 a 4.16. Nestas simulações, foram utilizados: a corrente das Figuras 4.8 e 4.9, o ponto de observação do campo localizado na interface entre o ar e o solo e uma distância fixa de 200m entre o canal da descarga e o ponto de observação dos campos eletromagnéticos. As Figuras 4.14 a 4.16 revelam que apenas o campo elétrico horizontal sofre uma influência relativamente grande do tipo de solo sobre o qual se dá a propagação, pois tanto para o campo elétrico vertical como para o campo magnético horizontal ocorre a sobreposição das curvas.

A influência da altura do ponto de observação dos campos eletromagnéticos nas formas de onda observadas, é ilustrada nas Figuras 4.17 a 4.19 onde foram utilizados: os parâmetros do solo com condutividade relativamente baixa, de acordo com a Tabela 4.2, a corrente descrita pelas Figuras 4.8 e 4.9 e a distância de 200m entre o canal da descarga e o ponto de observação dos campos.



Figura 4.14: Campo elétrico vertical em função das características do solo.



Figura 4.15: Campo elétrico horizontal em função das características do solo.



Figura 4.16: Campo magnético horizontal em função das características do solo.



Figura 4.17: Campo elétrico vertical em função da altura do ponto de observação.



Campo Elétrico Horizontal em função da altura do ponto de observação

Figura 4.18: Campo elétrico horizontal em função da altura do ponto de observação.


Figura 4.19: Campo magnético horizontal em função da altura do ponto de observação.

A validação dos modelos empregados para representar os campos eletromagnéticos provenientes das descargas atmosféricas, bem como de suas implementações computacionais, é obtida através de comparações com os resultados apresentados por [Rakov *et al.*, 2005] e [Rubinstein, 1996]. Comparando-se as Figuras 4.10 a 4.12 com as Figuras A.4 a A.6 do anexo, respectivamente, para o caso onde o meio sobre o qual se dá a propagação é a água do mar, são obtidas curvas idênticas. Para possibilitar estas comparações foram escolhidos parâmetros idênticos aos utilizados por [Rakov *et al.*, 2005]: comprimento total do canal igual a 2,6km dividido em 800 segmentos de 3,25m, janela de tempo ou tempo total de amostragem da corrente igual a 409,6µs divididos em instantes de 0,05µs, freqüência máxima de aproximadamente 10MHz divididos em 8192 freqüências com intervalos de 2,44kHz.

Buscando-se uma comparação adicional com outro autor, foram feitas as simulações da Figura 4.13, que comparadas com as Figuras A.7 a A.9 do anexo, obedecendo as respectivas distâncias, resultaram novamente em curvas idênticas. Estas comparações foram possíveis devido à adoção de parâmetros iguais aos utilizados por [Rubinstein, 1996].

Finalmente, comparando-se as Figuras 4.14 a 4.16 com as Figuras A.4 a A.6 para os respectivos meios adotados, de acordo com a Tabela 4.2, as curvas obtidas mostraram-se bastante semelhantes ou idênticas com exceção da curva da Figura 4.15 para solo com condutividade relativamente baixa, que apresentou menos oscilações que a forma de onda correspondente na Figura A.5 do anexo e um pico cerca de 10% maior, provavelmente devido a eventuais diferenças entre os incrementos empregados nos dois trabalhos.

A partir de comparações com [Rakov *et al.*, 2005] e [Rubinstein, 1996] foi verificado o correto funcionamento dos modelos escolhidos e programados para representar os campos eletromagnéticos provenientes da descarga atmosférica em função de parâmetros como distância, altura do ponto de observação e tipo de solo sobre o qual as ondas se propagam.

4.3 As tensões induzidas

Após ter sido atestada a validade e o correto funcionamento dos modelos adotados e programados para representar as correntes no canal da descarga atmosférica, bem como, os campos eletromagnéticos gerados por estas correntes, faz-se necessário testar o modelo de acoplamento eletromagnético empregado e o modelo da linha de transmissão com parâmetros em função da freqüência. Além disso, são importantes os testes relativos ao comportamento das tensões induzidas frente à variação de determinados parâmetros, tais como: tipo de solo sobre o qual a linha aérea se estende, características

da linha vítima, altura do objeto elevado, distância do ponto de impacto da descarga até a linha vítima, coeficientes de reflexão no topo e na base do objeto elevado ou, no caso de impacto direto com o solo, o coeficiente de reflexão entre o canal e a terra e etc.

Visando avaliar a influência de um solo com condutividade finita sobre o acoplamento eletromagnético entre os campos provenientes da descarga atmosférica e a linha vítima, foram feitas as simulações registradas na Figura 4.20, sendo a corrente utilizada no canal da descarga ($H_{tot} = 2,6$ km) definida pela Tabela 3.3 e pela expressão (3.7) com v = $1,3x10^8$ m/s para possibilitar a comparação posterior com [Rachidi *et al.*, 1996]. A linha possui 1cm de diâmetro, 1km de comprimento, 10m de altura e está terminada em ambas as extremidades por impedâncias de 500 Ω , que corresponde, aproximadamente, à impedância característica da linha quando esta é considerada sem perdas. O ponto de impacto da descarga diretamente com o solo está localizado a 50m do centro da linha e é eqüidistante de suas extremidades, enquanto o ponto de observação da tensão induzida está localizado no final da linha.



Figura 4.20: Tensão induzida em função do tipo de solo (impacto direto no solo).

Para compreender a influência da terminação (carga) da linha aérea nos níveis de tensão induzida alcançados, foram feitas as simulações mostradas na Figura 4.21. Estas simulações consideraram a mesma corrente e linha vítima das simulações da Figura 4.20, porém para um solo com parâmetros fixos ($\sigma = 0.001$ S/m e $\epsilon r = 10$), além disso, uma das extremidades da linha foi mantida casada e o ponto de observação da tensão foi situado sobre esta extremidade.



Figura 4.21: Tensão induzida em função da terminação (Z_{carga}) da linha aérea (impacto direto no solo).

Já na Figura 4.22, é analisada a influência da altura da linha aérea em relação ao solo nos níveis das tensões induzidas para a mesma configuração da Figura 4.21, porém com a linha casada com 500 Ω em ambas extremidades.

A influência da extensão da linha aérea nos níveis das tensões induzidas, foi estudada através das simulações demonstradas na Figura 4.23 onde, novamente, foram utilizadas as mesmas condições das simulações da Figura 4.22, mas com a altura da linha vítima fixada em 10m.



Figura 4.22: Tensão induzida em função da altura (*h*) da linha aérea (impacto direto no solo).



Figura 4.23: Tensão induzida em função da extensão (L) da linha aérea (impacto direto no solo).

Buscando-se avaliar o efeito da distância entre o ponto de impacto da descarga atmosférica e a linha vítima e, também, as diferenças existentes entre as tensões induzidas por descargas conectadas diretamente ao solo e aquelas conectadas a objetos elevados, uma nova linha aérea sem perdas, localizada sobre um solo perfeitamente condutor, com 1,2km de extensão, 1cm de diâmetro, 10m de altura e casada em ambas as extremidades com resistores de 498 Ω será analisada para possibilitar a comparação posterior com o trabalho de [Rakov e Baba, 2006]. Neste caso, a corrente presente no canal e os coeficientes de reflexão são os mesmos usados na simulação da Figura 4.2 com v = 1x10⁸ m/s, sendo o ponto de conexão da descarga com o solo alinhado com o centro da linha aérea, conforme a Figura 4.24. A tensão induzida é observada na porção intermediária da linha.



Figura 4.24: Disposição espacial da linha aérea e do canal da descarga conectado ao solo.

A Figura 4.25 representa a variação das tensões induzidas alcançadas na nova linha aérea em função da distância (ΔL) entre o ponto de impacto da descarga atmosférica, conectada diretamente ao solo, e o centro da linha.

Para auxiliar na compreensão da diferença existente entre as tensões induzidas ocasionadas por descargas atmosféricas conectadas diretamente ao solo e as conectadas a objetos metálicos elevados e aterrados, foi acrescentada uma torre de 100m de altura ao caso da Figura 4.24, conforme ilustrado na

Figura 4.26, e foram realizadas simulações para diferentes valores dos coeficientes de reflexão no topo e na base desta torre.



Figura 4.25: Tensão induzida em função da distância (ΔL) entre a linha e o ponto de conexão do canal.



Figura 4.26: Disposição espacial da linha aérea e do canal da descarga conectado à torre em estudo.

Os resultados apresentados na Figura 4.27 avaliam a influência da distância entre a torre atingida pela descarga atmosférica e a linha vítima para $Z_{ch} = 1000\Omega$, $Z_t = 333\Omega$ e $Z_g = 0\Omega$, ou seja, para um coeficiente de reflexão de corrente no topo da torre (σ_{top}) e na base (σ_{bot}) iguais a -0,5 e 1, respectivamente, enquanto na Figura 4.28 o mesmo teste é feito para $\sigma_{top} = 0$ e $\sigma_{bot} = 1$ ($Z_{ch} = 333\Omega$, $Z_t = 333\Omega$ e $Z_g = 0\Omega$). As correntes utilizadas nas simulações das Figuras 4.27 e 4.28, foram as mesmas ilustradas anteriormente na Figura 4.6 para $Z_{ch} = 1000\Omega$ e $Z_{ch} = 333\Omega$, respectivamente, ambas com $v = 1 \times 10^8$ m/s.

Para visualizar a influência da altura da torre nos níveis das tensões induzidas, foram feitas as simulações registradas na Figura 4.29 variando-se a altura da torre para o caso simulado na Figura 4.27, porém mantendo-se fixa em 100m a distância ΔL entre a torre e a linha vítima.



Figura 4.27: Tensão induzida em função da distância (ΔL) entre a linha e a torre ($\sigma_{top} = -0.5$ e $\sigma_{bot} = 1$).



Figura 4.28: Tensão induzida em função da distância (ΔL) entre a linha e a torre ($\sigma_{top} = 0$ e $\sigma_{bot} = 1$).



Tensões Induzidas em função da altura da torre

Figura 4.29: Tensão induzida em função da altura (*h*) da torre ($\sigma_{top} = -0.5 \text{ e } \sigma_{bot} = 1$).

A Figura 4.30 mostra a razão entre as tensões geradas pelas descargas conectadas diretamente às torres de 25, 50 e 100m (V_{tall}), localizadas a 100m da linha vítima, e a descarga conectada diretamente ao solo (V_{flat}), também a uma distância de 100m da linha.



Figura 4.30: Razão entre as tensões induzidas por descargas conectadas às torres e ao solo.

Comparando-se a Figura 4.20 com a Figura A.10 do anexo, adaptada de [Rachidi *et al.*, 1996], para $\sigma = 0,001$ S/m e para $\sigma \rightarrow \infty$ é verificada a similaridade dos resultados, demonstrando o correto funcionamento dos modelos de acoplamento eletromagnético e da linha de transmissão adotados e programados com relação ao estudo das tensões induzidas em ocasiões onde o solo não seja considerado perfeitamente condutor.

Através da comparação da Figura 4.25 com a Figura A.11 do anexo, adaptada de [Rakov e Baba, 2006], conclui-se que a representação das tensões induzidas para o caso de descargas conectadas diretamente ao solo também demonstra a viabilidade do modelo adotado.

A visualização das Figuras 4.27 e 4.28 em conjunto com as Figuras A.12 e A.13 do anexo, adaptadas de [Rakov e Baba, 2006], permite atestar a validade dos modelos sugeridos e programados para representarem as tensões induzidas provenientes de descargas atmosféricas conectadas a objetos metálicos elevados e aterrados. Além disso, possibilita analisar os valores das tensões em função da distância da torre em relação à linha aérea e, também, em função dos coeficientes de reflexão no topo e na base da torre.

A Figura A.14 do anexo, adaptada de [Rakov e Baba, 2006], se refere à razão entre a tensão induzida por uma descarga conectada a um objeto elevado localizado a 100m de distância (ΔL) do centro da linha vítima em relação a uma descarga conectada diretamente ao solo a uma mesma distância da linha (V_{tall} / V_{flat}). Comparando-se as razões mostradas na Figura 4.30 com as mostradas na Figura A.14 do anexo para $\sigma_{bot} = 1$ e $\sigma_{top} = -0,5$, atesta-se o funcionamento adequado dos modelos e do programa com relação à capacidade de levar em consideração a altura dos objetos elevados.

Em [Rakov e Baba, 2006], o método das diferenças finitas no domínio do tempo (*FDTD*) foi utilizado em conjunto com condições de contorno definidas por 6 planos de absorção de segunda ordem de Liao ([Liao *et al.*, 1984]), além disso, fora utilizado no mesmo trabalho incrementos no tempo (Δt) da ordem de 5ns. Desta forma, as pequenas diferenças existentes entre as formas de onda presentes nas Figuras 4.25, 4.27, 4.28 e 4.29 e nas Figuras A.11 a A.13 do anexo são perfeitamente aceitáveis. Estas diferenças, além de estarem associadas aos diferentes métodos adotados neste trabalho e no de [Rakov e Baba, 2006], estão provavelmente relacionadas aos incrementos de tempo de 50ns utilizados aqui.

CAPÍTULO 5

A INFLUÊNCIA DA URBANIZAÇÃO

Un estudo computacional do impacto do aumento da urbanização nos padrões de ocorrência das tensões induzidas por descargas atmosféricas próximas de linhas de transmissão, será apresentado neste capítulo. Os capítulos anteriores delinearam o caminho a ser percorrido até que fosse possível realizar o estudo proposto a respeito da urbanização ou do aumento do número e da concentração de objetos elevados metálicos e aterrados em torno de linhas aéreas de energia ou de telecomunicações. O programa computacional e as bases teóricas, que foram utilizados como alicerces para este estudo, foram testados com sucesso anteriormente, embora não existam dados experimentais ou estudos semelhantes a este que possam ser utilizados em comparações diretas.

Conforme dito anteriormente, as análises aqui feitas serão sempre relativas a um caso base onde não existam objetos elevados nas proximidades de uma dada linha aérea de interesse e onde uma corrente de retorno típica, com parâmetros médios, para a região na qual esteja localizada esta linha, possa ser considerada. Além disso, descargas diretas na linha, circulações de correntes entre os sistemas de aterramento das torres e da linha, efeitos de indução mútua entre as próprias torres e a atração de descargas pela linha aérea, não foram modelados por representarem um desvio do escopo deste trabalho, além de tornarem extremamente complexas as análises pretendidas.

5.1 Mapeamento das tensões induzidas

Para ilustrar a técnica do mapeamento das tensões induzidas sugerida, será considerado inicialmente um caso base onde não exista nenhum objeto elevado metálico e aterrado nas proximidades de uma linha aérea. A linha vítima escolhida tem comprimento L = 600m, altura em relação ao solo h = 10m e está casada em ambas as extremidades por impedâncias de 500 Ω . O solo sobre o qual esta linha está localizada e, conseqüentemente, sobre o qual se dará a propagação das ondas eletromagnéticas provenientes do canal da descarga atmosférica apresenta condutividade relativamente baixa conforme os valores expostos na Tabela 4.2 e impedância $Z_g = 0\Omega$. O ponto de observação das tensões induzidas na linha está localizado na porção intermediária da linha de forma eqüidistante de suas extremidades. A tensão induzida mínima de interesse, utilizada como condição de contorno na definição do grid, foi fixada em 20kV para objetos elevados de altura máxima igual a 100m e impedância $Z_t = 333\Omega$.

A Figura 5.1 ilustra a linha vítima que será mapeada inicialmente e que constituirá o chamado caso base. A região onde a linha vítima se encontra apresenta, supostamente, correntes médias de retorno, obtidas experimentalmente ou através de sistemas de detecção de descargas atmosféricas, com as características descritas por (3.7) e pela Tabela 3.3, sendo a velocidade de propagação da frente de onda de corrente no canal da descarga $v = 1,3x10^8$ m/s.



Figura 5.1: Linha vítima utilizada no mapeamento do caso base (descargas conectadas ao solo).

A Figura 5.2 registra o resultado obtido para o mapeamento do caso base considerando a linha aérea e as condições da Figura 5.1. As cores mais quentes representam as posições do grid para conexão do canal da descarga atmosférica onde são obtidos os maiores níveis de tensões induzidas, enquanto as cores mais frias dizem respeito aos pontos de conexão onde os menores níveis são atingidos. Nas Figuras 5.2 a 5.10 e 5.12, as linhas aéreas vítimas encontram-se localizadas perpendicularmente ao eixo y na posição Y = 101 e com as suas extremidades nas posições X = 40 e X = 160 do grid, ou seja, os seus centros encontram-se na posição X = 100 e Y = 101. As cores indicam os picos de tensões induzidas alcançados para conexões do canal da descarga nos respectivos pontos do interior do grid.



Figura 5.2: Mapeamento do caso base.

Visando ilustrar as alterações ocorridas no mapeamento quando existem torres nas proximidades da linha aérea, foi feito novamente o mapeamento do caso da Figura 5.1, porém, ao contrário da simulação

do caso base (Figura 5.2), desta vez com 30 torres localizadas aleatoriamente nas posições indicadas por setas na Figura 5.3. As torres neste caso possuem altura média h = 50m, impedância $Z_t = 333\Omega$ e o modelo de raio de atração adotado foi o de [Armstrong e Whitehead, 1968], conforme a Tabela 3.5. Os círculos coloridos (ou manchas), cujos centros estão localizados exatamente sobre a posição das torres no grid, que aparecem na Figura 5.3, representam as descargas conectadas às torres e, conseqüentemente, suas cores estão associadas aos valores das tensões induzidas por descargas conectadas a elas e não mais ao solo como ocorria no caso base (Figura 5.2). É importante ressaltar que, embora o número de pontos presentes no interior destes círculos seja finito e dependente da escolha do tamanho da segmentação (*Agrid*), o total de pontos dentro do perímetro do grid é o mesmo tanto no caso base como no caso com torres, permitindo, desta forma, a comparação entre ambos.



Figura 5.3: Mapeamento do caso com 30 torres com h = 50m.

A Figura 5.4 representa os mesmos resultados da Figura 5.3, porém a partir de uma vista tridimensional para facilitar a localização das torres no grid do mapeamento e a visualização dos níveis de tensão induzida alcançados.



Figura 5.4: Mapeamento do caso com 30 torres com h = 50m (vista tri-dimensional).

Para verificar a influência da altura média das torres na modificação do mapeamento em relação ao caso base, foi feita a simulação do mesmo caso da Figura 5.3, porém com torres com altura média h = 100m. Os resultados obtidos estão registrados na Figura 5.5 e, em uma análise rápida, se pode concluir que quanto maior a altura dos objetos elevados localizados nas proximidades da linha aérea maiores serão as modificações ou influências destes nos padrões de ocorrência das tensões induzidas.



Picos das tensões induzidas [kV] para o caso com torres (h = 100m), Δ grid = 5m

Figura 5.5: Mapeamento do caso com 30 torres com h = 100m.

A Figura 5.6 representa os mesmos resultados da Figura 5.5, porém a partir de uma vista tridimensional.

É interessante observar que na Figura 5.6, os cilindros visualizados apresentam-se de forma mais destacada que no caso com torres com altura h = 50m, pois as tensões induzidas alcançadas na linha vítima para descargas conectadas às torres com altura h = 100m ou aos pontos dentro dos seus raios de atração são mais elevadas que no primeiro caso, uma vez que, as torres mais elevadas comportam-se, para a forma de onda escolhida para representar as descargas atmosféricas, como objetos elevados eletricamente "grandes" intensificando, desta forma, o efeito de indução na linha vítima.



Picos das tensões induzidas [kV] para o caso com torres (h = 100m), Δ grid = 5m

Figura 5.6: Mapeamento do caso com 30 torres com h = 100m (vista tri-dimensional).

As simulações presentes nas Figuras 5.2 a 5.6 corroboram com a intuição de que quanto maior o número de objetos elevados e maior a proximidade deles em relação à porção intermediária da linha aérea maiores são as modificações nos padrões de ocorrência das tensões induzidas em relação ao caso base (sem torres) e em relação aos níveis mais altos de tensão induzida observados na linha vítima. Além disso, as torres mais elevadas alteram de forma mais significante os padrões que as torres mais baixas, sendo isto constatado devido a presença maior de círculos ou manchas com cores mais quentes no primeiro caso. Todas as modificações em relação ao caso base serão quantificadas mais adiante onde serão avaliados cenários de intensa urbanização, semelhantes aos encontrados em grandes centros urbanos.

5.2 Alterações percentuais em relação ao caso base

O principal objetivo deste trabalho é quantificar as alterações nos padrões de ocorrência de surtos de tensão induzida, provenientes de descargas atmosféricas nas redondezas de linhas aéreas, devido ao aumento do número de objetos metálicos elevados nas proximidades destas linhas, ou seja, devido ao aumento da urbanização. Para isto foram realizados os mapeamentos presentes nas Figuras 5.7 e 5.8 para torres com altura h = 50m e h = 100m, respectivamente e considerando cenários de intensa urbanização como os encontrados nas grandes metrópoles. As comparações percentuais foram realizadas em relação ao caso base representado pelo mapeamento registrado na Figura 5.2 e os demais parâmetros utilizados foram os mesmos dos mapeamentos das Figuras 5.3 e 5.5, porém com 95 torres.







Figura 5.8: Mapeamento do caso com 95 torres com h = 100m.

Novamente, o caso com torres mais elevadas (h = 100m) apresentou maiores alterações em relação ao caso base conforme pôde ser verificado através da existência de círculos, representando as torres, com cores mais quentes que no caso com torres com h = 50m.

Observa-se que a área coberta pelas regiões formadas pelos círculos, que representam as regiões de atração das respectivas torres, é bem menor no caso com apenas 30 objetos elevados ou torres que no caso com 95 e corroboram novamente com a intuição de que o efeito somado da presença de tais objetos nos padrões de ocorrência das tensões induzidas, é bem mais pronunciado no segundo caso.

As Figuras 5.9 e 5.10 representam o mapeamento na forma tri-dimensional para os casos das Figuras 5.7 e 5.8, respectivamente.



Picos das tensões induzidas [kV] para o caso com torres (h=50m), ∆grid = 5m

Figura 5.9: Mapeamento do caso com 95 torres com h = 50m (vista tri-dimensional).



Picos das tensões induzidas [kV] para o caso com torres (h=100m), ∆grid = 5m

Figura 5.10: Mapeamento do caso com 95 torres com h = 100m (vista tri-dimensional).

As diferenças percentuais entre o caso base (Figura 5.2) e os casos representados pelos mapeamentos registrados nas Figuras 5.7 a 5.10, são mostradas na Figura 5.11.



Distribuição das Tensões Induzidas

Figura 5.11: Diferenças percentuais entre o caso base (solo) e os casos com torres.

A análise da Figura 5.11 revela que para a densidade de ocupação ou de urbanização escolhida e para a geometria adotada como exemplo as maiores diferenças entre o caso base e os casos com torres ocorrem para tensões induzidas entre 20kV e 25kV, isto se deve à quantidade de torres escolhida e às distâncias entre as torres e a linha vítima e entre as próprias torres.

Para ilustrar o efeito de uma urbanização mais intensa, foi realizado o mapeamento da Figura 5.12 para torres com altura média h = 100m onde a densidade de ocupação é maior que a empregada no mapeamento da Figura 5.8. As diferenças percentuais entre o caso base e o novo caso com torres (h = 100m), são mostradas na Figura 5.13.



Figura 5.12: Mapeamento do caso com 342 torres com h = 100m (alta densidade de ocupação).



Figura 5.13: Diferenças percentuais entre o caso base (solo) e o caso com alta densidade de ocupação.

O estudo das informações fornecidas por gráficos como os registrados nas Figuras 5.11 e 5.13, obtidos a partir do mapeamento de determinados cenários de urbanização em torno de linhas aéreas de interesse, contribui para uma melhor avaliação dos novos riscos aos quais estão sujeitas tais linhas frente às modificações ocorridas em suas proximidades. É evidente que tais riscos constituam apenas probabilidades de ocorrência e que possam levar décadas para se concretizarem, porém, levando-se em consideração tais informações, muitos danos materiais futuros podem ser evitados através de projetos de sistemas de proteção bem dimensionados.

O mapeamento registrado na Figura 5.12 nos revela aquilo que pode ser considerada a maior aproximação ou fonte de erros inerentes ao método proposto neste trabalho: o efeito da propagação das ondas eletromagnéticas provenientes do canal da descarga atmosférica em um ambiente densamente povoado com obstáculos de metal ou de concreto (por exemplo, torres e edifícios). Neste trabalho, as possíveis interferências ocasionadas por estes objetos ao longo da propagação das ondas eletromagnéticas pelo ar foram desconsideradas devido à extrema complexidade de análise.

Outro fator que pode introduzir erros consideráveis no tipo de análise proposta é a escolha do modelo de raio de atração dos objetos elevados. Conforme dito anteriormente, existem muitas controvérsias a respeito da validade e de quais os modelos mais adequados para representar este fenômeno físico, assim sendo, o que se buscou empregar neste trabalho foram alguns dos modelos existentes na literatura e apontados como os que melhor descrevem os dados experimentais existentes, embora mesmo estes ainda sejam considerados incompletos por inúmeros pesquisadores da área. A dificuldade em se encontrar um modelo de raio de atração unânime entre os pesquisadores provêm do caráter estocástico das descargas atmosféricas e, também, da escassez de dados experimentais considerando-se a enorme quantidade de dados necessários para a criação de um modelo estatístico adequado para este fenômeno.

CAPÍTULO 6

Conclusões e trabalhos futuros

este trabalho fora desenvolvida uma metodologia em conjunto com um programa computacional capazes de auxiliarem no estudo dos efeitos da urbanização sobre os padrões de ocorrência das tensões induzidas em linhas aéreas por descargas atmosféricas próximas. Além disso, foram criadas condições melhores tanto para a preparação como para a análise computacional dos experimentos instalados nos centros de pesquisas de Cachoeira Paulista e da Universidade Federal do Pará - UFPA, que envolvem sistemas com linhas aéreas, torres elevadas e descargas atmosféricas trigadas. Com relação aos resultados obtidos com as simulações computacionais, foi verificado que quanto maior a presença de objetos elevados em torno de linhas aéreas, maiores são as alterações nos níveis de tensões induzidas observados na linha, além disso, quanto maior a proximidade destes objetos elevados ou torres em relação à porção intermediária da linha aérea maiores serão estas alterações com relação aos maiores níveis de tensão observados. Estas alterações dependem, dentre inúmeros fatores, das posições relativas entres as torres e as linhas vítimas e mesmo das posições relativas entre as próprias torres devido à interação entre seus respectivos raios de atração. Concluiu-se, também, que os modelos de raio de atração influem de forma determinante nas alterações percentuais em relação ao caso base, pois deles dependem diretamente as áreas circulares em torno das posições em que se encontram as torres e, desta forma, a quantidade de descargas que passam a serem conectadas às torres ao invés do solo.

Os resultados obtidos a partir da análise das simulações computacionais poderão ser úteis para diversos setores, como por exemplo empresas distribuidoras de energia elétrica e operadoras de sistemas de telefonia fixa, pois os seus sistemas de proteção contra surtos oriundos de descargas atmosféricas indiretas poderão ser melhor avaliados frente à situações peculiares, que vêm se tornando cada vez mais freqüentes, como a implantação de torres de telefonia celular ou a construção de edifícios elevados nas proximidades de seus sistemas.

Futuramente, empregando estações de trabalho com maior capacidade de processamento, poderão ser realizadas análises de mapeamento considerando-se as distribuições estatísticas dos diversos parâmetros relacionados com as correntes de retorno presentes no canal das descargas atmosféricas, ao invés da utilização apenas de valores médios, bem como, considerando-se o aumento da probabilidade da ocorrência de descargas atmosféricas com a presença de torres e/ou objetos elevados metálicos. Além disso, poderá ser dada maior atenção ao processo de propagação das ondas eletromagnéticas no meio constituído pelos obstáculos localizados na região entre o solo e o nível definido pelo topo dos objetos elevados.

Como evolução natural da metodologia apresentada, poderão ser consideradas regiões de atração de descargas atmosféricas constituídas por diferentes geometrias, não somente geometrias circulares, além de se introduzir modelos que considerem as interações entre os sistemas de aterramento da linha aérea e dos objetos elevados próximos, bem como os efeitos de indução mútua entre os próprios objetos metálicos elevados. Além disso, a metodologia e o programa já estão parcialmente preparados para tratar linhas vítimas subterrâneas, pois as expressões para cálculo dos campos eletromagnéticos empregadas podem servir, também, a este propósito.

A conclusão deste trabalho concretiza o início de uma nova geração de softwares de simulação de descargas atmosféricas para utilização por diferentes grupos de pesquisas da área, uma vez que, em sua construção foram adotados modelos abrangentes e provenientes dos trabalhos mais recentes de forma a unificar os diversos tópicos que antes eram vistos de forma separada. A continuidade deste trabalho ocorrerá durante o período de pós-doutorado onde se planeja analisar os dados coletados nos experimentos do INPE de Cachoeira Paulista e da UFPA realizando publicações em revistas internacionais, bem como, orientando teses de mestrado e de doutorado na área.

Referências bibliográficas

[Abramowitz, 1970] M. Abramowitz and I. Stegun, "Handbook of Mathematical Functions". New York: Dover, 1970.

[Agrawal *et al.*, 1980] A. K. Agrawal, H. J. Price and S. Gurbaxani, "*Transient Response of a Multiconductor Transmission Line Excited by a Non-uniform Electromagnetic Field*", IEEE Transactions Electromag. Compat., vol. EMC-22, pp.119-129, May 1980.

[Armstrong e Whitehead, 1968] H. R. Armstrong and E. R. Whitehead, *"Field and analytical studies of transmission lines shielding"*, IEEE Transactions Power App. Syst., vol. PAS-87, pp. 270–281, Jan. 1968.

[Arnold, 1997] J. E. Arnold, "Lightning Detection from Space", NASA/MSFC, 1997.

[Baba e Ishii, 2001] Y. Baba and M. Ishii, "Numerical electromagnetic field analysis of lightning current in tall structures", IEEE Transactions on Power Delivery, 16 (2), 324-8, 2001.

[Baba et al., 2004] Y. Baba, S. Miyazaki, and M. Ishii, "*Reproduction of Lightning Electromagnetic Field Waveforms by Engineering Model of Return Stroke*", IEEE Transactions Electromagn. Compat., vol. 46, pp. 130–133, Feb. 2004.

[Baños, 1966] A. Baños Jr., "*Dipole Radiation in the Presence of a Conducting Half-Space*", Pergamon, New York, 1966.

[Beierl, 1992] O. Beierl, "Front Shape Parameters of Negative Subsequent Strokes Measured at the Peissenberg Tower", in 21st ICLP, pp. 19-24, Berlin, Germany, 1992.

[Berger, 1994] G. Berger, "*Lightning Phenomena*", III Seminário Internacional de Proteção Contra Descargas Atmosféricas, 5-9 Dezembro, São Paulo, Brasil, 1994.

[Berger *et al.*, 1975] K. Berger, R. B. Anderson, and H. Kroninger, "*Parameters of Lightning Flashes*", Electra, 41, 23-37, 1975.

[Bermudez *et al.*, 2005] J. L. Bermudez, F. Rachidi, M. Rubinstein, W. Janischewskyj, V. O. Shostak, D. Pavanello, J. S. Chang, A. M. Hussein, C. A. Nucci and M. Paolone, *"Far-Field–Current Relationship Based on the TL Model for Lightning Return Strokes to Elevated Strike Objects"*, IEEE Transactions Electromagn. Compat., vol. 47, pp. 146-159, Feb 2005.

[Bernardi *et al.*, 1996] M. Bernardi, L. Dellera, E. Garbagnati, and G. Sartorio, "*Leader progression model of lightning: Updating of the model on the basis of recent test results*", in Proc. 23rd Int. Conf. Lightning Protection, Florence, Italy, 1996, pp. 399–407.

[Bruce e Golde, 1941] C. E. R. Bruce, and R.H. Golde, *"The lightning discharge"*, Journal of the Institution of Electrical Engineers, 88 (6), 487-520, 1941.

[Caixeta e Pissolato, 1997] G. P. Caixeta and J. Pissolato Filho, *"Electromagnetic fields generated by lightning on protection structures of telecommunication centers"*, IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Austin/USA: 374—378, August 1997.

[De la Rosa *et al.*, 2000] F. De la Rosa, K. Cummins, L. Dellera, G. Diendorfer, A. Galvan, J. Huse, V. Larsen, C.A. Nucci, F. Rachidi, V. A. Rakov, H. Torres, and M.A. Uman, *"Characterization of lightning for applications in electric power systems"*, in Task force 33.01.02 - CIGRE, pp. 35, 2000.

[Dellera e Garbagnati, 1990] L. Dellera and E. Garbagnati, "*Lightning stroke simulation by means of the leader progression model*", Parts I and II," IEEE Transactions Power Delivery, vol. 5, pp. 2009–2029, Oct. 1990.

[Diendorfer e Uman, 1990] G. Diendorfer and M. A. Uman, "*An improved return stroke model with specified channel-base current*", Journal of Geophysical Research, 95 (D9), 13621-44, 1990.

[Diendorfer *et al.*, 2000] G. Diendorfer, M. Mair, W. Schulz, and W. Hadrian, "*Lightning current measurements in Austria experimental setup and first results*", in 25th ICLP (International Conference on Lightning Protection), pp. 44-47, Rhodes, Greece, 2000.

[Diendorfer *et al.*, 2002] G. Diendorfer, M. Mair, and W. Schulz, "*Detailed brightness versus lightning current amplitude correlation of flashes to the Gaisberg tower*", in 26th ICLP (International Conference on Lightning Protection), pp. 8-13, Cracow, Poland, 2002.

[Eriksson, 1987] A. J. Eriksson, "An improved electrogeometric model for transmission line shielding analysis", IEEE Transactions Power Delivery, vol. PWRD-2, pp. 871–886, July 1987.

[Fisher *et al.*, 1993] R.J. Fisher, G.H. Schnetzer, R. Thottappillil, V.A. Rakov, M.A. Uman, and J.D. Goldberg, *"Parameters of triggered-lightning flashes in Florida and Alabama"*, Journal of Geophysical Research, 98 (D12), 22887-902, 1993.

[Fuchs, 1998] F. Fuchs, "On the transient behaviour of the telecommunication tower at the mountain *Hoher Peissenberg*", in 24th ICLP (International Conference on Lightning Protection), pp. 36-41, Birmingham, U.K., 1998.

[Gary, 1995] C. Gary, "La foudre: Des mythologies antiques à la recherche moderne", MASSSON, Paris, France, 1995.

[Golde, 1945] R. H. Golde, "*The frequency of occurrence and the distribution of lightning flashes to transmission lines*", AIEE Transactions, vol. 64, pp. 902–910, 1945.

[Golde, 1977] R.H. Golde, "Lightning", 496 pp., Academic Press, London, 1977.

[Gomes e Cooray, 2000] C. Gomes, and V. Cooray, "*Concepts of lightning return stroke models*", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 42 (1), 82-96, 2000.

[Goshima *et al.*, 2000] H. Goshima, A. Asakawa, T. Shindo, H. Motoyama, A. Wada, and S. Yokoyama, *"Characteristics of electromagnetic fields due to winter lightning stroke current to a high stack"*, Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan, Part B, 120 (1), 44-9, 2000.

[Guerrieri *et al.*, 1994] S. Guerrieri, C.A. Nucci, F. Rachidi, and M. Rubinstein, "On the influence of elevated strike objects on the lightning return stroke current and the distant electric field", in International Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 38-43, Rome, Italy, 1994.

[Guerrieri *et al.*, 1996] S. Guerrieri, F. Heidler, C.A. Nucci, F. Rachidi, and M. Rubinstein, "*Extension of two return stroke models to consider the influence of elevated strike objects on the lightning return stroke current and the radiated electromagnetic field: comparison with experimental results", in EMC '96 (International Symposium on Electromagnetic Compatibility), pp. 701-6, Rome, Italy, 1996.*

[Guerrieri *et al.*, 1998] S. Guerrieri, C.A. Nucci, F. Rachidi, and M. Rubinstein, "On the influence of elevated strike objects on directly measured and indirectly estimated lightning currents", IEEE Transactions on Power Delivery, 13 (4), 1543-55, 1998.

[Guerrieri et al., 2000] S. Guerrieri, E.P. Krider, and C.A. Nucci, "Effects of Traveling-Waves of Current on the Initial Response of a Tall Franklin Rod", in ICLP2000, pp. 94-99, Rhode, Greece, 2000.

[Hanselman e Littlefield, 1998] D. Hanselman and B. Littlefield, "*Mastering Matlab 5: a comprehensive tutorial and reference*", Prentice Hall, 1998.

[Heidler, 1985a] F. Heidler, "*Traveling current source model for LEMP calculation*", in 6th Symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility, pp. 157-62, Zurich, Switzerland, 1985a.

[Heidler, 1985b] F. Heidler, "Analytische Blitzstromfunktion zur LEMP-Berechnung", in 18th ICLP (International Conference on Lightning Protection), pp. 63-66, Munich, Germany, 1985b.

[Heidler, 1987] F. Heidler, "Lightning electromagnetic impulse. Theorie und messungen", thesis dissertation, Fakultät der Elektrotechnik, Univer. Der Bundeswehr, München, 1987.

[Heidler *et al.*, 2001] F. Heidler, J. Wiesinger, and W. Zischank, "*Lightning Currents Measured at a Telecommunication Tower from 1992 to 1998*", in 14th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 6, Zurich, Switzerland, 2001.

[Hussein *et al.*, 1995] A.M. Hussein, W. Janischewskyj, J.S. Chang, V. Shostak, W.A. Chisholm, P. Dzurevych, and Z.I. Kawasaki, *"Simultaneous measurement of lightning parameters for strokes to the Toronto Canadian National Tower"*, Journal of Geophysical Research, 100 (D5), 8853-61, 1995.

[Hussein *et al.*, 2002] A. Hussein, W. Janischewskyj, M. Milewski, V. Shostak, J. S. Chang, and W.A. Chisholm, *"Return stroke current waveform parameters of lightning to the CN Tower (1992-2001)"*, in 26th ICLP (International Conference on Lightning Protection), pp. 161-166, Cracow, Poland, 2002.

[Idone e Orville, 1985] V.P. Idone, and R.E. Orville, "Correlated peak relative light intensity and peak current in triggered lightning subsequent return strokes", Journal of Geophysical Research, 90 (D4), 6159-64, 1985.

[Janischewskyj *et al.*, 1996a] W. Janischewskyj, J. S. Chang, A.M. Hussein, V. Shostak, I. Rusan, and Y. Chen, "*Parameters of CN Tower lightning during severe and non-severe thunderstorms*", in 10th International Conference on Atmospheric Electricity, Osaka, Japan, 1996a.

[Janischewskyj *et al.*, 1996b] W. Janischewskyj, V. Shostak, J. Barratt, A.M. Hussein, I. Rusan, and J.S. Chang, "*Collection and use of lightning return stroke parameters taking into account characteristics of the struck object*", in 23rd ICLP (International Conference on Lightning Protection), pp. 16-23, Florence, Italy, 1996b.

[Janischewskyj *et al.*, 1997] W. Janischewskyj, A.M. Hussein, V. Shostak, I. Rusan, J. X. Li, and J.S. Chang, *"Statistics of lightning strikes to the Toronto Canadian National Tower (1978-1995)"*, IEEE Transactions on Power Delivery, 12 (3)), 1210-1221, 1997.

[Janischewskyj et al., 1998] W. Janischewskyj, V. Shostak, and A.M. Hussein, "*Comparison of lightning electromagnetic field characteristics of first and subsequent return strokes to a tall tower 1*", Magnetic field, in 24th ICLP (International Conference on Lightning Protection), pp. 245-251, Birmingham, U.K., 1998.

[Janischewskyj *et al.*, 1999] W. Janischewskyj, V. Shostak, and A.M. Hussein, "*Lightning electric field characteristics of first and subsequent return strokes to a tall tower*", in IEE 11th International Symposium on High Voltage Engineering, pp. 270-4, London, U.K., 1999.

[Jordan *et al.*, 1992] D. M. Jordan, V.P. Idone, V. A. Rakov, M.A. Uman, W. H. Beasley, and H. Jurenka, "*Observed dart leader speed in natural and triggered lightning*", Journal of Geophysical Research, 97 (D9), 9951-7, 1992.

[King, 1982] R. W. P. King, "New formulas for the electromagnetic field of a vertical electric dipole in a dielectric or conducting half-space near its horizontal interface", J. Appl. Phys., 53, 8476-8482, 1982. (Erratum, J. Appl. Phys., 56, 3366, 1984.).

[King, 1990] R. W. P. King, "*Electromagnetic field of a vertical electric dipole over an imperfectly conducting half-space*", Radio Sci., vol. 25, pp. 149–160, Mar.–Apr. 1990.

[King e Sandler, 1994] R.W. P. King and S. S. Sandler, "*The electromagnetic field of a vertical electric dipole over the earth or sea*", IEEE Transactions Antennas Propagat., vol. 42, no. 3, pp. 382–389, Mar. 1994.

[Kordi *et al.*, 2000] B. Kordi, R. Moini, W. Janischewskyj, A.M. Hussein, and V. Shostak, *"Application of the Antenna Theory Model for Determination of the CN Tower Lightning Return Stroke Current"*, in 25th ICLP (International Conference on Lightning Protection), pp. 109-112, Rhodes, Greece, 2000.

[Liao et al., 1984] Z. P. Liao, H. L. Wong, B.-P. Yang, and Y.-F. Yuan, "A transmitting boundary for transient wave analysis", Science Sinica, vol. A27, no. 10, pp. 1063–1076, 1984.

[Lin *et al.*, 1979] Y. T. Lin, M. A. Uman, J. A. Tiller, R. D. Brantley, W. H. Beasley, E. P. Krider, and C. D. Weidman, "*Characterization of lightning return stroke electric and magnetic fields from simultaneous two-station measurements*", J. Geophys. Res., vol. 84, no. C10, pp. 6307–6314, 1979.

[Little, 1978] P. F. Little, "*Transmission line representation of a lightning return stroke*", Journal of Physics D, 11 (13), 1893-910, 1978.

[Love, 1973] E. R. Love, "Improvements on Lightning Stroke Modeling and Applications to the Design of EHV and UHV Transmission Lines", M.Sc. thesis, Univ. Colorado, Denver, CO, 1973.

[Moini *et al.*, 2000] R. Moini, B. Kordi, G. Z. Rafi, and V. A. Rakov, "*A new lightning return stroke model based on antenna theory*", Journal of Geophysical Research, 105 (D24), 29693-702, 2000.

[Montandon e Beyeler, 1994] E. Montandon, and B. Beyeler, "*The Lightning Measuring Equipment* on the Swiss PTT Telecommunications Tower at St. Chrischona, Switzerland", in 22nd ICLP (International Conference on Lightning Protection), pp. 6, Budapest, Hungary, 1994.

[Motoyama *et al.*, 1996] H. Motoyama, W. Janischewskyj, A.M. Hussein, R. Rusan, W. A. Chisholm, and J. S. Chang, *"Electromagnetic field radiation model for lightning strokes to tall structures"*, IEEE Transactions on Power Delivery, 11 (3), 1624-32, 1996.

[Narita et al., 2000] T. Narita, T. Yamada, A. Mochizuki, E. Zaima, and M. Ishii, "Observation of current wave shapes of lightning strokes on transmission towers", IEEE Transactions on Power Delivery, 15 (1), 429-35, 2000.

[Norton, 1936] K. A. Norton, "*The propagation of radio waves over the surface of earth and in the upper atmosphere*", Proc. IRE, 24, 1367-1387,1936.

[Norton, 1941] K. A. Norton, "*The calculations of ground-wave field intensity over a finitely conducting spherical earth*", Proc. IRE, 29, 623-639, 1941.

[Nucci, 1995] C. Nucci, "Lightning-induced voltages on overhead power lines", in Electra, pp. 74-102, 1995.

[Nucci e Rachidi, 1989] C.A. Nucci, and F. Rachidi, "*Experimental Validation of a Modification to the Transmission Line Model for LEMP Calculations*", in 8th International Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 6, Zurich, Switzerland, 1989.

[Nucci e Rachidi, 1995] C. A. Nucci and F. Rachidi, "On the Contribution of the Electromagnetic Field Components in Field-to-Transmission Line Interaction", IEEE Transactions on EMC, vol 37, No 4, November 1995.

[Nucci *et al.*, 1988] C.A. Nucci, C. Mazzetti, F. Rachidi, and M. Ianoz, "*On lightning return stroke models for LEMP calculations*", in 19th International Conference on Lightning Protection, pp. 463-9, Graz, Austria, 1988.

[Nucci et al., 1990] C. Nucci, G. Diendorfer, M. Uman, F. Rachidi, M. Ianoz, and C. Mazzetti, "Lightning return stroke current models with specified channel-base current: a review and comparison", Journal of Geophysical Research, 95 (D12), 20395-408, 1990.

[Nucci et al., 2004] A. Borghetti, C. A. Nucci and M. Paolone, "Estimation of the Statistical Distributions of Lightning Current Parameters at Ground Level From the Data Recorded by Instrumented Towers", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 19, No. 3, July 2004.

[Oliveira, 2001] T. A. S. Oliveira, "Cálculo de Tensão Induzida por Descarga Atmosférica em Linhas Aéreas de Energia e Cabos Telefônicos: uma Abordagem pela Teoria de Circuitos", Tese de Doutorado, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica da UFMG, 2001.

[Oppenheim e Schafer, 1975] A. V. Oppenheim and R. W. Schafer, "*Digital Signal Processing*", Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1975.

[Peled e Liu, 1976] A. Peled, and B. Liu, "Digital Signal Processing". New York: Willey, 1976.

[Plooster, 1970] M.N. Plooster, "Shock waves from line sources. Numerical solutions and experimental measurements", Physics of Fluids, 13 (11), 2665-75, 1970.

[Price e Pierce, 1972] G. H. Price and E. T. Pierce, *"The modeling of channel current in the lightning return stroke"*, Radio Science, 12 (3), 381-8, 1972.

[Rachidi, 1993] F. Rachidi "Formulation of the Field-to-Transmission Line Coupling Equations in Terms of Magnetic Excitation Field", IEEE Transactions Electromag. Compat., vol 35, No 3, pp 404-407, 1993.

[Rachidi e Nucci, 1990] F. Rachidi and C.A. Nucci, "On the Master, Uman, Lin, Standler and the Modified Transmission Line lightning return stroke current models", Journal of Geophysical Research, 95 (D12), 20389-94, 1990.

[Rachidi e Thottappillil, 1993] F. Rachidi and R. Thottappillil, "*Determination of lightning currents from far electromagnetic fields*", Journal of Geophysical Research, 98 (D10), 18315-20, 1993.

[Rachidi *et al.*, 1992] F. Rachidi, M. Ianoz, C.A. Nucci, and C. Mazetti, "*Modified transmission line model for LEMP calculations. Effect of the return stroke velocity decreasing and elevated strike objects on close fields*", in 9th International Conference on Atmospheric Electricity, pp. 664-667, St. Petersburg, Russia, 1992.

[Rachidi *et al.*, 1996] F. Rachidi, C. A. Nucci, M. Ianoz, C. Mazzetti, *"Influence of a lossy ground on lightning-Induced voltages on overhead lines"*, IEEE Transactions Electromag. Compat., vol. 38, No 3, Aug. 1996.

[Rachidi *et al.*, 1998] F. Rachidi, W. Janischewskyj, A.M. Hussein, C.A. Nucci, S. Guerrieri, and J. S. Chang, *"Electromagnetic fields radiated by lightning return strokes to high towers"*, in 24th ICLP (International Conference on Lightning Protection), Birmingham, UK, 1998.

[Rachidi *et al.*, 2001] F. Rachidi, W. Janischewskyj, A.M. Hussein, C.A. Nucci, S. Guerrieri, B. Kordi, and J. S. Chang, *"Current and electromagnetic field associated with lightning return strokes to tall towers"*, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 43 (3), 356-366, 2001.

[Rachidi *et al.*, 2002] F. Rachidi, J. L. Bermudez, and M. Rubinstein, "*Statistical evaluation of lightning current parameters from remote electromagnetic field measurements*", in 26th ICLP (International Conference on Lightning Protection), Cracow, Poland, 2002.

[Rakov, 1997] V. A. Rakov, *"Lightning electromagnetic fields: Modeling and measurements"*, in 12th International Zurich symposium and Technical Exhibition on electromagnetic compatibility, pp. 59-64, Zurich, Switzerland, 1997.

[Rakov, 1999] V. A. Rakov, "*Lightning Discharges Triggered Using Rocket-and-Wire Techniques*", in Recent Research Development on Geophysics, edited by R. Signpost, pp. 141-171, India, 1999.

[Rakov, 2001] V. A. Rakov, *"Transient response of a tall object to lightning"*, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 43 (4), 654-61, 2001.

[Rakov, 2002] V. A. Rakov, *"Lightning Return Stroke Modeling: Recent Developments"*, in International Conference on Grounding and Earthing - GROUND 2002, Rio de Janeiro, Brazil, 2002.
[Rakov e Baba, 2006] Y. Baba and V. A. Rakov, "Voltages Induced on an Overhead Wire by Lightning Strikes to a Nearby Tall Grounded Object", IEEE Transactions Electromag. Compat., vol. 48, pp. 212-224, Feb 2006.

[Rakov e Dulzon, 1987] V. A. Rakov and A. A. Dulzon, "*Calculated electromagnetic fields of lightning return strokes*", Tekhnicheskaya Elektrodinamika, no. 1, 87-9, 1987.

[Rakov e Uman, 1998] V. A. Rakov and M.A. Uman, "*Review and evaluation of lightning return stroke models including some aspects of their application*", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 40 (4), 403-26, 1998.

[Rakov et al., 1992] V. A. Rakov, R. Thottappillil, and M.A. Uman, "On the empirical formula of Willett et al. relating lightning return-stroke peak current and peak electric field", Journal of Geophysical Research, 97 (D11), 11527-33, 1992.

[Rakov et al., 2005] A. Shoory, R. Moini, S. H. H. Sadeghi, and V. A. Rakov, "Analysis of Lightning-Radiated Electromagnetic Fields in the Vicinity of Lossy Ground", IEEE Transactions Electromagn. Compat., vol. 47, pp. 131-145, Feb. 2005.

[Ramo *et al.*, 1984] S. Ramo, J. R. Whinnew, and T. Van Duzer, "*Fields and Waves in Communication Electronics*", New York Wiley, 2nd Edition, 1984.

[Rizk, 1990] F. A. M. Rizk, "*Modeling of transmission line exposure to direct lightning strokes*", IEEE Transactions Power Delivery, vol. 5, pp. 1983–1997, Oct. 1990.

[Rizk, 1994] F. A. M. Rizk, "Modeling of lightning incidence to tall structures", "Part I: Theory", "Part II: Application", IEEE Transactions Power Delivery, vol. 9, pp. 162–193, Jan. 1994.

[Rogowski e Steinhaus, 1912] W. Rogowski and W. Steinhaus, "Die Messung der magnetischen Spannung (Messung des Linienintegrals der magnetischen Feldstärke)", Archiv für Elektrotechnik, 1 (4), 141-150, 1912.

[Rubinstein, 1996] M. Rubinstein, "*An approximate formula for the calculation of the horizontal electric field from lightning at close, intermediate, and long ranges*", IEEE Transactions Electromagn. Compat., vol. 38, no. 3, pp. 531–535, Aug. 1996.

[Rusan *et al.*, 1996] I. Rusan, W. Janischewskyj, A.M. Hussein, and J. S. Chang, "*Comparison of measured and computed electromagnetic fields radiated from lightning strikes to the Toronto CN tower*", in 23rd ICLP (International Conference on Lightning Protection), pp. 297-303, Florence, Italy, 1996.

[Rusck, 1958] S. Rusck, "Induced Lightning Over-Voltages on Power Transmission Lines with Special Reference to the Over-Voltage protection of Low Voltage Networks", Transactions of Royal Institute of Tech., Stockholm, Sweden, No. 120, pp. 1-118, 1958.

[Santos, 2000] M. L. G. V. Santos, *"Estudo e Construção de uma Antena para Gerar Campos Eletromagnéticos Similares aos Campos Criados por uma Descarga Atmosférica"*, Tese de Doutorado, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica da UFMG, 2000.

[Shostak *et al.*, 1999a] V. Shostak, W. Janischewskyj, A.M. Hussein, J. S. Chang, and B. Kordi, *"Return-stroke current modeling of lightning striking a tall tower accounting for reflections within the growing channel and for upward-connecting discharges"*, in 11th International Conference on Atmospheric Electricity, pp. 123-6, Guntersville, U.S.A., 1999a.

[Shostak *et al.*, 1999b] V. Shostak, W. Janischewskyj, A.M. Hussein, and B. Kordi, "*Characteristics of return stroke current and electromagnetic field waveforms observed in multistroke lightning flashes to a tall tower*", in Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering, pp. 4, London, UK, 1999b.

[Shostak *et al.*, 2000] V. Shostak, W. Janischewskyj, A. Hussein, and B. Kordi, "*Electromagnetic fields of lightning strikes to a tall tower: a model that accounts for upward- connecting discharges*", in 25th ICLP (International Conference on Lightning Protection), pp. 60 - 65, Rhodes, Greece, 2000.

[Sommerfeld, 1909] A. Sommerfeld, "*Propagation of waves in wireless telegraphy*", Ann. Phys., 28, 665-736, 1909.

[Sommerfeld, 1926] A. Sommerfeld, "*Propagation of waves in wireless telegraphy*", Ann. Phys., 81, 1135-1153, 1926.

[Sommerfeld, 1935] A. Sommerfeld, "*Drahtlose Telegraphie, Chap. 23 in Die Differential und Integralgleichungen der Mechanik und Physik*", vol. 2, edited by P. Frank and R. v. Mises, F. Vieweg, Braunschweig, Germany, 1935.

[Sunde, 1940] E. D. Sunde, "Earth Conduction Effects in Transmission Systems". New York: Dover, 1968.

[Suzuki *et al.*, 1981] T. Suzuki, K. Miyake, and T. Shindo, "*Discharge path model in model test of lightning strokes to tall mast*", IEEE Transactions Power App. Syst., vol. PAS-100, pp. 3553–3562, July 1981.

[Taylor *et al.*, 1965] C. D. Taylor, R. S. Satterwhite and C.W. Harrisson, "*The Response of a Terminated Two-Wire Transmission Line Excited by a Non-uniform Electromagnetic Field*", IEEE Transactions Antennas Propagations, vol. AP-13, pp. 987-989, 1965.

[Tesche, 1992] F. M. Tesche, "Comparison of the transmission line and scattering models for computing the HEMP response of overhead cables", IEEE Transactions Electromag. Compat., vol. 34, May 1992.

[Thottappillil e Uman, 1993] R. Thottappillil and M.A. Uman, "*Comparison of lightning return-stroke models*", Journal of Geophysical Research, 98 (D12), 22903-14, 1993.

[Thottappillil *et al.*, 1997] R. Thottappillil V. Rakov and M. Uman, "*Distribution of charge along the lightning channel: relation to remote electric and magnetic fields and to return-stroke models*", Journal of Geophysical Research, 102 (D6), 6987-7006, 1997.

[Torres, 1999a] H. Torres, O. Trujillo, F. Amortegui, F. Herrera, G. Pinzon, C. Quintana, D. Gonzalez, D. Rondon, M. Salgado, and D. Avila, *"Experimental station to measure directly lightning parameters in tropical zone"*, Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering, 467 (5), 1999a.

[Torres, 1999b] H. Torres, O. Trujillo, F. Amortegui, G. Pinzon, C. Quintana, D. Gonzalez, D. Rondon, M. Salgado, and D. Avila, "*Design, construction and calibration of three devices to measure directly lightning parameters*", in Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering, London, UK, 1999b.

[Torres, 2000] H. Torres, "*Experimental station "Ilyapa" to measure directly lightning parameters in tropical zone*", "http://www.paas.unal.edu.co/investigacion/estacion.htm", 2000.

[Uman, 1984] M. A. Uman, "Lightning", Dover Publications, Inc., New York, 1984.

[Uman, 1987] M.A. Uman, "*The lightning discharge*", 377 pp., Academic Press, Inc., Florida, USA, 1987.

[Uman, 1994] M. A. Uman, "*Natural Lightning*", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 30, No 3, May/June, 1994.

[Uman e McLain, 1969] M.A. Uman and D. K. McLain, "Magnetic field of the lightning return stroke", Journal of Geophysical Research, 74 (28), 6899-910, 1969.

[Uman *et al.*, 1989] M. Rubinstein, Andrew Y. Tzeng, Martin A. Uman, Pedro J. Medelius and Ewen M. Thomson, "*An Experimental Test of a Theory of Lightning Induced Voltages on an Overhead Wire*", IEEE Transactions on Electromag. Compat., vol 31, No 4, November 1989.

[Wait e Campbell, 1953] J. R. Wait and L. L. Campebell, "*The fields of an electric dipole in a semi-infinite conducting medium*", J. Geophys. Res., 58, 21-28, 1953.

[Willet *et al.*, 1989] J.C. Willett, J.C. Bailley, V.P. Idone, A. Eybert-Berard, and L. Barret, *"Submicrosecond Intercomparison of Radiation Fields and currents in triggered Lightning Return Strokes Based on the Transmission-Line Model"*, Journal of Geophysical Research, 94 (D11), 13,275 - 13,286, 1989.

[Yokoyama *et al.*, 1990] S. Yokoyama, K. Miyake, T. Suzuki, and S. Kanao, "*Winter lightning on Japan Sea coast development of measuring system on progressing feature of lightning discharge*", IEEE Transactions on Power Delivery, 5 (3), 1418-25, 1990.

[Zago, 2004] F. Zago, "Desenvolvimento de um programa computacional visando o estudo das tensões induzidas por descargas atmosféricas", Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da UNICAMP, 2004.

[Zago *et al.*, 2004] F. Zago, J. Pissolato Filho, G. P. Caixeta e J. A. D. Rossi, "Simulations of induced voltage on a non-symmetrical transmission line inside a building with experimental results", IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Santa Clara, USA, 2004.

[Zago *et al.*, 2005] F. Zago, J. Pissolato Filho, G. P. Caixeta e H. M. Mesa, "*Analyzing induced voltages on residential electrical circuits due to lightning*", VIII International Symposium on Lightning Protection - SIPDA, São Paulo, Brasil, 2005.

[Zundl, 1994] Zundl, "Lightning current and LEMP calculations compared to measurements gained at the Peissenberg tower", in 22nd ICLP (International Conference on Lightning Protection), Budapest, Hungary, 1994.





Figura A.1: Fig. 2(a) extraída de [Rakov e Baba, 2006].







Figura A.4: Fig. 10(a) extraída de [Rakov et al., 2005].



Figura A.5: Fig. 11(a) extraída de [Rakov et al., 2005].



Figura A.6: Fig. 10(d) extraída de [Rakov et al., 2005].



Figura A.7: Fig. 3(a) extraída de [Rubinstein, 1996].



Figura A.8: Fig. 3(b) extraída de [Rubinstein, 1996].



Figura A.9: Fig. 3(c) extraída de [Rubinstein, 1996].



Figura A.10: Fig. 12 extraída de [Rachidi et al., 1996].



Figura A.11: Fig. 2(b) extraída de [Rakov e Baba, 2006].



Figura A.12: Fig. 3(b) extraída de [Rakov e Baba, 2006].



Figura A.13: Fig. 4(b) extraída de [Rakov e Baba, 2006].



Figura A.14: Fig. 7(b) extraída de [Rakov e Baba, 2006].

THE IMPACT OF URBANIZATION ON THE DISTRIBUTION OF LIGHTNING INDUCED VOLTAGES ON OVERHEAD LINES

Fernando Zago State University of Campinas - UNICAMP zago@fee.unicamp.br José Pissolato Filho State University of Campinas - UNICAMP pisso@dsce.fee.unicamp.br

Electrical and Computer Engineering Department, State University of Campinas, São Paulo, Brazil, CEP.: 13081-970, Postal Box: 6101

Abstract - Starting from a rigorous mathematical formulation for a lightning channel, as well as for the electromagnetic fields generated by them, for the case of lightning striking the ground directly or an elevated grounded object, it was possible to carry out a comparative study of the urbanization effects close to an overhead line with respect to the increase or decrease of the induced voltages and currents when nearby lightning discharges occur. These effects were analyzed using computational simulations considering variations in some parameters associated with urbanization, such as: number of elevated objects, elevated objects' average height and occupation or urbanization density.

INTRODUCTION

Some of the worst damage caused by lightning is indirect, that is, it is caused by electromagnetic fields radiated from this kind of natural phenomenon resulting in electromagnetic compatibility problems or in challenges for designers of surge protection systems and shields against these interferences.

This work considers one of these indirect effects, induced voltages on overhead lines by nearby atmospheric lightning discharges, using some of the most recent research in the area of electromagnetic fields generated by these natural phenomena. The principal purpose of this study was to use well tested expressions and methodologies to establish some relations between the urbanization, or the increase of elevated objects in the vicinity of overhead lines, and changes in the lightning induced voltage occurrence patterns. The main motivation to carry out this work was the accelerated increase in the number of telecommunication towers in the vicinity of transmission lines. Intuitively, among the specialists in this area, there is a feeling that the presence of these elevated objects could change the occurrence patterns of lightning induced voltages in overhead lines, but what are these changes and what is the real importance of them related to lightning surge protection systems? To answer these questions, the most recent research related to lightning induced voltages when the discharge strikes an elevated grounded object directly was used [1, 2].

To validate the computational program developed and the methodology suggested, comparisons with results obtained by different authors were done.

The structure of this work was divided into four stages: mathematical modeling, tests and validation of computed expressions, computational analysis of urbanization effects and conclusions.

MATHEMATICAL MODELLING

A. Lightning Current

To perform this study it was necessary to take into account two distinct situations: lightning channels connected directly to the ground and to elevated towers. A lot of research has proposed models to represent the lightning channel and current [3-9]. Based on [10], in this work the MTLL model [11] (engineering model) for the lightning channel was used, because it reproduces all important characteristics necessary to represent correctly the electromagnetic fields generated by the currents along the channel. For the undisturbed current $i_0(t)$ used in the mapping section, localized at the channel base, a sum of two Heidler functions [12], represented in (1), was used with the parameters defined in Table I [13].

$$i_0(t) = \frac{I_0}{\eta} \frac{(t/\tau_1)^n}{1 + (t/\tau_1)^n} e^{(-t/\tau_2)}$$
(1)

Where:

$$\eta = \exp\left(-\left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right)\left(n\frac{\tau_2}{\tau_1}\right)^{\frac{1}{n}}\right)$$
(2)

Table I: Current parameters

	Io1 (kA)	τ11 (μs)	τ21 (μs)	n1	Io2 (kA)	τ12 (μs)	τ22 (μs)	n2
First stroke	28	1.8	95	2	-	-	-	-
Subsequent strokes	10.7	0.25	2.5	2	6.5	2	230	2

To represent the currents along the lightning channel and along the towers (electrically tall) when it connects to them, the expressions developed in [2] were chosen, but modified to use the MTLL model, as represented here:

$$i(z,t) = (1-\rho_t) \left(1-\frac{z}{H_{tot}}\right) i_0\left(h,t-\frac{z-h}{v}\right) u\left(t-\frac{z-h}{v}\right) + (1-\rho_t) (1+\rho_t) \times \left[\sum_{n=0}^{\infty} \rho_g^{n+1} \rho_t^n i_0\left(h,t-\frac{z-h}{v}-\frac{2(n+1)h}{c}\right)\right]$$
(3a)

for $h < z < H_{tot}$ (along the lightning channel).

$$i(z,t) = (1-\rho_l) \times \sum_{n=0}^{\infty} \left[\rho_g^n \rho_l^n i_0 \left(h, t - \frac{h-z}{c} - \frac{2nh}{c} \right) u \left(t - \frac{h-z}{c} - \frac{2nh}{c} \right) + \rho_g^{n+1} \rho_l^n i_0 \left(h, t - \frac{h+z}{c} - \frac{2nh}{c} \right) u \left(t - \frac{h+z}{c} - \frac{2nh}{c} \right) \right]$$
(3b)

for $0 \le z \le h$ (along the struck object).

and when lightning directly strikes the flat ground

$$i(z,t) = \left(1 - \frac{z}{H_{tot}}\right) (1 + \rho_{ch-g}) i_0 \left(0, t - \frac{z}{v}\right) u(t)$$
(3c)

In (3), ρ_t and ρ_g are the current reflection coefficients at the top and at the bottom of the struck tower, respectively. ρ_{ch-g} is the current reflection coefficient between the ground and the lightning channel, c is the speed of light, h is the tower height, H_{tot} is the channel length and u(t) is the Heaviside function.

The current reflection coefficients are defined in (4) for upward moving waves.

$$\rho_{g} = \frac{Z_{t} - Z_{g}}{Z_{t} + Z_{g}} \quad (4a)$$

$$\rho_{t} = \frac{Z_{t} - Z_{ch}}{Z_{t} + Z_{ch}} \quad (4b)$$

$$\rho_{ch-g} = \frac{Z_{ch} - Z_{g}}{Z_{ch} + Z_{g}} \quad (4c)$$

In (4), Zg is the ground impedance, Zt is the tower characteristic impedance and Zch is the channel characteristic

impedance. Available data on typical values for these impedances are found in [1].

B. Electromagnetic fields

To obtain the electromagnetic fields generated by the lightning stroke, the channel was divided into segments small enough to assume a constant current along the length of each one. Each segment was considered a hertzian dipole and the direct and image electromagnetic fields were calculated assuming ground with finite conductivity (σ_1) as illustrated in Fig. 1.



Fig. 1 - Dipole space disposition and geometry.

The expressions used here to determine the electromagnetic fields from a dipole localized above an imperfect soil were obtained in [14], and recently similar expressions were presented in [15] adapted to the lightning channel problem. The lossy half-space problem was initially treated by Sommerfeld [16-18] and, most recently, by others [19-24]. The horizontal and vertical electric field expressions computed, for a set of small hertzian dipoles which made up the total length of the lightning channel, are reproduced in (5) and (6), respectively, and in (7) the horizontal magnetic field is shown. These components of the electric field will be used to compute the induced voltages, from the Agrawal model [25], determining the distributed voltage sources along the overhead lines.

$$E_{2\rho}(\rho, z', \omega) = \int_{0}^{L} -\frac{i\omega \mu_{0} I_{L}(z, \omega)}{2\pi k_{2}} \times \left\{ \frac{\left(\frac{\rho}{r_{1}}\right) \left(\frac{z'-d}{r_{1}}\right) \left(\frac{ik_{2}^{2}}{r_{1}} - \frac{3}{r_{1}^{2}} - \frac{3i}{k_{2} r_{1}^{3}}\right) + \frac{e^{ik_{2}r_{2}}}{2}}{\left(\frac{\rho}{r_{2}}\right) \left(\frac{z'+d}{r_{2}}\right) \left(\frac{ik_{2}^{2}}{r_{2}} - \frac{3}{r_{2}^{2}} - \frac{3i}{k_{2} r_{2}^{3}}\right) - \left(\frac{k_{2}}{k_{1}}\right) e^{ik_{2}r_{2}}}\right\} dz \qquad (5)$$

$$\left[\left(\frac{\rho}{r_{2}}\right) \left(\frac{ik_{2}^{2}}{r_{2}} - \frac{1}{r_{2}^{2}}\right) - \left(\frac{k_{2}^{3}}{k_{1}}\right) \left(\frac{\pi}{k_{2} r_{2}}\right)^{\frac{1}{2}} e^{-iP} F(P) \right] \right]$$

$$H_{2\phi}(\rho, z', \omega) = \int_{0}^{L} \frac{\omega \ \mu_{0} \ I_{L}(z, \omega)}{2\pi \ k_{2}} \times \begin{cases} \frac{e^{ik_{2}r_{1}}}{2} \left[\frac{ik_{2}^{2}}{r_{1}} - \frac{1}{r_{1}^{2}} - \frac{i}{k_{2} r_{1}^{3}} - \left(\frac{z'-d}{r_{1}} \right)^{2} \right]_{1}^{+} \\ \frac{e^{ik_{2}r_{1}}}{2} \left[\frac{ik_{2}^{2}}{r_{1}} - \frac{3}{r_{1}^{2}} - \frac{3i}{k_{2} r_{1}^{3}} \right]_{1}^{+} \\ \frac{e^{ik_{2}r_{2}}}{2} \left[\frac{ik_{2}^{2}}{r_{2}} - \frac{1}{r_{2}^{2}} - \frac{i}{k_{2} r_{2}^{3}} - \frac{i}{k_{2} r_{2}^{3}} - \frac{3i}{k_{2} r_{2}^{3}} \right]_{1}^{+} \\ - e^{ik_{2}r_{2}} \left[\frac{ik_{2}^{2}}{r_{2}} - \frac{1}{r_{2}^{2}} - \frac{3}{k_{2} r_{2}^{3}} - \frac{3i}{k_{2} r_{2}^{3}} \right]_{1}^{+} \\ - e^{ik_{2}r_{2}} \left[\frac{k_{2}^{3}}{k_{1}} \left(\frac{z'+d}{r_{2}} \right)^{2} \left(\frac{ik_{2}}{r_{2}} - \frac{3}{r_{2}^{2}} - \frac{3i}{k_{2} r_{2}^{3}} \right) \right]_{1}^{+} \\ - e^{ik_{2}r_{2}} \left[\frac{k_{2}^{3}}{k_{1}} \left(\frac{\pi}{r_{2}} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-iP} F(P) \right]_{1}^{+} \\ \end{cases}$$

In (5)-(7) I_L is the current present at each dipole, *L* is the total length of the lightning channel, μ_0 is the air magnetic permeability, d is the dipole height and ω is the angular frequency. The parameters r_1 , r_2 , k_1 , k_2 , P and F(P) defined in [23] are reproduced as follows:

$$r_1 = \left[\rho^2 + (z' - d)^2\right]^{\frac{1}{2}}$$
(8)

$$r_{2} = \left[\rho^{2} + (z'+d)^{2}\right]^{\frac{1}{2}}$$
(9)

$$k_1 = \beta_1 + i\alpha_1 = \omega \left[\mu_0 \left(\varepsilon_1 + i \frac{\sigma_1}{\omega} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$
(10)

$$k_2 = \omega \left(\mu_0 \,\varepsilon_0 \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{\omega}{c} \tag{11}$$

$$P = \frac{i k_2^{3} r_2}{2 k_1^{2}} \left(\frac{k_2 r_2 + k_1 (z'+d)}{k_2 \rho} \right)^2$$
(12)

$$F(P) = \int_{P}^{\infty} \frac{e^{it}}{(2\pi t)^{\frac{1}{2}}} dt = \frac{1}{2}(1+i) - C_2(P) - iS_2(P)$$
(13)

where $C_2(P)$ and $S_2(P)$ are, respectively, the Fresnel cosine and sine integrals of the complex argument [26]. The expressions (5)-(7) are valid under condition (14).

$$|k_1^2| \gg |k_2^2|$$
 or $|k_1| \ge 3 |k_2|$ (14)

In (10) and (11) ε_1 and ε_0 are the soil and air dielectric permeability, respectively, c is the speed of light and σ_1 the ground conductivity.

The lightning current I_L used in the excitation of (5)-(7) was obtained using an appropriate FFT (Fast Fourier Transform) algorithm and the expressions shown in (3).

According to [15] the expression to calculate the horizontal electric field presented by [27] and modified in [28], called the Cooray-Rubinstein formula, is just a simplification or a particular case of (5), which becomes inappropriate when far distances and propagation over a poorly conducting ground are considered.

C. Electromagnetic coupling

To model the electromagnetic coupling between the victim transmission lines, and the electromagnetic fields, which illuminate them and originate from nearby lightning discharges, Agrawal's coupling model [25] was used.

For convenience and to take into account victim lines with frequency dependent parameters localized above a soil with finite conductivity, Agrawal's model in the frequency domain was implemented [29, 30]. The electric diagram model adopted is represented in Fig. 2.



Fig. 2 - Agrawal's electric diagram.

The expressions that define the diagram in Fig. 2 are:

$$\frac{\partial V^{s}(z)}{\partial z} + Z'I(z) = E_{z}^{e}(z,h)$$
(15)

$$\frac{\partial I(z)}{\partial z} + Y'V^s(z) = 0 \tag{16}$$

$$V(z) = V^{s}(z) - \int_{0}^{h} E_{x}^{e}(x, z) dx$$
(17)

In (15)-(17) V is the total line voltage in the frequency domain, V^s is the scattered line voltage in the frequency domain, I is the line current in the frequency domain, E_z^e is the horizontal component along the wire of the excited electric field, E_x^e is the vertical component of the excited electric field, Z' is the longitudinal per-unit-length line impedance, Y' is the transverse per-unit-length line admittance and h is the line height.

Using an adequate IFFT (Inverse Fast Fourier Transform) algorithm it was possible to visualize the induced voltage waveforms in the time domain. More appropriate discussions about how to take into account the parameters Z' and Y', when we are interested in lightning induced voltages, are found in [30].

D. Induced voltage mapping

The study of the urbanization effects on the occurrence patterns of lightning induced voltages in overhead lines was carried out taking into account the regions defined by the attractive radius [31-37] of each elevated object or tower localized near a victim line.

A base case where there are not any towers near the victim line is defined and every analysis is relative to this case. So, it is possible to analyze different urbanization landscapes relative to the base case considering that there are differences between induced voltages generated by lightning channels connected to towers and to the ground [1].

The mapping grid external perimeter depends on what is the minimal induced voltage level of interest, i.e., the smaller the level required the greater is the area around the victim line to be analyzed.

At each point localized inside the grid a lightning channel with a specific current I is connected. The current I at the base channel is the same for all points localized inside the grid. However, the channel can strike the ground or the towers directly; connections to all points inside the towers' attractive radius (black and white crosses) are considered direct connections to that tower, as shown in Fig. 3.



Fig. 3 - Mapping grid with towers and their attractive radius (e.g., 2x∆grid).

Each grid internal point is associated with the peak induced voltage that appears on the victim line when the channel is connected at that location. All channel connections to the points represented by crosses in Fig. 3, i.e., to points situated inside the area defined by the attractive radius of each tower, generate induced voltages equivalent to the channel connections directly to that tower. All other points, not marked by crosses, represent connections directly to the ground. In this way, taking the same undisturbed current i_0 at the channel base for all mapping points and using (3a) and (3b) for connections to the towers and (3c) for connections to flat ground, it is possible to visualize just the effect of the elevated objects relative to the case base (without towers inside the grid). This will be further explained in the next sections.

VALIDATION AND PROGRAM TESTS

To validate the expressions and the models used to write the computational program and to represent the lightning induced voltages, comparisons with results published recently in [1] were made. The model used for comparison in this study is presented in Fig. 4, which shows a horizontal perfectly conducting wire of length 1200 m and radius 5 mm, at distances d = 40, 60, 100, and 200 m from a tall object of height h=100 m struck by lightning. The horizontal wire is located 10 m above ground. Each end of the wire is terminated in a 498 Ω matching resistor. The conductivity, relative permittivity, and relative permeability of the ground are set to $\sigma = 10$ mS/m, $\varepsilon r = 10$, and $\mu r = 1$, respectively.

We start with perhaps the most realistic situation in which v=c/3, the current reflection coefficient at the bottom of the object is $\rho_g=1$ (Z_t is usually much larger than Z_g), and the current reflection coefficient at the top of the tall object is $\rho_t=-0.5$ [1].



Fig. 4 - Victim line and elevated object struck by lightning.

The current along the lightning channel ($H_{tot}=2.6$ km) is shown in Fig. 5 and is the same used in [1]; obtained using (18) with parameters defined in Table II.

$$i_{0}(t) = \frac{I_{01}}{\eta} \frac{(t/\tau_{1})^{n}}{1 + (t/\tau_{1})^{n}} e^{(-t/\tau_{2})} + I_{02} \left(e^{(-t/\tau_{3})} - e^{(-t/\tau_{4})} \right)$$
(18)

Table II: Current parameters											
	Io1	τ1	τ2	n	Io2	τ3	τ4	η			
	(kA)	(µs)	(µs)		(kA)	(µs)	(µs)				
Subsequent strokes	9.9	0.072	5	2	7.5	100	6.5	0.845			

For each ΔL simulated induced voltages such as these obtained in Fig. 6 are shown and the results concur with those reported in [1] except for ΔL = 40 m, because there is zero crossing in the waveform obtained using our methodology. This probably occurs because here Agrawal's model is used in the electromagnetic coupling model instead of FDTD technique with working volume surrounded by six planes of Liao's second-order absorbing boundary used in [1]. To validate the induced voltages obtained when lightning directly strikes the flat ground, simulations were made with the same configuration represented in Fig. 4, but assuming h = 0 m for the tower and ρ_{ch-g} =1. The lightning current used and the induced voltages that appear on the victim line are shown in Fig. 7 and 8, respectively. For these cases, the results are again very similar to those found in [1]. It is interesting to note that the starting times in Fig. 5 and Fig. 7 are different, because for lightning initiated at the top of the tower with h = 100 m, it needs half the time to arrive at z = 200 m compared to lightning initiated at ground level.



Fig. 5 - Lightning channel current at z = 200 m (connection to tower).



Fig. 6 - Induced voltages at the center line for different distances (tower).



Fig. 7 - Lightning channel current at z = 200 m (connection to flat ground).



Fig. 8 - Induced voltages at the center line for different distances (flat ground).

URBANIZATION EFFECTS

To illustrate the mapping technique proposed to study the urbanization effects in the occurrence patterns of lightning induced voltage a horizontal perfectly conducting wire of length 600 m and radius 5 mm and tall objects of height h =100 m struck by lightning were chosen. The horizontal wire was located 10 m above ground. Each end of the wire was terminated in a 500 Ω matching resistor. The conductivity, relative permittivity, and relative permeability of the ground were set to σ = 0.04 S/m, $\varepsilon r = 8$, and $\mu r = 1$, respectively. The victim line initial and final extremities related to (X;Y) axes were located at positions (40; 101) and (160; 101) in the grid, and Δ grid = 5 m was chosen. The current applied at the lightning channel base, with v = 1.3x108 m/s, was defined by Table I and by a sum of two Heidler functions (1). For the impedances Zg, Zt and Zch the values 0 Ω , 333 Ω and 1000 Ω , were chosen respectively. All set of induced voltages, used to mapping the area around the victim line, were observed at the center line, and to calculate the towers' attractive radius the same approach, based on the electrogeometric model, presented in [31] was used, as shown in (19). However there are many controversies among specialists about what the best models are to represent adequately this physical phenomenon.

$$r = \sqrt{r_s^2 - (r_g - h)^2} \quad \text{for } h < rg \quad (19a)$$
$$r = r_s \quad \text{for } h \ge rg \quad (19b)$$

where rs and rg are the so-called striking distances to the structure and to the ground, respectively, and where h is the height of the structure. The striking distances is related to lightning current peaks I_P by means of the following equations:

$$r_{s} = \alpha I_{P}^{P}$$
(20a)
$$r_{g} = k r_{s}$$
(20b)

where the values of α , β , and k are independent of I_P.

ł

For all simulations the values for the constants $\alpha = 6.7$, $\beta = 0.8$, and k = 0.9 were used.

In Fig. 9 the induced voltage mapping for the base case is shown, i.e., for the case without any tower near the victim line and, in Fig. 10, the mapping for the hypothetic case with 95 towers at the victim line vicinity is presented. The 95 towers with h = 100 m were located at the center of each circular area that appears in the mapping when it is compared with the case without any tower (case base).





Fig. 9 - (a) Base case mapping (2-D view) and (b) Base case mapping (3-D view).

It is important to observe that the direct strikes to the victim line and the points localized along its axis were not taken into account because our principal interest is induced voltages and this brings simplification to the analysis.

Comparing the results illustrated in Figs. 9 and 10 it is possible to verify the changes that occur on the induced voltage distribution presented by the victim line analyzed, as shown in Fig. 11. In this figure, y axis represents the difference between base case and tower's case results for each induced voltage value (x axis).



Fig. 10 - (a) Towers' case mapping (2-D view) and (b) Towers' case mapping (3-D view).



Fig. 11 - Differences between the base case and the urbanized case.

It was verified that the presence of elevated objects near an overhead line can modify the occurrence patterns of lightning induced voltages and that these modifications are influenced by the number of elevated objects and by the spatial distribution of these objects relative to the victim line.

CONCLUSIONS

The lightning induced voltage mapping technique proposed in this work can contribute to the visualization of the changes that occur in the occurrence patterns of lightning induced voltages when there is an increase in the number of elevated objects near overhead lines.

The presented analysis increases the understanding of the combined behavior of lightning induced voltages and urbanization and provides novel and useful information for future studies. The results lead to the conclusion that there is a clear connection between the increase in the number of elevated objects near an overhead line and the increase in the induced voltage levels. There is also shielding effect and reduced numbers of direct strikes when the tower's attractive radius intercepts the axis of the victim line.

We hope in future to extend this methodology to take into account lightning current parameter statistical distributions and, in this way, risk analysis related to different urban landscapes will be carried out.

REFERENCES

- [1] Y. Baba, and V. Rakov, "Voltages Induced on an Overhead Wire by lightning Strikes to a Nearby Tall Grounded Object," *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*, vol. 48, pp. 212-224, Feb. 2006.
- [2] J. L. Bermudez, F. Rachidi, M. Rubinstein, W. Janischewskyj, V. O. Shostak, D. Pavanello, J. S. Chang, A. M. Hussein, C. A. Nucci and M. Paolone, "Far-Field–Current Relationship Based on the TL Model for Lightning Return Strokes to Elevated Strike Objects", *IEEE Transactions Electromagn. Compat.*, vol. 47, pp. 146-159, Feb 2005.
- [3] R. Thottappillil and M.A. Uman, "Comparison of lightning return-stroke models", Journal of Geophysical Research, 98 (D12), 22903-14, 1993.
- [4] R. Thottappillil V. Rakov and M. Uman, "Distribution of charge along the lightning channel: relation to remote electric and magnetic fields and to return-stroke models", Journal of Geophysical Research, 102 (D6), 6987-7006, 1997.
- [5] C. Nucci, "Lightning-induced voltages on overhead power lines", in *Electra*, pp. 74-102, 1995.
- [6] V. A. Rakov and M.A. Uman, "Review and evaluation of lightning return stroke models including some aspects of their application", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 40 (4), 403-26, 1998.
- [7] V. A. Rakov, "Lightning Return Stroke Modeling: Recent Developments", in *International Conference on Grounding and Earthing GROUND* 2002, Rio de Janeiro, Brazil, 2002.
- [8] C. Nucci, G. Diendorfer, M. Uman, F. Rachidi, M. Ianoz, and C. Mazzetti, "Lightning return stroke current models with specified channel-base current: a review and comparison", Journal of Geophysical Research, 95 (D12), 20395-408, 1990.
- [9] C. Gomes, and V. Cooray, "Concepts of lightning return stroke models", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 42 (1), 82-96, 2000.
- [10] Y. Baba, S. Miyazaki, and M. Ishii, "Reproduction of Lightning Electromagnetic Field Waveforms by Engineering Model of Return Stroke", *IEEE Transactions Electromagn. Compat.*, vol. 46, pp. 130–133, Feb. 2004.
- [11] V. A. Rakov and A. A. Dulzon, "Calculated electromagnetic fields of lightning return strokes", Tekhnicheskaya Elektrodinamika, no. 1, 87-9, 1987.

- [12] F. Heidler, "Analytische Blitzstromfunktion zur LEMP-Berechnung", in 18th ICLP (International Conference on Lightning Protection), pp. 63-66, Munich, Germany, 1985b.
- F. Rachidi, W. Janischewskyj, A.M. Hussein, C.A. Nucci, S. Guerrieri, B. Kordi, and J. S. Chang, "Current and electromagnetic field associated with [13] lightning return strokes to tall towers", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 43 (3), 356-366, 2001.
- [14] R. W. P. King, "Electromagnetic field of a vertical electric dipole over an imperfectly conducting half-space", Radio Sci., vol. 25, pp. 149–160, Mar.-Apr. 1990.
- [15] A. Shoory, R. Moini, S. H. H. Sadeghi, and V. A. Rakov, "Analysis of Lightning-Radiated Electromagnetic Fields in the Vicinity of Lossy Ground", IEEE Transactions Electromagn. Compat., vol. 47, pp. 131-145, Feb. 2005.
- [16] A. Sommerfeld, "Propagation of waves in wireless telegraphy", *Ann. Phys.*, 28, 665-736, 1909.
 [17] A. Sommerfeld, "Propagation of waves in wireless telegraphy", *Ann. Phys.*, 81, 1135-1153, 1926.
- [18] A. Sommerfeld, "Drahtlose Telegraphie, Chap. 23 in Die Differential und Integralgleichungen der Mechanik und Physik", vol. 2, edited by P. Frank and R. v. Mises, F. Vieweg, Braunschweig, Germany, 1935.
- [19] K. A. Norton, "The propagation of radio waves over the surface of earth and in the upper atmosphere", Proc. IRE, 24, 1367-1387,1936.
- [20] K. A. Norton, "The calculations of ground-wave field intensity over a finitely conducting spherical earth", Proc. IRE, 29, 623-639, 1941.
- [21] A. Baños Jr., "Dipole Radiation in the Presence of a Conducting Half-Space", Pergamon, New York, 1966.
- [22] J. R. Wait and L. L. Campebell, "The fields of an electric dipole in a semi-infinite conducting medium", J. Geophys. Res., 58, 21-28, 1953.
- [23] R. W. P. King, "New formulas for the electromagnetic field of a vertical electric dipole in a dielectric or conducting half-space near its horizontal interface", J. Appl. Phys., 53, 8476-8482, 1982. (Erratum, J. Appl. Phys., 56, 3366, 1984.).
- [24] R.W. P. King and S. S. Sandler, "The electromagnetic field of a vertical electric dipole over the earth or sea", IEEE Transactions Antennas Propagat., vol. 42, no. 3, pp. 382-389, Mar. 1994.
- [25] A. K. Agrawal, H. J. Price and S. Gurbaxani, "Transient Response of a Multiconductor Transmission Line Excited by a Non-uniform Electromagnetic Field", IEEE Transactions Electromag. Compat., vol. EMC-22, pp.119-129, May 1980.
- [26] M. Abramowitz and I. Stegun, "Handbook of Mathematical Functions". New York: Dover, 1970.
- [27] M. Rubinstein, "An approximate formula for the calculation of the horizontal electric field from lightning at close, intermediate, and long ranges", IEEE Transactions Electromagn. Compat., vol. 38, no. 3, pp. 531-535, Aug. 1996.
- [28] V. Cooray, "Some considerations on the Cooray-Rubinstein formulation used in deriving the horizontal electric field of lightning return strokes over finitely conducting ground," IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 44, no. 4, pp. 560-566, Nov. 2002.
- [29] F. M. Tesche, "Comparison of the transmission line and scattering models for computing the HEMP response of overhead cables", IEEE Transactions Electromag. Compat., vol. 34, May 1992.
- [30] F. Rachidi, C. A. Nucci, M. Ianoz, C. Mazzetti, "Influence of a lossy ground on lightning-Induced voltages on overhead lines", IEEE Transactions Electromag. Compat., vol. 38, No 3, Aug. 1996.
- [31] H. R. Armstrong and E. R. Whitehead, "Field and analytical studies of transmission lines shielding", IEEE Transactions Power App. Syst., vol. PAS-87, pp. 270-281, Jan. 1968.
- [32] R. H. Golde, "The frequency of occurrence and the distribution of lightning flashes to transmission lines", AIEE Transactions, vol. 64, pp. 902–910, 1945.
- [33] T. Suzuki, K. Miyake, and T. Shindo, "Discharge path model in model test of lightning strokes to tall mast", IEEE Transactions Power App. Syst., vol. PAS-100, pp. 3553-3562, July 1981.
- [34] A. J. Eriksson, "An improved electrogeometric model for transmission line shielding analysis", IEEE Transactions Power Delivery, vol. PWRD-2, pp. 871-886, July 1987.
- [35] F. A. M. Rizk, "Modeling of lightning incidence to tall structures", "Part I: Theory", "Part II: Application", IEEE Transactions Power Delivery, vol. 9, pp. 162-193, Jan. 1994.
- [36] L. Dellera and E. Garbagnati, "Lightning stroke simulation by means of the leader progression model", Parts I and II," IEEE Transactions Power Delivery, vol. 5, pp. 2009-2029, Oct. 1990.
- [37] M. Bernardi, L. Dellera, E. Garbagnati, and G. Sartorio, "Leader progression model of lightning: Updating of the model on the basis of recent test results", in Proc. 23rd Int. Conf. Lightning Protection, Florence, Italy, 1996, pp. 399-407.