



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-10549-TDI/938

**MODELAGEM MATEMÁTICA DE CORRENTES NA TORRE DA ESTAÇÃO
MORRO DO CACHIMBO (BRASIL)**

Dailton Gilberto Guedes

Tese de Doutorado do Curso da Pós-Graduação em Geofísica Espacial, orientada pelos
Drs. Osmar Pinto Júnior e Silvério Visacro Filho, aprovada em
09 de dezembro de 2003.

550.3:551.594.21 (815.1)

GUEDES, D. G.

Modelagem matemática de correntes na torre da estação morro do Cachimbo (Brasil) / D. G. Guedes. São José dos Campos: INPE, 2003.

262p. – (INPE-10549-TDI-938).

1.Descargas atmosféricas. 2.Descargas elétricas. 3.Relâmpagos. 4.Modelagem matemática. 5.Modelos. correntes. 6.Minas Gerais I. Título.

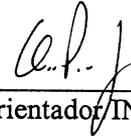
Aprovado pela Banca Examinadora em
cumprimento a requisito exigido para a
obtenção do Título de **Doutor em**
Geofísica Espacial

Dr. Delano Gobbi



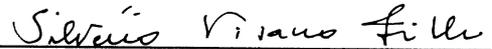
Presidente/INPE-SJCampos/SP

Dr. Osmar Pinto Junior



Orientador/INPE-SJCampos/SP

Dr. Silvério Visacro Filho



Orientador/UFGM-Belo Horizonte/MG

Dr. Paulo Prado Batista



Membro da Banca/INPE-SJCampos/SP

Dr. Polinaya Muralikrishna



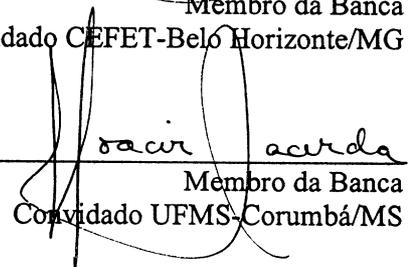
Membro da Banca/INPE-SJCampos/SP

Dr. Marco Aurélio de Oliveira Schoroeder



Membro da Banca
Convidado CEFET-Belo Horizonte/MG

Dr. Moacir Lacerda



Membro da Banca
Convidado UFMS-Corumbá/MS

Candidato (a): Dailton Gilberto Guedes

São José dos Campos, 9 de dezembro de 2003.

“No princípio criou Deus os céus e a terra. A terra, porém, estava sem forma e vazia; havia trevas sobre a face do abismo, e o espírito de Deus pairava por sobre as águas.

Disse Deus: Haja luz, e houve luz” *Gênesis 1:1-3*

AGRADECIMENTOS

Ao Dorgival (in memoriam) e a Maria, venceram com ensinamentos da vida;

Ao Dorgival Júnior, Dirley, Beatriz, Dirlene, Doriléia, Dulcinéia, Daniel, Dayse, Daywson, Dorothy e Demétrius pelo exemplo;

À Elaine pelo suporte;

À Gabrielle, Emanuelle , Carolina e Samuel, pela motivação;

Osmar e Silvério, a amizade como melhor resultado;

Thelma, Jeff e Amilcar, o primeiro crédito;

Professores do INPE, pela partilha do saber;

Alberto Adade, a fonte cristalina;

Arcélio, a paciência que supriu;

Widinei, pelas palavras de conciliação;

Evandro, o contraponto como auxílio;

Moacir, pelo caminho traçado;

Sérgio, pela retaguarda;

Maria Lúcia, pelo software digitalizador;

MCT e CNPq pelo apoio;

Amigos do grupo ELAT, pelas discussões temáticas;

Amigos do MCT, pelo ouvido;

Funcionários da DGE, Biblioteca e Pós-Graduação , sem eles tudo seria mais difícil;

A Deus, pela fidelidade.

RESUMO

Esta tese tem por objetivo modelar curvas de corrente de descarga de retorno medidas na base da torre da estação do Morro do Cachimbo (Brasil), considerando a distribuição de fontes de corrente ao longo canal do relâmpago, a injeção de corrente no canal a partir do ponto de junção, bem como a parcela de corrente transmitida à torre. Os modelos de engenharia são usados nesta tese, com o propósito de estimar as correntes de descarga registradas em um mesmo relâmpago, no topo e na base, nas torres do Morro do Cachimbo (MCS) com 60 m de altura, Monte San Salvatore na Suíça (MSS) com 70 m de altura e Monte Peissenberg na Alemanha (MPS) com 160 m de altura. Curvas de correntes reproduzidas analiticamente, coeficientes de reflexão, alturas de montagem dos sensores de corrente nas torres e diferentes alturas destas são os parâmetros considerados nos modelos. Com o objetivo de contornar a modificação nas impedâncias, consequência da alteração nos meios condutores entre canal (plasma ionizado) e torre, os cálculos foram efetuados por partes, ou seja, na base do canal acima do topo da torre, no topo da torre em um ponto inferior à base do canal e na base da torre no nível do solo. Com base nos modelos simulados e considerando apenas as torres MCS, MSS e MPS, os resultados podem ser distinguidos entre as primeiras descargas de retorno e as descargas de retorno subsequentes. Para as descargas de retorno, a posição de montagem dos sensores de corrente nas torres analisadas não interfere se as medições são feitas na base ou no topo. Quanto às descargas subsequentes, essas resultaram diferentes respostas. Nos casos em que foram aplicadas curvas de correntes hipotéticas, para as torres MCS e MSS, as correntes estimadas na base resultaram superiores às correntes no topo, numa faixa de 14% a 19% enquanto que, aplicando uma curva analítica baseada na curva média obtida na base da estação MCS, quanto estimada no topo da mesma torre, nenhuma diferença foi encontrada. Em outra simulação nas torres MCS e MPS, envolvendo uma curva de corrente padronizada e iguais coeficientes de reflexão nas duas torres, as correntes estimadas na base resultaram superiores às correntes no topo, numa faixa de 31% a 36%. Considerando que as correntes médias na MCS são superiores até 50% às correntes médias na MSS, conclui-se que os dados registrados na torre MCS fornecem médias de corrente de descarga de retorno, cujas amplitudes máximas são pelo menos, 50% superiores às obtidas em MSS. As médias de corrente de descargas subsequentes, por outro lado, apontam para uma diferença percentual numa faixa mais estreita, compreendida entre 20 e 30%.

MATHEMATICAL MODELLING OF CURRENT IN THE MORRO DO CACHIMBO STATION TOWER (BRAZIL)

ABSTRACT

The effect of an elevated strike object on the measured current in the top and the bottom of Morro do Cachimbo (MCS) station instrumented tower is modeled, considering a current divisor applied at the tower top, and that the channel current is supplied by the current source located at the attachment point. The mathematical formulations of the engineering models were applied in order to distinguish if the estimated current at the tower top or bottom is different considering the same event. The developed model for lightning striking short and long electrically towers, was applied to the Morro do Cachimbo (MCS), Mount San Salvatore (MSS) stations, and Mount Peissenberg tower (MPT). The mean return stroke current curve, computed from the experimental data acquired at the Morro do Cachimbo tower, was modeled by a Heidler Current Function and applied to the model for different wave reflection coefficients, locations of the current sensors and the tower heights. The results of modeling appear to be in accordance with a model based on the distributed current source along the lightning channel. The distribution current source model is expressed in terms of the 'undisturbed' current, object height, and current reflection coefficients at the top and the bottom of the object. It was considered the distributed-source representation of the lightning channel including a self-consistent treatment of the impedance discontinuity at the channel base and the tower top. We conclude that the location of measuring instrument on the tower (bottom or top) causes no significant differences in the first return stroke current peak. On the other hand, for the subsequent return stroke, the location of measuring instrument on the tower (bottom or top) causes differences in the estimated current peak at the tower base from 20% to 30% greater than the estimated current peak at the tower top.

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO AO TRABALHO	35
1.1 – Considerações Preliminares	35
1.2 – Definição do Problema em Foco.....	36
1.3 – Relevância da Investigação	37
1.4 – Abordagem desta Tese para Resolver o Problema	38
1.5 – Organização do Texto da Tese	38
CAPÍTULO 2 – A ESTAÇÃO DO MORRO DO CACHIMBO	43
2.1 – Objetivos	43
2.2 – Localização	43
2.3 – Instalações e Facilidades	44
2.4 – Interferência Humana em Medições Diretas	46
2.4.1 – Sensores de Corrente.....	46
2.4.1.1 – Sensores de Corrente Tipo Shunt.....	47
2.4.1.2 – Transdutores de Corrente.....	47
CAPÍTULO 3 – MODELOS DE CORRENTES DE DESCARGA DE RETORNO DE RELAMPAGOS	51
3.1 – Objetivos	51
3.2 - Classificação dos Modelos de Corrente de Descarga de Retorno de Relâmpagos.....	52
3.2.1 - Modelos Físicos ou Modelo de Dinâmica de Gás (MDG).....	53

3.2.2 - Modelos Eletromagnéticos (MEM).....	53
3.2.3 - Modelo de Circuitos Distribuídos (RLC).....	54
3.2.4 - Modelos de Engenharia (MEN).....	54
3.3 – Modelo de Lin et al. (1979).....	55
3.4 – Evidências Experimentais	56
3.5 – Modelos de Engenharia – Teoria e Aplicação	58
3.6 – Representação da Função de Corrente no Canal.....	61
3.6.1 – Modelo de Bruce e Golde (MBG)	61
3.6.2 – Modelo Linha de Transmissão (MTL)	62
3.6.3 – Modelo de Fonte de Corrente (TCS).....	62
3.6.4 – Modificações no Modelo Linha de Transmissão	63
3.6.4.1 – Modelo MTL Modificado com Decaimento Linear da Corrente com a Altura – (MTLL)	63
3.6.4.2 - Modelo MTL Modificado com Decaimento Exponencial da Corrente com a Altura – (MTLE)	64
3.6.5 – Modelo de Diendorfer e Uman (MDU)	64
3.7 – Distribuição de Carga ao Longo do Canal do Relâmpago	66
3.7.1 – Modelo MBG.....	67
3.7.2 – Modelo MTL.....	68
3.7.3 – Modelo TCS.....	69
3.7.4 – Modelo MTLL.....	70
3.7.5 – Modelo MTLE.....	71
3.7.6 – Modelo MDU.....	72
3.8 – Distribuição de Carga e de Corrente no Canal – Resumo.....	74

CAPÍTULO 4 - FUNÇÕES ANALÍTICAS DE CORRENTES DE DESCARGA

DE RETONO DE RELÂMPAGOS.....	77
4.1 – Objetivos	77
4.2 – Mecanismo de Descarga.....	77
4.2.1 – Etapas do Mecanismo de Descarga.....	77
4.2.2 - Correntes que Fluem pelo Canal Principal.....	80
4.2.2.1 - Correntes de Curta Duração.....	80
4.2.2.2. - Correntes de Longa Duração.....	81

4.2.3 – Líder Escalonado (LE).....	81
4.2.4 – Processo de Ligação.....	83
4.2.5 – O Líder nos Relâmpagos Ascendentes.....	83
4.3 – Valores Típicos de Corrente da Descarga de Retorno.....	85
4.4 – Parâmetros de Corrente da Descarga de Retorno.....	86
4.5 – Função Analítica de Corrente da Descarga de Retorno.....	87
4.5.1 – Funções Aplicadas na Modelagem de Corrente de Descarga de Relâmpago.....	87
4.5.1.1 – Expressão de Corrente de Bruce e Golde	87
4.5.1.2 – Outras Expressões de Correntes	90
4.5.2 – Função de Corrente de Heidler.....	92
4.6 - Aplicações Práticas da Função de Corrente de Heidler.....	96
4.6.1 - Aplicação 1	96
4.6.2 - Aplicação 2.....	100
4.6.3 - Aplicação 3.....	101

CAPÍTULO 5 - CRITÉRIOS METODOLÓGICOS APLICADOS NO

CÁLCULO DE CORRENTES EM TORRES.....105

5.1 – Objetivo.....	105
5.2 – Formas do Pulsos de Corrente Utilizadas para Estimar Medidas de Correntes em Torres.....	105
5.3– Curvas de Correntes Medidas em MCS.....	107
5.4 - Curvas de Correntes Medidas em MSS	109
5.5 – Parâmetros de Curvas de Correntes nas Torres MCS e MSS.....	110
5.5.1 – Estação do Morro do Cachimbo.....	110
5.5.2 – Estação do Monte San Salvatore.....	112
5.6 – Análise das Curvas de Correntes nas Estações MCS e MSS	113
5.7 – Comentários sobre os Parâmetros Obtidos nas Curvas Experimentais.....	114
5.8 – Determinações de Coeficientes de Reflexão de Ondas	115
5.8.1 – Considerações	115
5.8.2 – Espectro de Frequência	116
5.8.3 – Coeficientes de Reflexão Observados em Torres	116
5.9 – Altura Efetiva da Torre do Morro do Cachimbo	121

5.10 – Modelagem de Correntes em Torres	123
5.10.1 - Comparação entre Correntes de Relâmpagos Naturais e Medidas em Torres (Melander, 1984).....	123
5.10.1.1 – Resumo do Trabalho de Melander, (1984).....	123
5.10.1.2 – Resultados e Conclusões de Melander (1984).....	127
5.10.1.3 – Outras Considerações sobre a Influência do Corpo da Torre.....	128
5.10.2 – Modelagem de Correntes de Relâmpagos na Torre do Canadá por Shostack et al. (1999).....	128
5.10.3 – Modelagem de Correntes de Relâmpagos na Torre do Morro do Cachimbo por Schroeder, (2001).....	133

CAPÍTULO 6 - DESENVOLVIMENTO DE MODELO MATEMÁTICO PARA CÁLCULO DE CORRENTES EM TORRES.....135

6.1 – Objetivos.....	135
6.2 – Coeficientes de Reflexão de Correntes.....	136
6.3– Algoritmo para Estimar Correntes Medidas em Torres.....	138
6.3.1. – Finalidade e Aplicação do Algoritmo.....	138
6.3.2. – Sistema de Aterramento.....	140
6.3.3 – Parcelas de Correntes no Canal de Descarga	141
6.3.4 – Descrição do Processo de Reflexão da Onda no Canal.....	141
6.3.5 – Mecanismo de Transmissão e Reflexão de Onda no Canal e Torre.....	143
6.3.5.1 – Configuração do Cenários para o Cálculo de Correntes em Torres.....	143
6.3.5.2 – Coeficientes de Reflexão de Onda	145
6.3.5.3 – Processo de Reflexão de Onda na Torre	145
6.3.6 – Algoritmo para Calculo das Correntes.....	146
6.4 – Aplicação do Algoritmo no Cálculo de Correntes na Torre de Peissenberg (Alemanha) (Beierl, 1992)	147
6.4.1 – Resultados Obtidos no Topo da Torre - Cenário 1.....	148
6.4.2 – Resultados Obtidos no Topo da Torre – Cenário 2.....	149
6.4.3 – Resultados Obtidos na Base da Torre - Cenário 1.....	150
6.4.4 - Resultados Obtidos na Base da Torre – Cenário 2.....	150
6.5 – Resultados dos Cálculos de Corrente no Topo das Torres St. Chrischona e San Salvatore (Suíça) (Guerrieri et al, 1998)	152

6.5.1 – Resultados Obtidos no Topo das Torres	152
6.6 – Resultados dos Cálculos de Corrente na Base das Torres San Salvatore (Suíça) (Guedes et al. 2002)	155
6.7 – Restrições aos Modelos Guerrieri et al. e Guedes et al.....	155
6.8 – Resultados Obtidos nos Cálculos de Correntes nas Torres San Salvatore (Suíça) Com o Canal – Cenário 2	156
6.9 – Um Teste para as Equações (6.7) e (6.8).....	158

**CAPÍTULO 7 - APLICAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO NO CÁLCULO DE
CORRENTES NAS TORRES DAS ESTAÇÕES MORRO DO
CACHIMBO E MONTE SAN SALVATORE.....161**

7.1 – Objetivo.....	161
7.2 – Pulso de Corrente.....	162
7.2.1 – Descarga Subsequente.....	162
7.2.2 – Primeira Descarga de Retorno.....	162
7.3 – Cálculo das Correntes nas Torres.....	166
7.3.1 – Esquema do Conjunto Canal-Torre-Aterramento.....	166
7.3.2 – Tempos de Tráfego no Canal e Torre.....	168
7.3.3 – Coeficientes de Reflexão de Onda.....	170
7.3.4 – Processo de Reflexão de Onda no Canal e na Torre.....	170
7.4 – Resultados Obtidos Após Injeção do Pulso na Torre MCS – Cenário 2.....	171
7.4.1 - Resultados Obtidos no Cálculo da Corrente DS no topo da Torre.....	171
7.4.2 - Resultados Obtidos no Cálculo da Corrente DS na Base da Torre.....	172
7.5 – Resultados Obtidos Após Injeção do Pulso no Topo do Canal Sobre a Torre MCS	175
7.5.1 – Resultados Obtidos no Cálculo da Corrente DS na Torre MCS.....	175
7.5.2 – Resultados Obtidos no Cálculo da Corrente DR1 na Torre MCS.....	178
7.6 – Resultados Obtidos Após Injeção do Pulso no Topo do Canal Sobre a Torre MSS.....	180
7.6.1 – Resultados Obtidos no Cálculo da Corrente DS na Torre MSS.....	181
7.6.2 – Resultados Obtidos no Cálculo da Corrente DR2 nas Torres MSS.....	183
7.7 – Comentários.....	185

7.7.1 – Descargas Subsequentes – Ondas Rápidas.....	185
7.7.2 – Descargas de Retorno – Ondas Lentas.....	186

**CAPÍTULO 8 - MODELO MATEMÁTICO DE FONTES DE CORRENTES
DISTRIBUÍDAS AO LONGO DO CANAL DE RELÂMPAGOS..187**

8.1 – Objetivo.....	187
8.2 – Distribuição de Corrente ao Longo do Canal do Relâmpago.....	188
8.3 – Processo de Descarga do Canal e a Corrente de Descarga de Retorno....	189
8.4 - Fontes de Correntes Distribuídas ao Longo do Canal – Teoria.....	190
8.5 – Comentários.....	198

**CAPÍTULO 9 - APLICAÇÃO DO MODELO FONTES DISTRIBUÍDAS NO
CÁLCULO DE CORRENTES EM TORRES.....201**

9.1 – Objetivo.....	201
9.2 – Análise dos Valores Obtidos nas Simulações de Corrente nas Torres MCS e MSS.....	202
9.3 – Correntes Medidas na Torre da Estação do Morro do Cachimbo.....	204
9.3.1 – Modelagem das Curvas Médias DR e DS em MCS.....	204
9.3.2 – Simulação da Descargas Subsequentes em MCS.....	205
9.3.2.1 – Resultados da Simulação da DS em MCS.....	206
9.3.3 – Simulação das Descargas de Retorno em MCS.....	208
9.3.3.1 – Resultados da Simulação da DR em MCS.....	208
9.4 – Resultados da Simulação com a Curva da Aplicação 1	210
9.5 – Resumo.....	215

**CAPÍTULO 10 - CONCLUSÕES, COMENTÁRIOS E RECOMENDAÇÕES
PARA PRÓXIMOS TRABALHOS.....217**

10.1 – Introdução.....	217
10.2 – Desempenho dos Algoritmos Empregados no Cálculos.....	218
10.3 – Principais Resultados Obtidos.....	219
10.3.1 – Modelagem de Corrente.....	219
10.3.2 – Estrutura da Torre e Posição de Montagem dos Sensores.....	219
10.3.3 – Descargas de Retorno Subsequentes e Primeiras	

e Descargas de Retorno.....	220
10.3.4 – Simulações na Base do Canal sem a Torre e no Topo e Base da Torre no Canal.....	221
10.3.5 – Quanto à Forma e Freqüência de Onda de Corrente como Indicadores de Efeitos Transitórios.....	232
10.4 – Recomendações para Próximos Trabalhos.....	222
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	225
APÊNDICE A – COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DOS ALGORITMOS GUERRIERI ET AL. E GUEDES ET AL. COM RACHIDI ET AL.....	239
APÊNDICE B - CÁLCULO DA CORRENTE DR1 MEDIDA NA BASE DO CANAL E NA BASE E TOPO DA TORRE DO MORRO DO CACHIMBO, COM MODIFICAÇÃO DOS COEFICIENTES DE REFLEXÃO NO TOPO E NA BASE DA TORRE.....	255

LISTA DE FIGURAS

2.1 – Cabine de aquisição de dados da Estação Morro do Cachimbo.....	45
4.1 – Mecanismo de descarga (Os instantes de tempo t são em milésimos de segundos).....	80
4.2 – Esquema fora de escala, mostrando uma descarga nuvem solo: a) tempos característicos das diversas fases (DR: Descarga de retorno; LC: líder contínuo; LE: líder escalonado) registrada por câmara com o filme girando em alta velocidade; b) a mesma descarga registrada em filme estático.....	82
4.3 – Evolução temporal esquemática de um relâmpago ascendente (a) corrente de descarga de retorno; (b) forma da corrente sem escala..	85
4.4 – Descargas de retorno (DR) e subsequente (DS) calculadas pelas equações (1.1) e (1.2) – Curva de correntes de BG (1941).....	89
4.5 – Descargas de retorno (DR) e subsequente (DS) calculadas pelas equações (1.1) e (1.2) – Curva de correntes proposta por Pierce (1972).....	89
4.6 – Descargas de retorno (DR) e subsequente (DS) calculadas pela equação (1.3) – Curva de correntes proposta por Pierce e Cianos (1977).....	90
4.7 – Padronização da norma IEC61312 – 1, Nível 1 de proteção; a) Frente da curva de corrente DR; b) Derivada da curva de corrente DR; c) Decaimento da curva de corrente de DR.....	98
4.8 – Corrente da descarga subsequente no ponto de junção de acordo com a norma IEC61312 – 1, Nível 1 de proteção.....	99
4.9 – Correntes na base do canal divididas em duas componentes – I_{bd} – Pulso de corrente e I_c – Componente corona - usadas no modelo MDU. (a) Corrente 1 – Descarga subsequente; (b) Corrente 2 – Descarga de retorno.....	101
4.10 – Corrente de descarga de retorno na base do canal dividida em duas componentes – I_{bd} – Pulso de corrente e I_c – Componente corona - usadas por Nucci et al, 1990.....	103
5.1 - Curva média da corrente da primeira descarga de retorno.....	107
5.2 – Curva média experimental de descarga de retorno da estação do Morro do Cachimbo.....	108
5.3 – Curva média experimental das descargas subsequentes da estação do Morro do Cachimbo.....	109
5.4– Curva média experimental no topo da torre T1 da estação MSS. (a) – Corrente DR; (b) Corrente DS.....	110
5.5 – Curva média experimental no topo da torre T2 da estação MSS. (a) – Corrente DR; (b) Corrente DS.....	110
5.6– Curva média de corrente de descarga de retorno na base da torre da estação MCS. (a) – Frente de onda da corrente DR; (b) Decaimento da corrente DR.....	111
5.7 - Curva média de corrente de descarga de subsequente na base da torre da estação MCS. (a) – Frente de onda da corrente	

DS; (b) Decaimento da corrente DS.....	112
5.8 – Curva média de corrente de descarga de retorno da torre T1 da estação MSS. (a) – Frente de onda da corrente DR; (b) Decaimento da corrente DR.....	113
5.9 – Curva média experimental de corrente de descarga de retorno da torre T2 da estação MSS. (a) – Frente de onda da corrente DR; (b) Decaimento da corrente DR.....	113
5.10 – Curvas de corrente das descargas de retorno e subsequente do Evento 02/02/1999.....	130
5.11 - Curvas de corrente das descargas de retorno e subsequente do Evento 09/08/1998.....	130
6.1 – Esquema simplificado de um relâmpago negativo descendente.....	139
6.2 – Circuito equivalente NORTON de um relâmpago negativo descendente em torre aterrada. A onda de corrente se propaga na direção descendente, num tempo em que a corrente ainda não atingiu o solo.....	140
6.3 – Diagrama esquemático simplificado do mecanismo transmissão e reflexão de onda no canal e torre – Cenário 2.....	144
6.4 – Curva de corrente injetada na torre Peissenberg.....	148
6.5 – Efeito das reflexões entre a base e o topo da torre, na corrente injetada no topo e estimada no topo – Cenário 1.....	149
6.6 – Efeito das reflexões entre a base e o topo da torre, na corrente injetada no topo e estimada no topo – Cenário 2.....	150
6.7 – Efeito das reflexões entre a base e o topo da torre, na corrente injetada no topo e estimada na base – Cenário 1.....	150
6.8 – Efeito das reflexões entre a base e o topo da torre, na corrente injetada no topo e estimada na base – Cenário 2.....	151
6.9 – Pulso de corrente idealizado por Guerrieri et al (1998); (a) Corrente; (b) Derivada temporal.....	153
6.10 - Efeitos das reflexões entre a base e o topo na torre St Chrischona, corrente injetada no topo e estimada no topo – Cenário 1.....	154
6.11 - Efeitos das reflexões entre a base e o topo na torre San Salvatore, corrente injetada no topo e estimada no topo – Cenário 1.....	154
6.12 – Efeitos das reflexões entre a base e o topo na torre San Salvatore, corrente injetada no topo e estimada na base – Cenário 1.....	155
6.13 – Efeitos das reflexões entre a base e o topo na torre San Salvatore, corrente injetada no topo e estimada no topo – Cenário 2.....	157
6.14 – Efeitos das reflexões entre a base e o topo na torre San Salvatore, corrente injetada no topo e estimada na base – Cenário 2.....	158
7.1 – Descarga subsequente DS, a) Pulso de Corrente; b) Derivada.....	164
7.2 – Descarga subsequente DR1, a) Pulso de Corrente; b) Derivada.....	165
7.3 – Descarga subsequente DR2, a) Pulso de Corrente; b) Derivada.....	166
7.4 – Esquema de medição da corrente no canal no topo da torre.....	168
7.5 – Efeito das reflexões entre a base e topo da torre para corrente	

injetada no topo e estimada no topo da torre – Cenário 2.....	172
7.6 – Efeito das reflexões entre a base e topo da torre, na corrente injetada no topo da torre e estimada na base.. – Cenário 2.....	173
7.7 – Histogramas de distribuição de valores de pico das correntes de descarga de retorno de relâmpagos negativos descendentes medidos na MCS.....	174
7.8 – Representação em seqüência das parcelas de corrente e onda no canal, calculadas na base do canal.....	176
7.9 – Representação da parcela de corrente e onda refletida na torre vista no topo desta e calculada no topo torre.....	177
7.10 – Representação das parcelas de corrente e onda na torre, e corrente total estimada na base da torre.....	177
7.11 – Representação em seqüência, das parcelas de corrente DR1 no canal, calculadas na base do canal.....	179
7.12 – Representação da parcela de corrente e onda refletida na torre vista no topo desta e calculada no topo da torre.....	179
7.13 – Representação das parcelas de corrente e onda na torre e corrente total estimada na base da torre.....	180
7.14 - Representação em seqüência, das parcelas de corrente e onda calculadas na base do canal.....	181
7.15 - Representação da parcela de corrente e onda refletida na torre, calculadas no topo da torre.....	182
7.16 – Representação das parcelas de corrente e onda na torre e corrente estimada na base da torre.....	182
7.17 – Representação em seqüência das parcelas de corrente e onda calculadas na base do canal.....	183
7.18 – Representação da parcela de corrente e onda refletida na torre calculada no topo torre.....	184
7.19 – Representação das parcelas de corrente e onda na torre e corrente total estimada na base da torre.....	185
8.1 – Diagrama esquemático da representação do canal do relâmpago no modelo de engenharia de descarga de retorno de um relâmpago negativo ascendente, com a inclusão da torre e as reflexões de onda no topo e na base.....	194
9.1 – Curva analítica da corrente média de descarga de retorno da estação do Morro do Cachimbo sobreposta à curva média experimental.....	204
9.2 – Curva analítica da corrente média de descarga subsequente da estação do Morro do Cachimbo sobreposta à curva média experimental.....	205
9.3 – Descargas Subseqüentes – MCS - correntes medidas na base e no topo da torre e na base do canal.....	207
9.4 – Descargas de Retorno – MCS - correntes estimadas na base e no topo da torre e na base do canal.....	209
9.5 – Descargas de Retorno e Subseqüentes – MCS - correntes estimadas na base e no topo da torre.....	211
9.6 – Descargas de Retorno e Subseqüentes – TP - correntes	

estimadas na base e no topo da torre.....	212
9.7 – Descargas de Retorno e Subseqüentes – correntes estimadas na base do canal.....	213
A1 – Corrente medida na base de uma torre de 70 m de altura calculada pelo modelo Guedes et al.....	246
A2 – Corrente medida na base de uma torre de 70 m de altura calculada pelo modelo Rachidi et al.....	247
A3 – Corrente medida no topo de uma torre de 70 m de altura Calculada pelo modelo Guerrieri et al.....	248
A4 – Corrente medida no topo de uma torre de 70 m de altura calculada pelo modelo Rachidi et al.....	249
A5 – Corrente medida na base de uma torre de 500 m de altura calculada pelo modelo Guedes et al.....	250
A6 – Corrente medida na base de uma torre de 500 m de altura calculada pelo modelo Rachidi et al.....	251
A7 – Corrente medida no topo de uma torre de 500 m de altura calculada pelo modelo Guerrieri et al.....	252
A8 – Corrente medida no topo de uma torre de 500 m de altura calculada pelo modelo Rachidi et al.....	253
B1 - Caso 2 - Corrente injetada no topo do canal e medida na base do Canal.....	256
B2 – Caso 2 - Corrente transmitida à torre e medida no topo da torre após 5 reflexões.....	256
B3 – Caso 2 - Corrente transmitida à torre e medida na base da torre após 5 reflexões.....	256
B4 – Caso 3 - Corrente injetada no topo do canal e medida na base do canal.....	257
B5 – Caso 3 - Corrente transmitida à torre e medida no topo da torre após 5 reflexões.....	257
B6 – Caso 3 - Corrente transmitida à torre e medida na base da torre após 5 reflexões	257
B7 – Caso4 - Corrente injetada no topo do canal e medida na base do canal.....	258
B8 – Caso 4 - Corrente transmitida à torre e medida no topo da torre após 5 reflexões.....	258
B9 – Caso 4 - Corrente transmitida à torre e medida na base da torre após 5 reflexões.....	258
B10 – Caso 5 - Corrente injetada no topo do canal e medida na base do Canal.....	259
B 11 – Caso 5 - Corrente transmitida à torre e medida no topo da torre após 5 reflexões.....	259
B12 – Caso 5 - Corrente transmitida à torre e medida na base da torre após 5 reflexões.....	259
B13 – Caso 6 - Corrente injetada no topo do canal e medida na base do canal.....	260

B14 – Caso 6 - Corrente transmitida à torre e medida no topo da torre após 5 reflexões.....	260
B15 – Caso 6 - Corrente transmitida à torre e medida na base da torre após 5 reflexões.....	260
B16 - Caso 7 - Corrente injetada no topo do canal e medida na base do Canal.....	261
B17 – Caso 7 - Corrente transmitida à torre e medida no topo da torre após 5 reflexões.....	261
B18 – Caso 7 - Corrente transmitida à torre e medida na base da torre após 5 reflexões.....	261
B19 – Caso 8 - Corrente injetada no topo do canal e medida na base no solo ideal sem a torre após 5 reflexões.....	262
B20 – Caso 9 - Corrente injetada no topo do canal e medida na base no solo real sem a torre após 5 reflexões.....	262

LISTA DE TABELAS

3.1 – Velocidade de Deslocamento da Frente de Pulso de Corrente Obtidas por Observação Ótica do Canal.....	58
3.2 - Fator de Atenuação e Velocidade de Deslocamento da Onda para Modelos de Engenharia.....	60
3.3 - Modelos “Fonte Fixa” de Corrente ($t \geq z'/v_f$).....	75
3.4 - Modelos “Fonte Móvel” de Corrente ($T \geq Z'/V_f$).....	75
4.1 - Valores Típicos de Parâmetros de Corrente.....	86
4.2 - Valores Propostos para as Constantes Bruce E Golde (BG), Pierce (P) e Pierce e Cianos (PC).....	89
4.3- Parâmetros Aplicados na Equação (4.8) que Originaram as Correntes de Descarga de Retorno e Subseqüente Padronizadas pela IEC.....	97
4.4 - Parâmetros Característicos de Corrente Calculada pela Equação (4.8).....	97
4.5 - Parâmetros Utilizados por Diendorfer e Uman (1990).....	100
4.6 - Parâmetros Utilizados por Nucci et al (1990).....	102
5.1 - Parâmetros característicos de corrente obtidos das curvas médias de descarga de retorno e subseqüente da estação do morro do cachimbo.....	111
5.2 - Parâmetros Característicos Obtidos nas Curvas Médias de correntes da Estação Monte San Salvatore – Torres T1 E T2.....	112
5.3 - Coeficiente de Reflexão na Base da Torre do Morro do Cachimbo em Regime Permanente.....	119
5.4- Parâmetros de Corrente em Função dos Fatores de Normalização....	126
5.5– Fatores de Normalização em Função da Resistência do Solo.....	127
5.6 – Parâmetros das curvas médias de descarga de retorno e subseqüente na torre CN – modelos MTL e MTLE.....	132
6.1 - Parâmetros Aplicados na Equação (4.8) que Originaram a Corrente de Descarga de Retorno no Topo da Torre Peissenberg.....	148
6.2 – Parâmetros das Duas Parcelas de Corrente que Reproduzem a Corrente Injetada no Topo da Torre.....	153
7.1 – Parâmetros Aplicados na Equação (4.8) que Originaram as Correntes de Descarga de Retorno e Subsequente no Topo do Canal.....	163
8.1 – Parâmetros Aplicados na Equação (4.8) que Originaram a Corrente de Descarga de Retorno no Topo da Torre Peissenberg....	194
9.1 – Correntes Calculadas nas Torres MCS e MSS	202
9.2 – Parâmetros Característicos de Corrente Obtidos das Curvas Médias de Descarga de Retorno e Subseqüente da Estação do Morro do Cachimbo.....	204
9.3 – Parâmetros Aplicados na Equação (4.8) que Originaram as Correntes de Descarga de Retorno e Subseqüente Estação do Morro do Cachimbo.....	205
9.4 – Resultados nas Torres MCS e MPS.....	215

B.1 –Coeficientes de Reflexão no Canal e na Torre e as Correntes	
Medidas na Base do Canal e na Base e Topo da Torre.....	255

LISTA DE SÍMBOLOS

σ – Condutividade elétrica.

α - Inverso da constante de tempo de subida da frente de onda.

β - Inverso da constante de tempo de decaimento da cauda da onda.

ζ - Inverso da constante de tempo de velocidade.

γ - Inverso da constante de tempo de ajuste da frente de onda.

δ - Inverso da constante de tempo de ajuste de decaimento de onda.

τ - Símbolo geral de constante de tempo ou variável auxiliar temporal.

$\tau\alpha$ - Constante de tempo de subida da frente de onda.

$\tau\beta$ - Constante de tempo de decaimento da cauda da onda.

$\tau\gamma$ - Constante de tempo de subida de frente da onda.

$\tau\delta$ - Constante de tempo de decaimento da cauda da onda.

ρ - Densidade de carga elétrica no canal.

λ - Constante de decaimento da corrente com a altura.

∞ - Símbolo numérico de conjunto infinito.

π - Constante matemática igual a 3,1416.

ε_0 – Constante de permissividade dielétrica no vácuo.

τ_D - Constante de tempo de descarga.

Δ - Símbolo de intervalo infinitesimal espacial ou temporal.

η - Fator de correção da corrente de pico.

n - Fator que considera o grau de derivada da corrente.

v - Símbolo geral de velocidade escalar linear.

i - Símbolo geral de corrente instantânea.

t - Símbolo geral de variável temporal.

ρ_{tb} – Coeficiente de reflexão da onda na base da torre.

ρ_{tt} – Coeficiente de reflexão da onda no topo da torre.

ρ_{cb} – Coeficiente de reflexão da onda na base do canal.

ρ_{ct} – Coeficiente de reflexão da onda no topo do canal.

a_1 - Inverso da constante de tempo da frente da onda (adotado por Shostak et al.)

a_2 - Inverso da constante de tempo de decaimento da cauda da onda (adotado por Shostak et al.)

μ - Constante de permissividade magnética num meio ou relativa.

ε - Constante de permissividade dielétrica num meio ou relativa.

ψ - Impedância intrínseca de onda em um meio.

ρ^b - Coeficiente de reflexão no plano de interface.

T^b - Coeficientes de transmissão ou refração no plano de interface.

β_f - Constante de fase da onda em um determinado meio.

μ_0 - Constante de permissividade magnética no vácuo.

τ_T – Tempo que a onda leva para percorrer o corpo de um objeto (tempo de tráfego na torre).

τ_{ch} – Tempo que a onda leva para percorrer o canal do relâmpago (tempo de tráfego no canal).

λ_w – Comprimento de onda.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

E_z – Campo elétrico na direção vertical.

B_ϕ - Campo magnético azimutal.

M – Dipolo magnético.

c - Velocidade da luz no vácuo (300×10^6 m/s).

r - Variável auxiliar vetorial espacial.

D – Distância horizontal no nível do solo entre o canal e o observador.

z - Coordenada vertical.

E – Símbolo geral de campo elétrico.

u - Função de Heaviside ou função degrau unitário.

P – Fator de atenuação espacial da corrente com a altura.

H - Distância vertical entre um ponto do canal do relâmpago e o solo.

Q_0 - Carga transferida para o solo pela descarga de retorno.

T_{01} - Tempo de frente de onda ou tempo que a corrente atinge o valor de pico.

T_{02} - Tempo de decaimento a 50% do valor de pico.

I_{0max} - Corrente de pico.

q_0 - Carga elétrica.

A_0 - Energia dissipada específica.

I_{BD} – Pulso de corrente que quebra a rigidez dielétrica do ar.

I_C – Componente da corrente corona.

h - Altura de um objeto.

T_r – Tempo que uma onda de corrente leva para chegar ao valor máximo.

Z_{ch} - Impedância do canal do relâmpago.

Z_T - Impedância do objeto percorrido pela corrente do relâmpago.

Z_g - Impedância do solo onde o objeto está aterrado.

R_B – Resistência elétrica na base de um objeto.

R_E – Resistência elétrica no topo de um objeto.

T_{10} – Tempo que frente de onda leva para atingir 10% do valor de pico.

T_{30} – Tempo que frente de onda leva para atingir 30% do valor de pico.

h_s – Altura efetiva de um objeto.

h_{SRC} - Altura de montagem do segundo sensor na torre do Canadá.

h_{FRC} - Altura de montagem do primeiro sensor na torre do Canadá.

f – Frequência da onda.

I_B – Corrente descendente na torre.

X – Reatância elétrica.

MDG - Modelos Físicos ou Modelo de Dinâmica de Gás.

MEM - Modelos Eletromagnéticos.

RLC - Modelo dos Circuitos Distribuídos.

R – Resistência elétrica.

L – Indutância elétrica.

C – Capacitância elétrica.

MEN - Modelos de Engenharia.

CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais.

MSS - Estação do Monte San Salvatore.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

MCS - Estação de pesquisa de relâmpagos do Morro do Cachimbo.

T1 – Torre número 1 da estação MSS.

T2 - Torre número 2 da estação MSS.

RF – Rádio frequência ou faixa de transmissão de sinal com frequência de rádio.

NEERI - National Electric Engineering Research.

U – Tensão elétrica.

TF - Tempo de frente de onda adotado por Bruce e Golde, (1941).

TH – Tempo de decaimento de onda a 50% do valor de pico, adotado por Bruce e Golde, (1941).

v_f - Velocidade da frente de onda de descarga de retorno do relâmpago.
 v_0 – Velocidade máxima ou de pico da onda de descarga de retorno.
 I – Corrente elétrica.
 I_0 – Valor máximo ou de pico da corrente de descarga de retorno.
BG – Modelo de Bruce e Golde.
DR – Corrente de descarga de retorno do relâmpago.
DS – Corrente de descarga subsequente do relâmpago.
TL ou MTL – Modelo de Linha de Transmissão de Uman e McLain.
TCS - Modelo de fonte de corrente móvel de Heidler.
MTLL – Modelo de linha de transmissão modificado com decaimento linear da corrente com a altura do canal.
MTLE - Modelo de linha de transmissão modificado com decaimento exponencial da corrente com a altura do canal.
MDU - Modelo de fonte de corrente de Diendorfer e Uman.
MULS – Modelo de corrente de Máster et al.
LUS – Modelo de corrente de Lin et al.
exp - Função exponencial neperiana.
FH – Função analítica de corrente proposta por Heidler, (1985).
LE – Líder escalonado no canal do relâmpago.
LA – Líder ascendente no canal do relâmpago.
LC – Líder contínuo no canal do relâmpago.
EO – Transdutores eletro-óticos.
OE – Transdutores ótico-elétricos.
CN – Torre de pesquisa de relâmpagos instalada no Canadá.
FRC – Primeira bobina de Rogowski instalada na torre CN.
SRC – Segunda bobina de Rogowski instalada na CN.
TEM – Modo de propagação de onda eletromagnética.
 P_u – Percentagem de relâmpagos descendentes.
 p_u – Valor por unidade.
 h_s – Altura efetiva da torre.
 \ln – Logaritmo neperiano.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO AO TRABALHO

1.1 – Considerações Preliminares

A maior parte dos parâmetros das correntes de descargas atmosféricas adotados atualmente como referência nos estudos científicos e avaliações de proteção contra os efeitos do fenômeno foi obtida a partir dos dados de medições realizadas em torres “instrumentadas”.

Tais torres são usualmente posicionadas em estações de pesquisa e incluem dispositivos de medição capazes de registrar a corrente de descarga quando de sua eventual incidência na torre. Dependendo da estação, os sensores de corrente podem estar posicionados na base ou no topo da torre. Além desses sensores, as estações são muito comumente providas de outros recursos para aquisição de dados sobre relâmpagos, tais como câmeras de vídeo especiais e câmeras fotográficas de alta velocidade, medidores de campos elétrico e magnético. Os principais instrumentos registradores existentes nas estações são os osciloscópios, que gravam as formas de onda das correntes das primeiras descargas de retorno (DR) e das descargas subseqüentes (DS). Os instrumentos provêm tais dados que são gravados para posterior tratamento.

No Brasil, o início das medições de correntes de descarga em torres coincide com a implantação da Estação de Pesquisa do Morro do Cachimbo (MCS). A estação, com uma torre de 60 m de altura, localizada a 15 km de Belo Horizonte, Minas Gerais, foi instalada por Centrais Energéticas de Minas Gerais (CEMIG) e atualmente pertence ao Lightning Research Center (LRC), centro de pesquisa constituído a partir de cooperação entre a CEMIG e a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Esta é a única estação de medição existente no Brasil. Na estação MCS, os dados são obtidos por medições efetuadas na base da torre.

Antes do início de operação da MCS no Brasil, Berger (1967, 1975) realizara uma pesquisa pioneira em torres, na Estação do Monte San Salvatore (MSS), na

Suíça. Os resultados obtidos por Berger constituem, até hoje, um marco e uma referência para qualquer estudo sobre relâmpagos. As primeiras medições efetuadas por Berger remontam a 1943. Diferentemente da estação MCS, na estação MSS a aquisição de dados de corrente era feita no topo da torre.

1.2 – Definição do Problema em Foco

As medições realizadas na estação de MCS (Triginelle et al. 1995), no Brasil, mostram que o valor médio (e mediano) da amplitude máxima das correntes é bem superior ao valor correspondente às medidas realizadas em outras torres localizadas em outras partes do mundo (Suíça, África do Sul, Itália, Alemanha, Japão e Canadá).

Entre os anos de 1985 e 1998, os relâmpagos negativos registrados em MCS apresentaram primeiro pico de corrente média de 42500 A. Já, entre os anos de 1941 e 1972, os relâmpagos negativos em MSS apresentaram corrente de pico média abaixo de 30.000 A. A diferença entre as médias dos valores de pico nas duas estações tem sido motivo de investigação (por exemplo, Lacerda, 1998 e Schoroeder, 2001). Embora, alguns pesquisadores justifiquem o valor superior das correntes medidas no Brasil a partir do fato do canal do relâmpago ser mais longo em baixas latitudes (em decorrência da usual altura superior do centro de cargas negativas nas nuvens de tempestade), outros pesquisadores sugerem que a diferença no valor médio da amplitude de corrente decorreria tão somente do fato da medição ser efetuada na base da torre.

O efeito da torre nos resultados de medição é abordado em diversos trabalhos da literatura técnica. Ao ser atingida por um raio, a torre fica sujeita a transitórios eletromagnéticos, que são tão mais significativos quanto menor for o tempo de frente da onda de corrente incidente.

Esta tese tem seu foco na avaliação do efeito da torre e do posicionamento dos sensores de corrente ao longo desta, para fins de dirimir as dúvidas com relação à diferença nos valores médios de corrente medidos no Brasil e em outros países. Para tal, realiza-se uma verificação do comportamento da torre de MCS

frente às correntes de descarga de retorno de relâmpagos negativos e como esta altera a amplitude da onda medida.

1.3 - Relevância da Investigação

A definição da amplitude representativa das correntes de descargas negativas dos relâmpagos é de fundamental interesse para a engenharia de proteção e, também, para a caracterização científica do fenómeno descarga atmosférica.

A intensidade da solicitação eletromagnética resultante em isolamentos de sistemas elétricos e eletrônicos, em equipamentos e seres vivos, decorrentes da incidência direta de descarga sobre a vítima ou da incidência de uma descarga próxima, está diretamente associada à amplitude da corrente da descarga e à taxa de crescimento da frente de onda da corrente (di/dt_{\max}).

Por conseguinte, a diferença da ordem de quase 50% (em excesso) no valor médio da crista de corrente medida em MCS em relação a outras referências internacionais tem um impacto muito significativo nas definições de proteção de sistemas elétricos, eletrônicos e equipamentos e, também, no nível de risco à segurança. O custo adicional decorrente do dimensionamento dos isolamentos dos sistemas e equipamentos para conferir suportabilidade às sobretensões associadas a descargas atmosféricas, nesta condição, seria muito elevado. Igualmente, as práticas de proteção deveriam ser muito mais elaboradas.

Estes fatores conferem à pesquisa científica de descargas atmosféricas a necessária relevância, que por seu turno dá o impulso para que respostas sejam tão intensamente procuradas em todas as áreas pesquisadas. A oportunidade de usar os dados adquiridos na MCS para reverter em conhecimentos que possam interferir, para melhor, na vida e no quotidiano é a motivação maior.

A contribuição original desta tese está centrada na aplicação de modelos de engenharia para avaliar se as correntes medidas na base da torre MCS seriam as mesmas se estas fossem medidas no topo da torre.

1.4 – Abordagem Desta Tese para Resolver o Problema.

Em síntese, esta tese é dedicada a uma questão fundamental, prover resposta à pergunta: “As descargas atmosféricas no Brasil possuem correntes mais elevadas do que as descargas atmosféricas registradas na Suíça?”

Para alcançar tal objetivo, a investigação efetuada começa por fazer uma revisão bibliográfica na qual os mais importantes modelos de correntes são classificados. Os modelos são formulados para o canal de descarga de relâmpagos e para as correntes de descarga de retorno dos relâmpagos. Somente os modelos de correntes são abordados nesta tese definindo como esses podem auxiliar na análise das medições feitas na torre do Morro do Cachimbo. A avaliação das medições na base da torre, sujeitas ou não, aos efeitos de transitórios eletromagnéticos visa estimar as correntes que seriam medidas no topo da torre MCS. Para tanto, simplificações para reproduzir o processo físico em análise são consideradas, mesmo havendo a possibilidade de acarretarem um distanciamento da realidade física do problema, conferindo aos resultados, uma confiabilidade que é inversamente proporcional ao nível de simplificações adotado. São utilizados cálculos matemáticos baseados nos modelos de correntes que reproduzem as condições de estabelecimento de corrente de descarga de retorno no canal, visando reproduzir o comportamento espacial e temporal da corrente.

Em resumo, o estudo será feito a partir da simulação de correntes em três cenários que podem ser descritos como: a) Cenário 1 - Injeção de corrente na torre sem canal; b) Cenário 2 - Injeção de corrente na torre com canal até a base da nuvem; c) Cenário 3 – Deslocamento do ponto de Injeção de corrente para o ponto de junção, suposto localizado a 300 m sobre a torre.

1.5 – Organização do Texto da Tese.

Para obter resultados que possam prover resposta à questão colocada, esta Tese foi organizada em 10 capítulos.

Seguindo esta abordagem introdutória, Capítulo 1 – Introdução ao Trabalho, faz as considerações preliminares situando o problema a ser focado e levantando a relevância do assunto.

No Capítulo 2 – A Estação do Morro do Cachimbo é sumariamente apresentada, visto que os dados processados são provenientes da torre lá instalada. Em seqüência, uma análise é feita sobre as técnicas de medição direta de corrente.

No Capítulo 3 – Modelos de Correntes de Descarga de Retorno de Relâmpagos, é feita a revisão bibliográfica classificando os modelos que representam a variação da corrente no canal de descarga. Seis dos mais conhecidos na classe “modelo de engenharia” são detalhados e dentre estes, um é selecionado para ser aplicado na Tese.

No Capítulo 4 – Funções Analíticas de Correntes de Descarga de Retorno de Relâmpagos, as funções matemáticas que se propõem reproduzirem a forma de onda das correntes na base do canal do relâmpago são analisadas e a partir da análise, uma função de corrente é escolhida para ser aplicada ao modelo selecionado.

No Capítulo 5 – Critérios Metodológicos para Aplicação no Cálculo de Correntes em Torres, são avaliados vários parâmetros necessários ao desempenho do modelo de corrente. Complementando a revisão bibliográfica, três técnicas de modelagem de corrente em torres são revistas.

No Capítulo 6 – Desenvolvimento do Modelo Matemático para o Cálculo de Correntes em Torres, um algoritmo é construído para calcular correntes na base da torre partindo de um algoritmo antes aplicado no cálculo de correntes no topo. Simulações são feitas em cenários configurados para situar as condições de cálculo em relação à situação real.

No Capítulo 7 – Aplicação do Modelo Matemático no Cálculo de Correntes nas Torres das Estações Morro do Cachimbo e Monte San Salvatore, as simulações

evoluem para cenários que gradualmente buscam representar uma situação mais próxima da real.

No Capítulo 8 – Modelo Matemático de Fontes de Correntes Distribuídas ao Longo do Canal de Relâmpagos, um modelo mais completo de corrente de descarga de retorno é analisado e, em seguida, é aplicado na avaliação do comportamento da corrente ao longo da torre.

No Capítulo 9 – Aplicação do Modelo Fontes de Correntes Distribuídas no Cálculo de Correntes em Torres, o modelo em questão é aplicado às curvas de correntes modeladas para a torre MCS. O objetivo é analisar o comportamento das curvas de correntes em simulações no canal sem a torre e, na inclusão desta, em simulações de correntes na base e no topo da torre.

No Capítulo 10 – Conclusões, Comentários e Recomendações para Próximos Trabalhos, os resultados são sistematizados, numa descrição que procura aproximar aqueles que guardam alguma identidade entre si ou que se complementam. Alguns comentários considerados relevantes são feitos e sugestões para a continuação desta pesquisa são relacionadas.

Constam ainda do texto, em sua parte final, dois APÊNDICES:

O Apêndice A – Comparação entre os Resultados dos algoritmos de Guerrieri et al. e Guedes et al. com Rachidi et al. (2002), faz um rápido balanço da performance dos algoritmos e das técnicas construídas comparando aos resultados do modelo do Rachidi et al. que foi publicado em dezembro de 2002.

No Apêndice B – Cálculo da Corrente DR1 Medida na Base do Canal e na base e Topo da Torre do Morro do Cachimbo, com Modificação dos Coeficientes de Reflexão no Topo e na Base da Torre, são simulados vários casos na torre de MCS, usando a mesma curva e o Cenário 3, mas alternando vários diferentes pares de coeficientes de reflexão no topo e na base da torre. Os resultados são mostrados para cada caso simulado.

Finalmente as Referências Bibliográficas trazem a relação dos trabalhos que de forma direta influenciaram os destinos desta pesquisa e que servem a consultas adicionais e para subsidiar no aprofundamento do tema pesquisado.

CAPÍTULO 2

A ESTAÇÃO DO MORRO DO CACHIMBO

2.1 – Objetivo

Este capítulo apresenta, de forma simplificada, uma descrição das instalações da Estação do Morro do Cachimbo e a técnica utilizada para aquisição de dados de corrente das descargas atmosféricas em torres. Descrição mais detalhada das instalações, bem como, do princípio de operação da estação, foram apresentados por Lacerda (1998), que analisou as curvas de corrente registradas e apresentou a estatística dos dados adquiridos na estação, entre novembro de 1985 e fevereiro de 1994. A atualização dos registros relacionados com as ondas de corrente de descargas atmosféricas, medidas na estação do Morro do Cachimbo entre 1985 e 1998 e uma caracterização estatística dos principais parâmetros associados às ondas de corrente, incluindo sua forma, foram apresentados por Schroeder (2001). Schroeder et al. (2001) apresentaram o projeto de modernização da estação MCS, cujas principais melhorias incorporam a substituição dos cabos coaxiais por fibra ótica, objetivando a aquisição de dados de corrente contínua capaz de registrar a forma de onda, amplitude e tempo de duração destas componentes.

2.2 - Localização

A Estação de Pesquisa do Morro do Cachimbo (MCS), localiza-se a aproximadamente 15 km de Belo Horizonte, Minas Gerais, a $43^{\circ} 58' 26''$ W de longitude e $20^{\circ} 00' 39''$ S de latitude. A estação foi montada pela Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG e entrou em operação em 1985 (CEMIG, 1985). Atualmente, a estação pertence ao Lightning Research Center – LRC, centro de pesquisa constituído a partir de cooperação entre a CEMIG e a Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG.

2.3 – Instalações e Facilidades

A estação MCS está equipada para adquirir informações sobre:

- a) atividade de descargas atmosféricas;
- b) campo elétrico atmosférico;
- c) registros fotográficos com máquinas fotográficas comuns, e filmagens com câmera de vídeo dos relâmpagos que atingem a torre;
- d) forma de onda e frente do pulso da corrente de descarga de retorno.
- e) registro de valores de pico das correntes através de elos magnéticos.

A estação possui uma torre metálica de 60 m de altura, construída em forma de um prisma, instalada no topo de um morro de 1400 m de altitude, estando aproximadamente 200 m mais elevada que qualquer outro ponto da região circunvizinha.

Duas estações remotas de vídeo e fotografia próximas à estação registram imagens das descargas na torre em ângulo de 90°.

Na base da torre está instalada uma cabine metálica de abrigo dos sensores de corrente, descritos na seção 2.4.1.2, mostrados na Figura 2.1.



FIGURA 2.1 – Cabine de aquisição de dados da Estação Morro do Cachimbo.

2.4 – Interferência Humana em Medições Diretas

O conhecimento dos parâmetros de corrente das descargas de retorno de relâmpagos, tais como valor de pico da corrente, taxa de crescimento e tempos de subida da frente de onda e de decaimento na cauda, para chegar a 50% do valor de pico, são de importância primordial para o desenvolvimento de projetos e da coordenação de proteção e de isolamento de sistemas de potência. Hoje, muito deste conhecimento é proveniente de medidas diretas usando torres instrumentadas ou relâmpagos induzidos por foguetes. Parâmetros de correntes de relâmpagos podem também ser obtidos através de medições de campos eletromagnéticos irradiados, assumindo uma ou mais relações empíricas ou teóricas entre campos irradiados e correntes de descarga de retorno dos relâmpagos.

Os instrumentos de aquisição de dados em torres podem ser posicionados na base ou no topo. As torres em operação na Alemanha e no Canadá, duas das mais importantes fontes de aquisição de dados de relâmpagos em torres em operação, possuem sensores instalados nas estruturas das torres em diversas alturas. As torres do Monte de San Salvatore na Suíça, ambas fora de operação desde 1972, ao contrário, só mediam no topo, enquanto a torre do Morro do Cachimbo, atualmente em operação, só mede correntes na base.

2.4.1 – Sensores de Corrente

Os sensores de corrente são dispositivos, tais como resistores shunt, transdutores e transformadores de corrente, instalados nas torres para registrar dados das descargas atmosféricas que diretamente atingem as torres. Interligados aos sensores por meio de cabos condutores especiais estão os instrumentos de registro e armazenagem de dados, instalados na casa de instrumentos. A interligação entre os sensores e instrumentos de registro, quando feita por links de fibras óticas e transdutores elétrico/ótics e ótics/elétricos, permite registrar os dados sem interferência eletromagnética. Na

estação do Morro do Cachimbo, a interligação atualmente é feita por cabos triaxiais blindados e isolados.

2.4.1.1 – Sensores de Corrente Tipo Shunt

Os sensores de corrente tipo shunt são aqueles em que a corrente é medida pela diferença de potencial entre os terminais dos resistores que compõem o shunt. Berger (1967) usou resistores shunt primeiro na base e depois nos topos das duas torres de MSS.

O resistor shunt é empregado na aquisição direta de dados de corrente e se constitui um caminho paralelo e de menor resistência para o fluxo de corrente entre a haste captora, no topo da torre, e o sistema de aterramento. Na primeira torre instalada por Berger na estação MSS, construída em madeira, os resistores shunt eram posicionados na base da torre, próximos da sala de medições. Quando esta torre de madeira foi substituída por uma torre metálica de transmissão de TV (Torre T1), Berger optou por colocar os resistores shunt em uma plataforma localizada a 60 metros de altura, próximo da haste captora, solução adotada anteriormente, quando a segunda torre fora instalada (Torre T2). Berger registrou em 28 anos de pesquisa, aproximadamente 1598 relâmpagos (Guedes, 2001).

2.4.1.2 – Transdutores de Corrente

Transdutores de corrente são dispositivos que registram a amplitude de tensão do sinal de entrada e relacionam linearmente esse sinal com a amplitude de corrente nos terminais de saída, numa razão de volts por ampères. O circuito primário desse transdutor é constituído por uma bobina com núcleo toroidal de baixa reatância, por cujo centro passa o condutor primário. O circuito secundário é o transdutor propriamente dito, que faz a relação volts por ampères do sinal primário com o de saída.

A estação do Morro do Cachimbo foi construída sob a orientação de A. J. Eriksson (CEMIG, 1985; NEERI, 1985).

A torre é equipada com sistema de aquisição de corrente com base em dois transdutores (Pearson Electronics Current Monitor) com diferentes relações de saída que permitem registrar correntes nas faixas de 20 kA e 200 kA, posicionados em dois circuitos independentes (veja Figura 2.1). A corrente de descarga percorre o corpo da torre até um abrigo na base da torre, onde se encontram os transdutores e acessórios, escoando para o sistema de aterramento. A faixa até 20 kA é provida por um transdutor cuja relação de saída é 25 V/kA, ligado em série com um resistor de 0,5 Ω em paralelo com esta associação série, encontra-se duas placas condutoras afastadas de 0,5 mm. A faixa máxima (de 20kA a 200kA) é provida por um transdutor com um sinal de saída com relação 5 V/kA, ligado em série a este conjunto.

A casa de instrumentos é constituída por duas salas, uma que abriga o banco de baterias que supre energia continuamente aos instrumentos de medição e outra sala que abriga os equipamentos de serviços auxiliares constituídos por um retificador / carregador que mantêm as baterias carregadas em regime de flutuação de carga, um inversor (220 V – 60 Hz) e os instrumentos de medição e controle, sendo:

- a) registrador gráfico de 6 canais para registro em tempo real das descargas em um círculo de 5 km ou 20 km de raio, acionamento da estação em baixa velocidade, acionamento da estação no modo acelerado, registro da variação do campo elétrico e data e hora da ocorrência das descargas na torre.
- b) sistema de aquisição de dados formado por 2 osciloscópios digitais com memória de pré-disparo, 1 unidade de disparo externo, 1 registrador de tempo entre as descargas subseqüentes e 1 microcomputador HP com periféricos.

Os sinais registrados nos sensores são conduzidos à sala de instrumentos de registro de dados por meio de cabos coaxiais que são ligados aos registradores de forma de onda (osciloscópios). Os dados correspondentes às curvas de correntes são em seguida armazenados em um computador.

Todos os instrumentos abrigados são aterrados em um único ponto para evitar gradientes de potencial capazes de interferir nos registros de dados. Todos os instrumentos possuem no entanto, blindagem eletromagnética para proteger os circuitos eletrônicos contra transientes provocados pela propagação de campos eletromagnéticos produzidos pelas correntes de descarga.

CAPÍTULO 3

MODELOS DE CORRENTES DE DESCARGA DE RETORNO DE RELÂMPAGOS

3.1 – Objetivos

O objetivo deste capítulo é descrever os modelos que representam o comportamento da corrente de descarga de retorno no canal de descarga. Um modelo é caracterizado pelas equações que o identificam e neste contexto se apresenta uma classificação de modelos de acordo com as suas equações básicas.

A seguir são definidos os seguintes termos usados nesta Tese: “modelo”, “função analítica” e “algoritmo”.

Modelo é uma representação gráfica do estabelecimento do canal de descarga pelo líder ou da expressão matemática da corrente de descarga de retorno no nível do solo. Alguns modelos procuram representar a corrente no canal de descarga em função do tempo e espaço, enquanto outros modelos procuram reproduzir o canal de descarga em função de variáveis termodinâmicas, com equações específicas em cada um dos casos. Os modelos de engenharia são formulados com base em uma função de corrente construída empiricamente.

Função analítica é uma expressão matemática utilizada para reproduzir a forma da curva da corrente no canal.

Algoritmo é um conjunto de operações matemáticas, logicamente concatenadas, resultado do desenvolvimento de um modelo com uma função analítica de corrente e sob certas condições assumidas para descrever o comportamento da corrente no canal. O algoritmo é desenvolvido para uma situação específica e guarda as características do modelo que o originou.

Dada a complexidade do fenômeno físico que se quer representar, qual seja, o estabelecimento da corrente de descarga de retorno no canal de descarga e de

sua variação no tempo e no espaço, qualquer tipo de modelo conjugado a uma função de corrente, adota simplificações que resultam em erros mais ou menos grosseiros, que devem ser levados em consideração na análise final.

3.2 - Classificação dos Modelos de Corrente de Descarga de Retorno de Relâmpagos

O processo de estabelecimento da corrente de descarga de retorno no canal de descarga é complexo. A compreensão deste processo e a sua necessária representação no modelo, requer portanto, que as condições de funcionamento e suas necessárias simplificações sejam claramente definidas.

A seguir são mostradas algumas das considerações e usuais simplificações assumidas no desenvolvimento dos modelos de corrente de descarga de retorno:

- ❖ O campo elétrico criado pelas cargas armazenadas no canal do relâmpago é vertical (E_z) e o campo magnético decorrente da movimentação das cargas do canal é azimutal (B_ϕ), na superfície do solo.
- ❖ O canal é considerado verticalmente perpendicular ao nível do solo e possui uma altura total “H”.
- ❖ O solo possui condutividade infinita ($\sigma \rightarrow \infty$) e é perfeitamente plano.
- ❖ O observador posiciona-se a uma distância horizontal “D” do ponto onde o relâmpago atinge o solo ou a uma altura z ao longo do canal, opção a ser escolhida de acordo com a abordagem a ser feita.
- ❖ Em um trecho diferencial do canal, com comprimento elementar “dz” a uma determinada altura “z” acima do solo, um termo elementar de corrente $di(z,t)$ percorre o canal, produzindo campos elementares, dE_z e dB_ϕ . A corrente total no canal é a integração deste termo elementar de corrente no tempo e no espaço, com limites apropriados.
- ❖ A distância entre o observador e o trecho elementar dz é “R”.

Os modelos podem ser agrupados em classes, distinguidos preliminarmente, pelo tipo de equação que caracteriza cada um (Rakov, 1998).

As quatro classes de modelos são os Modelos de Dinâmica de Gás, ou Modelo Físico, Modelo Eletromagnético, Modelo de Circuitos Distribuídos e os Modelos de Engenharia.

3.2.1 - Modelos Físicos ou Modelo de Dinâmica de Gás (MDG)

Os modelos físicos descritos a partir de parâmetros termodinâmicos do canal, tais como temperatura, pressão e densidade de massa, constituem a primeira classe de modelos. Nesses modelos, o canal é tratado como uma coluna de gás (plasma) confinada em uma geometria cilíndrica, submetido a leis de conservação (massa, momento e energia) acopladas a duas equações de estado, por onde flui uma corrente elétrica $I(t)$ num meio resistivo. Os MDG usam também ondas de choque. Estas ondas só se manifestam a centímetros da linha de centro do canal. Os principais resultados deste modelo incluem a temperatura e pressão dentro do canal e a densidade de massa como função de coordenadas radiais e temporais. Como desvantagens destes modelos, pode-se citar a não consideração da evolução longitudinal do canal do relâmpago além de ignorar o efeito superficial do campo magnético, o envelope corona e o aquecimento do ar próximo do canal.

3.2.2 - Modelos Eletromagnéticos (MEM)

Os modelos eletromagnéticos, usualmente desenvolvidos considerando meios reais de propagação das correntes, tomando como ponto de partida a aproximação do canal a uma antena reta e vertical constituída por um fino fio condutor, constituem a segunda classe de modelos. Estes modelos partem da solução das equações de Maxwell para determinar a distribuição de carga elétrica e de corrente ao longo do canal de onde os campos eletromagnéticos podem ser calculados.

3.2.3 - Modelo de Circuitos Distribuídos (RLC)

A terceira classe de modelos agrupa os modelos parecidos com os eletromagnéticos por serem uma aproximação destes. Mas eles podem ser vistos como um modelo de uma linha de transmissão com circuitos RLC distribuídos, representando a descarga de um relâmpago como um processo transiente em uma linha de transmissão vertical caracterizada pela sua resistência (R), indutância (L) e capacitância (C), todos representados por unidade de comprimento. Estes modelos podem ser usados para determinar a corrente no canal como função do tempo e da altura e usados para calcular os campos elétrico e magnético remotos. Este modelo pode incorporar resultados da aplicação o modelo MDG utilizado para se determinar a resistência do canal como função do tempo.

3.2.4 - Modelos de Engenharia (MEN)

A quarta classe de modelos agrupa os modelos de engenharia. Neste modelo a distribuição espacial e temporal da corrente ou da densidade de carga do canal é arbitrada com base em observações das características da corrente da descarga de retorno na base do canal, na velocidade de propagação ascendente da frente de onda e no comportamento da luminosidade do canal. Nestes modelos, a física da descarga de retorno do relâmpago assume menor importância, sendo substituída por uma técnica que busca a concordância entre os valores encontrados teoricamente para os campos eletromagnéticos e aqueles medidos a distâncias que variam de dezenas a centenas de quilômetros do ponto de descarga do relâmpago. Os modelos de engenharia possuem importante característica que é o pequeno número de parâmetros empregados nos cálculos além da corrente na base do canal que pode ser estimada ou medida. Os modelos MEN partem de situações muito simplificadas e de resultados obtidos em medições experimentais. Estes modelos podem ser combinados com os modelos eletromagnéticos para se determinar a distribuição de corrente no canal e a forma de propagação do campo eletromagnético.

Pela sua eficiência e simplicidade, os Modelos de Engenharia são escolhidos para as simulações de corrente nesta tese. Seis modelos de engenharia são analisados: o Modelo de Bruce e Golde MBG (Bruce e Golde, 1941); o modelo de Fonte de Corrente Móvel TCS (Heidler, 1985); o modelo Linha de Transmissão MTL (Uman e MacLain, 1969); modificação do MTL, introduzindo a variação linear da corrente com a altura, MTLL (Rakov e Dulzon, 1987); modificação do MTL, introduzindo a variação exponencial da corrente com a altura, MTLE (Nucci et al. 1990) e o modelo MDU (Diendorfer e Uman, 1988). O modelo de engenharia de Lin et al. (1979) não é aplicado nesta tese, apesar disso, a base do modelo é resumida a seguir, tendo em vista a importância dos conceitos utilizados na sua formulação e dos resultados previstos.

3.3 –Modelo de Lin et al. (1979)

Lin et al. (1979) fizeram medidas simultâneas de campos elétrico e magnético em duas situações, uma próxima do canal e outra distante. Com base nos resultados, que forneceram formas típicas das curvas de campos, Lin et al. propuseram um modelo de descarga de retorno designado como modelo LUS, onde a corrente do canal é a resultante da contribuição de três componentes, estimadas separadamente:

- 1) Uma componente de corrente na forma de pulso, responsável pela quebra da rigidez dielétrica do ar no canal. Este pulso ascendente representa a frente da onda que percorre o canal com a velocidade da descarga de retorno. Esta velocidade não pode ser determinada pelo modelo e é considerada constante, com valor estimado em torno de 10^8 m/s. Este pulso de corrente é considerado o responsável pelos picos iniciais dos campos irradiados.

- 2) Uma componente de corrente uniforme que pode fluir pelo canal enquanto o líder escalonado se desenvolve ou flui logo que a descarga de retorno se inicia. Para determinar esta corrente, a taxa de crescimento da frente de onda do campo elétrico é medida próxima do canal quando o

campo elétrico é preliminarmente divergente, na região linear da frente de onda. Lin et al. consideraram a altura total do canal $H = 7,5\text{km}$.

3) Uma componente de corrente corona, produzida pela movimentação radial das cargas inicialmente armazenadas no envelope corona, que se precipitam para o centro do canal que se forma em torno do líder. A corrente corona é idealizada como uma fonte de corrente distribuída ao longo de toda extensão do canal que é acionada pelo pulso da frente de onda da descarga de retorno a cada altura que ela percorre.

3.4 – Evidências Experimentais

A eficiência de um modelo está associada à escolha adequada dos parâmetros que o definem ou compõem. Neste caso, evidências experimentais podem fornecer condições para que um determinado modelo represente mais fielmente o comportamento espacial e temporal da corrente no canal de descarga.

As primeiras evidências experimentais que auxiliaram a formulação dos modelos de engenharia foram obtidas por Lin et al. (1979) e Willett et al. (1989) que mediram: a corrente na base do canal; a derivada da corrente; a velocidade da corrente de descarga de retorno; e o campo elétrico a várias distâncias do canal do relâmpago. Os resultados obtidos por Lin et al. foram usados para a formulação do modelo LUS, capaz de representar as correntes das primeiras descargas de retorno e das descargas de retorno subseqüentes.

Leteinturier et al. (1990) realizaram medidas de várias grandezas relacionadas ao canal de descarga de relâmpagos induzidos por foguetes, registrando para um mesmo evento: a corrente da descarga de retorno; a derivada da corrente; a velocidade de deslocamento; e o campo magnético (e sua derivada temporal), a 50 m do canal do relâmpago.

Medições simultâneas (como por exemplo as realizadas por Lin et al. 1979, Willett et al. 1989 e Leteinturier et al. 1990) são feitas para avaliar as formas de

onda das correntes no canal e dos campos magnético e elétrico medidos em distâncias que variam de 5 a 100 km do ponto onde o canal toca o solo.

Resultados destas medidas simultâneas podem ser usados na validação de modelos. Por exemplo, com base em resultados de Lin et al. (1979) e de Willet et al. (1989), Nucci et al. (1990) fizeram uma revisão nos modelos de engenharia. Os autores aplicaram os resultados de Lin et al. e de Willet et al. na comparação das formas de onda medidas e das formas de ondas estimadas pelos modelos de engenharia mais empregados.

Por outro lado, Nucci et al. (1990) e Diendorfer e Uman (1990) aplicaram resultados de medições de Berger (1967) para modelar correntes no canal da mesma forma que Guerrieri et al. (1998).

Medições óticas da luminosidade do canal foram feitas para avaliar a velocidade de deslocamento da frente de onda e da relação entre a intensidade luminosa e a corrente que flui pelo canal. A Tabela (3.1) registra velocidades de deslocamento da frente de onda do pulso de corrente derivadas de observações óticas do canal.

Diendorfer e Uman (1990) revisaram o modelo MDU e consideraram a velocidade da frente do pulso de corrente de descarga subsequente obtida por Idone e Orville (1982).

Idone e Orville fizeram medições óticas e concluíram que a velocidade do pulso de corrente decresce com a altura. Como consequência dos resultados obtidos nas observações, Rakov e Dulzon (1987) e Nucci et al. (1990) propuseram modificações nos modelos de linha de transmissão (MTL), para incluir a atenuação da amplitude da corrente com a altura. Rakov e Dulzon propuseram a variação linear com a altura (MTLL) e Nucci et al. a variação exponencial com a altura (MTLE).

TABELA 3.1 – Velocidades de Deslocamento da Frente de Pulso de Corrente
Obtidas por Observação Ótica do Canal.

AUTOR	ANO	VELOCIDADE (v_f [m/ μ s])
Willet et al.	1989	150
Idone et al.	1984	130
Idone e Orville	1982	130
Leteinturier et al.	1990	280

Na aplicação de modelos de engenharia, considera-se em geral, que a velocidade de deslocamento da frente de onda é constante, embora evidências experimentais indiquem o contrário.

3.5 - Modelos de Engenharia – Teoria e Aplicação

Os modelos de engenharia são utilizados para representar a corrente da descarga de retorno no canal como função da altura z' e do tempo t , conhecendo-se a corrente na base do canal ($z = 0$) em um dado tempo " t ". A corrente é assumida propagar ascendente com a velocidade da frente de onda da descarga de retorno " v_f ", como se o canal fosse uma linha de transmissão sem perdas.

Nestes cálculos, são feitas as seguintes simplificações:

a) o canal é considerado reto (sem tortuosidades), perpendicular ao solo (desprezando as possíveis inclinações ou ângulos entre a ponta do líder e o ponto que o relâmpago toca o solo), sem ramificações (as bifurcações são ignoradas);

b) o solo possui condutividade infinita.

(Algumas considerações sobre a condutividade do solo não infinita, permitem a inclusão na análise do modelo, das reflexões das ondas de correntes que percorrem o canal);

c) a velocidade de deslocamento da frente de onda do pulso de corrente que percorre o canal ascendente é considerada constante para facilitar os cálculos.

(Como já foi mostrado anteriormente, observações óticas podem indicar que a velocidade reduz com a altura, na medida que também a luminosidade do canal apresenta o mesmo comportamento. Todavia, a consideração da velocidade de fase da frente do pulso constante, não altera os resultados esperados em cada modelo analisado).

O modelo de engenharia é definido como uma equação que relaciona a corrente do canal $i(z', t)$ em uma altura z' e em um tempo t , com a corrente $i(0, t)$ na origem do canal ($z' = 0$). Uma expressão equivalente, em termos de densidade de carga $\rho(z', t)$ no canal, pode ser obtida usando a equação da continuidade, como fez Thottappillil et al. (1997).

Rakov e Dulzon (1987) representaram os modelos de engenharia por uma relação que expressa as características comuns destes:

$$i(z', t) = u(t - z'/v_f) P(z') i(0, t - z'/v) \quad (3.1)$$

onde u é a função de Heaviside igual a unidade para $t \geq z'/v_f$ e zero para qualquer outro valor de t . $P(z')$ é um fator de atenuação espacial da corrente dependente da altura introduzido por Rakov e Dulzon (1987), v_f é a velocidade de propagação da frente de onda da descarga de retorno ou simplesmente **velocidade da descarga de retorno** e v é a velocidade de propagação da onda de corrente ou simplesmente, **velocidade de propagação da onda**.

A Tabela (3.2) mostra os valores de $P(z')$ e de v para os modelos de engenharia mais utilizados, sendo que o modelo MDU não pode ser representado por uma função $P(z')$:

- **Modelo MBG** de Bruce e Golde (1941).
- **Modelo MTL** de Uman e McLain (1969) – Modelo Linha de Transmissão.
- **Modelo TCS** de Heidler (1985) – Modelo de Fonte de corrente.
- **Modelo MTLL** de Rakov e Dulzon (1987) – Modelo de Linha de Transmissão modificado com decaimento linear da corrente com a altura.
- **Modelo MTLE** de Nucci et al. (1988) – Modelo de Linha de Transmissão modificado com decaimento exponencial da corrente com a altura.
- **Modelo MDU** de Diendorfer e Uman (1990) – Modelo de Fonte de Corrente.

TABELA 3.2 – Fator de Atenuação e Velocidade de Deslocamento da Onda para Modelos de Engenharia .

MODELO	$P(Z')$	V
MBG	1	∞
MTL	1	V_f
TCS	1	-c
MTLL	$1-z'/H$	V_f
MTLE	$\exp(-z'/\lambda)$	V_f

FONTE: Adaptada por Rakov (1997).

H é a altura do canal, λ é a constante de decaimento da corrente com a altura (Nucci et al. (1988) considerou 2000 m) e c a velocidade da luz. Se a variação de v_f não for especificada, ela será considerada constante.

Os modelos de engenharia que não fazem parte da Tabela (3.2), na maioria dos casos, foram formulados a partir dos modelos citados, como por exemplo, o modelo MULS (Master et al, 1981), os modelos de Price e Pierce (1977); Leise e Taylor, (1977); Little, (1978); Levine e Meneghini, (1978); Hubert, (1985); Baun e Baker, (1987). Outros modelos simplesmente não são mencionados, por não permitirem o cálculo da corrente no canal a partir de uma simples relação entre a corrente em qualquer ponto do canal e a corrente na base do canal.

3.6 – Representação da Função de Corrente no Canal

Os modelos de engenharia são caracterizados pela relação analítica entre a corrente em qualquer ponto do canal $i(z', t)$ e a corrente especificada na base do canal $i(0, t)$. Cada modelo tenta descrever o comportamento físico da distribuição da carga no canal, a distribuição temporal-espacial de corrente, a distribuição de carga removida do líder pela descarga de retorno e a relação matemática entre os termos de radiação distante dos campos elétrico e magnético e a corrente na base do canal.

3.6.1 – Modelo de Bruce e Golde (MBG)

No modelo de Bruce e Golde, a corrente $i(z', t)$ abaixo da altura da frente de onda da descarga de retorno, é equivalente à corrente na base do canal no nível do solo. Acima da frente de onda, como em todos os demais modelos, a corrente é nula.

Usando a Equação (3.1) onde $P(z') = 1$ e $v = \infty$, tem-se:

$$\begin{aligned} i(z', t) &= i(0, t) & z' \leq vt & \quad (3.2) \\ i(z', t) &= 0 & z' > vt. & \end{aligned}$$

A distribuição de corrente da descarga de retorno do modelo MBG ao longo do canal exibe uma descontinuidade na frente de onda da descarga de retorno na origem. Tal descontinuidade implica que as cargas a cada altura z' do canal são removidas instantaneamente pela frente de onda da descarga de retorno. Não é fisicamente possível a corrente se comportar como prevê o modelo MBG. Considerando que a distribuição da corrente com a altura é uniforme, em cada seção do canal por onde a frente da onda de descarga de retorno passa, a carga é instantaneamente removida. Tal fato não pode acontecer porque exige que a velocidade da frente de onda de corrente seja infinita.

O modelo MBG produz campos elétrico e magnético cujas formas de onda divergem das medições realizadas por Lin et al. 1979, Willett et al. 1989 e Leteinturier et al. 1990

3.6.2 – Modelo Linha de Transmissão (MTL)

Uman e McLain (1970) mostraram que a corrente no nível do solo ($z = 0$) e em qualquer ponto do canal abaixo da frente da onda de corrente da descarga de retorno, pode ser determinada pela radiação do campo elétrico em longas distâncias do canal pela relação:

$$i(0, t) = \frac{2\pi\epsilon_0 c^2 D}{vt} \int_0^t E_{\text{far}}(r, \tau + \frac{D}{c}) d\tau \quad (3.3)$$

No modelo MTL, a corrente propaga-se pelo canal como se o fizesse em uma linha de transmissão sem perdas (Uman e McLain, 1970) e D é a distância da base do canal ao observador localizado no nível do solo.

$$i(z', t) = i(0, t - z'/v) \quad z' \leq vt \quad (3.4)$$

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

O modelo permite que a carga seja transferida da ponta inferior para o topo do líder e assim não remove nenhuma carga do canal - o fato de que as cargas estão presentes no canal foi determinado através de medições remotas das variações de campo elétrico feitas por Beasley et al. (1983).

3.6.3 – Modelo de Fonte de Corrente (TCS)

Heidler (1985) propôs um modelo no qual a carga é removida instantaneamente do líder no canal pela frente do pulso da descarga de retorno que está associada a uma fonte de corrente móvel que percorre toda a extensão do canal a partir do ponto de junção. A corrente resultante propaga-se descendente pelo canal com a velocidade da luz c . A corrente injetada pela fonte a cada altura z' em um tempo t , chega à base do canal em um tempo z'/c depois. Expressado analiticamente:

$$i(z', t) = i(0, t+z'/c) \quad z' \leq vt \quad (3.5).$$

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

É importante observar que, embora os modelos TCS e MBG tenham sido concebidos independentemente a partir de diferentes considerações físicas, no caso da corrente fluir para o solo com uma velocidade infinita ($v \rightarrow \infty$) no modelo TCS, este se transforma no modelo MBG.

3.6.4 – Modificações no Modelo de Linha de Transmissão

Como o modelo MTL não permite a remoção de carga do canal, não produzindo como conseqüência, campos que sejam realistas ao longo de um período de tempo considerado Rakov e Dulzon (1987) e Nucci et al (1988) propuseram modificações neste modelo.

3.6.4.1 - Modelo MTL Modificado com Decaimento Linear da Corrente com a Altura – MTL

Rakov e Dulzon (1987) consideraram o fator de atenuação espacial da corrente dependente da altura, introduzindo o valor de $P(z') = 1-z'/H$.

A forma de onda da corrente em qualquer altura do canal, como função da corrente na base do canal, é dada pela relação:

$i(z', t) = P(z') i(0, t - z'/v)$, logo:

$$i(z', t) = (1-z'/H) i(0, t - z'/v) \quad z' \leq vt \quad (3.6).$$

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

Rakov e Dulzon assumiram que o fator de atenuação da corrente é uma função apenas de z' e que a carga total neutralizada pela descarga de retorno é depositada no canal acima da frente de onda na altura efetiva H , o que implica que a carga armazenada sobre uma dada seção do canal flui em direção à base do canal através do comprimento dado por z' ($z = H$). Como a forma de onda é considerada independente da altura (sem distorção, apenas com atenuação),

este decrescimento da carga transferida com a altura, corresponde ao decrescimento da intensidade do pulso da corrente da descarga de retorno, cuja taxa é a mesma em ambos os casos. Assim, o fator de atenuação a uma dada altura z , simplesmente é a razão entre a carga do líder distribuída ao longo do canal acima da seção na altura z e a carga total do líder depositada sobre a altura efetiva H . Se a carga do líder for distribuída uniformemente ao longo do canal, então o fator de atenuação é da forma $P(z') = 1 - z'/H$. Em geral o valor de H é considerado 7,5 km, utilizado por Lin et al. (1979).

3.6.4.2 - Modelo MTL modificado com decaimento exponencial da corrente com a altura – MTLE

Nucci et al. (1988) propuseram um fator de atenuação que considera a contribuição da carga corona durante a fase da descarga de retorno, cuja forma funcional é $P(z') = e^{(-z'/\lambda)}$.

A forma de onda da corrente em qualquer altura do canal, como função da corrente na base do canal é dada pela relação:

$i(z', t) = P(z') i(0, t - z'/v)$, logo:

$$i(z', t) = e^{(-z'/\lambda)} i(0, t - z'/v) \quad z' \leq vt \quad (3.7)$$

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

Esta relação permite que a carga seja removida do canal através do termo divergente ou eletrostático da corrente de descarga de retorno com a altura. A constante de decaimento λ foi proposta para considerar o efeito da distribuição vertical da carga do líder removida durante a fase da descarga de retorno e seu valor foi determinado por Nucci et al. (1988) e por Nucci e Rachidi (1989) como $\lambda = 2$ km a partir dos resultados experimentais publicados por Lin et al (1979).

3.6.5 – Modelo de Diendorfer e Uman (MDU)

Diendorfer e Uman (1990), procuraram combinar as melhores características do modelo LUS com o modelo TCS adotando uma visão física na qual a carga

armazenada no líder é liberada pela frente de onda da descarga de retorno e então se propaga ascendentemente com a velocidade da luz, permitindo, no entanto, que ela possa ser removida de forma mais branda, não instantaneamente, suprimindo o canal de uma forma similar à componente corona do modelo LUS. Para que isto seja possível, a corrente é considerada como uma combinação de duas parcelas, sendo que uma parcela tem a forma de pulso e rompe a rigidez dielétrica do ar no canal e a outra é uma corrente corona, que permanece no canal por um tempo mais longo que o pulso. A soma das duas parcelas produz a corrente de descarga de retorno. O modelo resultante permite o cálculo de campos que tenham características similares aos campos experimentalmente medidos por Lin et al. 1979, Willett et al. 1989 e Leteinturier et al. 1990.

O modelo MDU pode justificar as diferenças encontradas nas velocidades estimadas para campos e correntes medidos e calculados pelos modelos de linha de transmissão. A velocidade da frente de onda é considerada constante e igual a $1,3 \times 10^8$ m/s, consistente com valores de descargas subseqüentes medidas por Idone e Orville (1982) e Idone et al (1984) (vide Tabela 3.1). Nos dois resultados foram utilizadas medições óticas para mostrar que, embora a velocidade da frente de onda decaia com a altura do canal, a aproximação para um valor constante é razoavelmente aceita.

No modelo MDU, a carga do líder armazenada em uma altura qualquer ao longo do canal é descarregada segundo uma função exponencial com uma constante de tempo τ_D até o nível do solo. A corrente $i(z', t)$ pode ser relacionada com a corrente na base do canal $i(0, t)$ através da constante de tempo de descarga a uma altura z' e determinada por:

$$i(z', t) = i(0, t_m) - i(0, z'/v^*) e^{-t/\tau_D} \quad (3.8)$$

$$\text{Com } t_e = (t - z'/v), \quad t_m = (t + z'/c) \text{ e } v^* = v/(1 + v/c).$$

3.7 - Distribuição de Carga ao Longo do Canal do Relâmpago

A distribuição de carga no canal, prevista nos modelos MBG, MTL, TCS, MTL, MTLE e MDU a seguir analisada, parte da equação da continuidade de corrente em uma seção do canal.

A distribuição da carga que é removida do líder no canal em um tempo t é derivada da expressão a seguir (Nucci et al, 1990):

$$\rho_L(z', t) = \lim_{\Delta z' \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta z'} \left[\int_{z'/v}^t i(z', \tau) d\tau - \int_{z'/v + \Delta z'/v}^t i(z' + \Delta z', \tau) d\tau \right] \quad (3.9)$$

Também é possível considerar uma seção do canal em uma altura arbitrária z' e determinar a relação entre a densidade de carga removida e a corrente (Thottappillil et al, 1997):

$$\rho_L(z', t) = \frac{i(z', z'/v)}{v} - \int_{z'/v}^t \frac{\partial i(z', \tau)}{\partial z'} d\tau \quad (3.10)$$

A Equação (3.10) é a equação da continuidade aplicada à descarga de retorno, onde a densidade de carga a uma altura z' do canal do relâmpago é considerada em um certo tempo t . O seu primeiro termo está associado com a frente de onda da descarga de retorno e o segundo termo com a variação da amplitude de corrente com a altura.

Tomando a derivada temporal da Equação (3.1), substituindo t por τ , vem que:

$$\frac{\partial i(z', \tau)}{\partial z'} = \frac{\partial}{\partial z'} [P(z') i(0, \tau - z'/v)]$$

$$\frac{\partial i(z', \tau)}{\partial z'} = P(z') \frac{\partial i(0, \tau - z'/v)}{\partial z'} + \frac{dP(z')}{dz'} i(0, \tau - z'/v)$$

Convertendo a derivada espacial em derivada temporal, tem-se:

$$\frac{\partial i(0, \tau - z'/v)}{\partial z'} = \frac{\partial i(0, \tau - z'/v)}{\partial(\tau - z'/v)} \frac{\partial(\tau - z'/v)}{\partial z'} \quad \text{ou} \quad \frac{\partial i(0, \tau - z'/v)}{\partial z'} = -\frac{1}{v} \frac{\partial i(0, \tau - z'/v)}{\partial \tau}$$

$$\frac{\partial i(z', \tau)}{\partial z'} = -\frac{P(z')}{v} \frac{\partial i(0, \tau - z'/v)}{\partial \tau} + \frac{dP(z')}{dz'} i(0, \tau - z'/v)$$

Aplicando a Equação (3.2) com $t = z'/v$, tem-se:

$$\frac{i(z', z'/v)}{v} = P(z') \frac{i(0, 0)}{v}$$

Substituindo as relações acima obtidas na Equação (3.1), tem-se:

$$\rho L(z', t) = P(z') \frac{i(0, 0)}{v} + [P(z') \frac{i(0, \tau - z'/v)}{v}] \frac{t}{z'/v} - \frac{dP(z')}{dz'} \frac{t}{z'/v} \int_0^t i(0, \tau - z'/v) d\tau$$

Simplificando:

$$\rho L(z', t) = P(z') \frac{i(0, z'/v)}{v} - \frac{dP(z')}{dz'} \frac{t}{z'/v} \int_0^t i(0, \tau - z'/v) d\tau \quad (3.11)$$

Na Equação (3.11) o termo associado à descarga de retorno foi removido, de forma que ela é válida sem considerar se há ou não uma descontinuidade na corrente, isto é, $i(0, 0) \neq 0$ na frente do pulso da descarga de retorno. Ambos os termos de (3.11) resultam do segundo termo de (3.10) (Thottappillil et al. 1997).

3.7.1 – Modelo MBG

Neste modelo, em qualquer tempo a corrente é uniforme no canal entre a frente de onda da descarga de retorno e a base do canal no nível do solo. Na equação da continuidade, que considera a variação temporal de carga linear no canal igual à variação espacial da corrente com sinal oposto, a carga baixada para o solo retirada do líder que precede a descarga de retorno no canal por unidade de comprimento, é definida em termos de forma de onda na base do canal pela expressão (Thottappillil et al. 1997; Nucci et al. 1990):

$$\rho L(z', t) = \frac{i(0, \frac{z'}{v})}{v} \quad (3.12)$$

A Equação (3.12) é derivada de (3.9) usando (3.2) (Nucci et al. 1990).

A equação (3.12) mostra que para o modelo MBG a carga removida não depende explicitamente do tempo t . Devido à descontinuidade existente este resultado é esperado, de maneira que, a distribuição de densidade de carga em função da altura do canal tem a mesma forma de onda da corrente em função do tempo, ao nível do solo (Thottappillil et al. 1997).

3.7.2 – Modelo MTL

Pelas características do modelo MTL, a distribuição de cargas ao longo do canal é:

$$\rho_L(z', t) = \frac{i(0, t - z'/v)}{v}$$

Porém, quando a corrente cessa de circular em todas as seções do canal, $\rho_L(z', t) = 0$, ou seja, não há nenhuma carga depositada no canal. Como resultado, não há equação de densidade de carga derivada da Equação (3.9). Esta conclusão fornece uma razão para que o campo calculado neste modelo não confira com medições remotas de campos, particularmente para longo período de tempo de propagação e para faixas de distâncias próximas do canal (Lin et al, 1979). Todavia no modelo MTL, uma simples relação entre os campos elétrico e magnético distantes pode ser obtida para relacionar os campos irradiados em longas distâncias com a corrente no solo na base do canal, assim como a relação entre as suas respectivas derivadas (Uman et al, 1975). Neste caso “ D ” é a distância entre a base do canal e o observador localizado no nível do solo. A velocidade de propagação da luz é “ c ” e a velocidade de propagação do pulso de corrente ao longo do canal é “ v ”.

$$\begin{aligned} i(0, t) &= -\frac{2\pi\pi_0 c^2 D}{v} E_d(D, t + \frac{D}{c}) \\ \frac{di(0, t)}{dt} &= -\frac{2\pi\pi_0 c^2 D}{v} \frac{dE_d(D, t + \frac{D}{c})}{dt} \end{aligned} \quad (3.13)$$

As relações das Expressões (3.13) só são válidas para os casos em que o solo seja considerado com condutividade infinita e somente para campos distantes.

Se, para uma aproximação razoável, estas condições forem satisfeitas, então a velocidade da descarga de retorno pode ser determinada pelas Expressões (3.13) (usando medições de corrente de pico e do valor de pico do campo elétrico).

3.7.3 – Modelo TCS

A distribuição de carga removida pelo líder é da forma:

$$\rho_L(z', t) = \frac{1}{v^*} i\left(0, \frac{z'}{v^*}\right) \quad (3.14)$$

Onde $v^* = 1/(1/v + 1/c)$. A Equação (3.14) pode ser obtida da Equação (3.5) usando a Equação da continuidade (3.9) (Nucci et al, 1990). Também neste caso, como no modelo MBG, a carga removida pela frente de onda da descarga de retorno não é função do tempo.

Para Thottappillil et al (1997), a distribuição de densidade de carga linear ao longo do canal pode ser obtida da Equação (3.11) convertendo a derivada espacial em derivada temporal, como feito antes, mas neste caso especificamente para o modelo TCS onde a velocidade da onda é igual a velocidade da luz:

$$\frac{\partial i(z', \tau)}{\partial z'} = \frac{\partial i(0, \tau + z'/c)}{\partial(\tau + z'/c)} \frac{\partial(\tau + z'/c)}{\partial z'} \quad \text{ou} \quad \frac{\partial i(z', \tau)}{\partial z'} = -\frac{1}{c} \frac{\partial i(0, \tau + z'/c)}{\partial \tau}$$

$$\frac{i(z', z'/c)}{v} = \frac{i\left(0, \frac{z'}{v} + \frac{z'}{c}\right)}{v}$$

Substituindo as relações acima na Equação (3.10), tem-se:

$$\rho_L(z', t) = \frac{i\left(0, \frac{z'}{v} + \frac{z'}{c}\right)}{v} - \frac{1}{c} i\left(0, \tau + \frac{z'}{c}\right) \Big|_{z'/v}$$

$$\rho_L(z', t) = \frac{1}{v} i\left(0, \frac{z'}{v} + \frac{z'}{c}\right) - \frac{1}{c} i\left(0, t + \frac{z'}{c}\right) + \frac{1}{c} i\left(0, \frac{z'}{v} + \frac{z'}{c}\right)$$

$$\rho_L(z', t) = -\frac{i(0, t + \frac{z'}{c})}{c} + \frac{i(0, \frac{z'}{v^*})}{v^*} \quad (3.15)$$

Onde $v^* = v/(1+v/c)$ é a velocidade aparente da frente de onda. O primeiro termo está associado com a frente de onda descendente e representa a carga transferida, enquanto o segundo termo é consequência do deslocamento da frente de onda da descarga de retorno ascendente e representa a carga depositada no canal (diferentes sinais significam diferentes convenções das direções de propagação). A corrente nos dois termos é positiva de acordo com a convenção de sinais definida acima. Nesta relação, o segundo termo de (3.15) é igual à Equação (3.11) e é sempre positivo para neutralizar as cargas negativas do líder, enquanto no nível do solo ($z' = 0$), $\rho_L(z', t) = -i(0, t)/c$ é sempre negativo, que só é verdadeiro se não houver descontinuidade em $t = 0$ na corrente na base do canal. Entretanto, a densidade de carga no nível do solo possui uma componente adicional positiva, $i(0, 0)/v^*$, consequência desta descontinuidade. Se $i(0, 0) = 0$, então a distribuição de densidade de carga ao longo do canal é bipolar durante o processo da descarga de retorno, que após se completar, isto é, $t \rightarrow \infty$, resulta numa densidade de carga no solo igual a zero.

3.7.4 – Modelo MTL

Neste modelo Rakov e Dulzon (1987) assumiram uma distribuição uniforme da carga do líder no canal:

$$\rho_L(z', t) = \frac{1}{v} \left(1 - \frac{z'}{H}\right) i(0, t - \frac{z'}{v}) + \frac{1}{H} \int_{z'/v}^t i(0, \tau - \frac{z'}{v}) d\tau = \left(1 - \frac{z'}{H}\right) \frac{i(0, t - z'/v)}{v} + \frac{Q(z', t)}{H} \quad (3.16)$$

No momento que a corrente, ao longo de todo o canal, decai para zero, o primeiro termo da Equação (3.16) representando a carga transferida torna-se zero. Neste momento, o segundo termo representando a carga depositada, aproxima-se de um valor constante, correspondendo a uma distribuição uniforme da carga absorvida pela frente de onda da descarga de retorno. A consequência

desta situação é uma distribuição uniforme da carga previamente armazenada pelo líder no canal, assumindo assim, que a descarga de retorno neutraliza toda a carga do líder no canal.

3.7.5 – Modelo MTLE

Neste modelo, Nucci et al. (1988) assumiram que a carga do líder começa a ser removida quando a frente de onda da descarga de retorno atravessa a seção do canal na altitude z' e continua até o final do fluxo de corrente no nível do solo, na base do canal. Assim, a distribuição da carga removida do líder é dada por (Nucci et al., 1990):

$$\rho_L(z', t) = \frac{e^{-z'/\lambda}}{\lambda} Q_0(t) \quad (3.17)$$

A Equação (3.17) pode ser obtida da Equação (3.7) usando a Equação da continuidade (3.9) (Nucci et al., 1990), onde $Q_0(t)$ é a carga transferida para o solo pela descarga de retorno até o tempo t .

Thottappillil et al. (1997) deu o mesmo tratamento ao caso do decaimento da corrente exponencialmente com a altura, obtendo a seguinte expressão:

$$\rho_L(z', t) = e^{-z'/\lambda} \frac{i(0, t - z'/v)}{v} + \frac{e^{-z'/\lambda}}{\lambda} Q(z', t) \quad (3.18)$$

O primeiro termo de (3.18) representa a carga transferida e o segundo termo semelhante à Equação (3.17) de Nucci et al. (1990), representa a carga da descarga de retorno depositada no canal. Quando cessa o fluxo da corrente ao longo de todo o canal, o primeiro termo de (3.18) torna-se zero e $Q(z', t)$ aproxima-se de um valor constante, resultando numa distribuição exponencial de densidade de carga por todo o canal com seu valor máximo situado no nível do solo, na base do canal.

3.7.6– Modelo MDU

A Equação (3.8) pode ser escrita na forma de duas parcelas de correntes que fluem pelo canal em sentido oposto:

$$I(z', t) = i_1(z', t) - i_2(z', t) \quad (3.19)$$

Sendo a primeira parcela $i_1(z', t)$, a corrente na base do canal, como no caso do modelo TCS, porém resultado da soma de duas componentes, o pulso de corrente que quebra a rigidez dielétrica do ar com constante de tempo menor e a componente de corrente corona com constante de tempo maior. A segunda parcela representa o efeito da constante de tempo de descarga na distribuição da densidade linear de carga ao longo do canal.

Thottappillil et al. (1997) tratou o segundo termo de (3.19) como segue:

$$\begin{aligned} \frac{\partial i_2(z', \tau)}{\partial z'} &= \frac{\partial}{\partial z'} \left[i\left(0, \frac{z'}{v} + \frac{z'}{c}\right) e^{-(\tau - z'/v)/\tau_D} \right] = \\ &= \left[\frac{1}{v\tau_D} i\left(0, \frac{z'}{v} + \frac{z'}{c}\right) + \frac{\partial i\left(0, \frac{z'}{v} + \frac{z'}{c}\right)}{\partial z'} \right] e^{-(\tau - z'/v)/\tau_D} \end{aligned}$$

Tornando $t = z'/v$ na segunda componente da corrente em (3.8) e (3.19), tem-se que:

$$\frac{i_2\left(z', \frac{z'}{v}\right)}{v} = \frac{i\left(0, \frac{z'}{v} + \frac{z'}{c}\right)}{v}$$

Definindo $t^*(z') = z'/v + z'/c$ para ser substituído acima, obtém-se a densidade linear de carga associado à componente $i_2(z', t)$:

$$\rho_{2L}(z', t) = \frac{i[0, t^*(z')]}{v} - \int_{z'/v}^t e^{-(\tau - z'/v)/\tau_D} \left\{ \frac{1}{v\tau_D} i[0, t^*(z')] + \frac{\partial i[0, t^*(z')]}{\partial z'} \right\} d\tau$$

Apesar de $t^*(z')$ não ser uma função de τ , que é um tempo arbitrário entre os limites da integral z'/v e t , pode-se dizer que $t^*(z') = \tau - k$, onde k é uma constante independente de t (Diendorfer e Uman, 1990).

Então,

$$\frac{\partial i[0, t^*(z')]}{\partial z'} = \frac{1}{v^*} \frac{\partial i[0, t^*(z')]}{\partial \tau}$$

Onde v^* é a velocidade aparente definida no modelo TCS. Substituindo e resolvendo a integral, chamando doravante o termo $t^*(z')$ por t^* , temos:

$$\begin{aligned} \rho_{2L}(z', t) &= \frac{i(0, t^*)}{v} - \frac{1}{v\tau_D} i(0, t^*) \left[\frac{e^{-(t-z'/v)/\tau_D}}{-1/\tau_D} \right]_{z'/v}^t - \frac{1}{v^*} \frac{\partial i(0, t^*)}{\partial t} \left[\frac{e^{-(t-z'/v)/\tau_D}}{-1/\tau_D} \right]_{z'/v}^t = \\ &= e^{-(t-z'/v)/\tau_D} \left[\frac{i(0, t^*)}{v} + \frac{\tau_D}{v^*} \frac{\partial i(0, t^*)}{\partial t} \right] - \frac{\tau_D}{v^*} \frac{\partial i(0, t^*)}{\partial t} \end{aligned} \quad (3.20)$$

Combinando (3.20) com (3.16) e notando que $t^*(z')=z'/v^*$, obtém-se a densidade linear de carga do modelo MDU como sendo:

$$\begin{aligned} \rho_L(z', t) &= -\frac{i(0, t-z'/c)}{c} - e^{-(t-z'/v)/\tau_D} \left[\frac{i(0, z'/v)}{v} + \frac{\tau_D}{v^*} \frac{di(0, z'/v^*)}{dt} \right] \\ &+ \frac{1}{v^*} \left[i(0, z'/v) + \tau_D \frac{di(0, z'/v^*)}{dt} \right] \end{aligned}$$

Na frente de onda, $\rho_L(z', z'/v) = 0$, como acontece no modelo MTL desde que não haja, na corrente na base do canal, descontinuidade em $t = 0$. Este resultado difere no entanto dos modelos MBG e TCS. No solo, a densidade linear de carga depende da derivada da corrente na base do canal em $t = 0$. O mesmo acontece com o modelo TCS quando sua derivada temporal é igual a zero. Se for considerado que o coeficiente de reflexão da corrente no solo seja zero, estão o modelo TCS se aproxima do modelo MDU.

Após um tempo suficientemente longo ($t \rightarrow \infty$) a circulação de corrente pelo canal cessa e o primeiro termo da equação acima, representando a carga transferida, se anula e a densidade linear de carga é calculada pela expressão:

$$\rho_L(z', t) = \frac{1}{v^*} \left[i(0, z'/v^*) + \tau_D \frac{di(0, z'/v^*)}{dt} \right]$$

Esta relação representa a carga depositada no canal pela descarga de retorno. Diendorfer e Uman (1990) chegaram a uma relação idêntica, exceto pelo sinal oposto, consequência da adoção de diferentes convenções para a corrente.

3.8 – Distribuição de Carga e de Corrente no Canal - Resumo

A Tabela (3.3) sumariza os termos de carga e de correntes nos modelos de linha de transmissão (MTL) e suas modificações, também chamados de Modelos de Fonte Fixa de Corrente. A Tabela (3.4) sintetiza os termos de carga e de correntes nos modelo de engenharia BG, TCS e MDU, também chamados de modelos de fonte móvel de corrente.

TABELA 3.3 – Modelos “Fonte Fixa” de Corrente ($t \geq z'/v_f$).

<p>MTL</p> <p>(Uman e McLain, 1969)</p>	$i(z', t) = i(0, t - z'/v)$
	$\rho_L(z', t) = \frac{i(0, t - z'/v)}{v}$
<p>MTLL</p> <p>(Rakov e Dulzon, 1987)</p>	$i(z', t) = (1 - z'/H) i(0, t - z'/v)$
	$\rho_L(z', t) = (1 - \frac{z'}{H}) \frac{i(0, t - z'/v)}{v} + \frac{Q(z', t)}{H}$
<p>MTLE</p> <p>(Nucci et al. 1990)</p>	$i(z', t) = e^{-(z'/\lambda)} i(0, t - z'/v)$
	$\rho_L(z', t) = e^{-z'/\lambda} \frac{i(0, t - z'/v)}{v} + \frac{e^{-z'/\lambda}}{\lambda} Q(z', t)$

TABELA 3.4 – Modelos “Fonte Móvel” de Corrente ($T \geq Z'/V_f$).

<p>MBG</p> <p>(Bruce e Golde, 1941)</p>	$i(z', t) = i(0, t)$
	$\rho_L(z', t) = \frac{i(0, \frac{z'}{v})}{v}$
<p>TCS</p> <p>(Heidler, 1985)</p>	$i(z', t) = i(0, t + z'/c)$
	$\rho_L(z', t) = -\frac{i(0, t + \frac{z'}{c})}{c} + \frac{i(0, \frac{z'}{v^*})}{v^*}$
<p>MDU</p> <p>(Diendorfer e Uman, 1990)</p>	$i(z', t) = i(0, t_m) - i(0, z'/v^*) e^{-t/\tau_D}$
	$\rho_L(z', t) = -\frac{i(0, t - z'/c)}{c} e^{-(t - z'/v)/\tau_D} \left[\frac{i(0, z'/v)}{v} + \frac{\tau_D}{v^*} \frac{di(0, z'/v^*)}{dt} \right]$ $+ \frac{1}{v^*} \left[i(0, z'/v) + \tau_D \frac{di(0, z'/v^*)}{dt} \right]$

CAPÍTULO 4

FUNÇÕES ANALÍTICAS DE CORRENTES DE DESCARGA DE RETORNO DE RELÂMPAGOS

4.1 – Objetivos

O objetivo deste capítulo é descrever o processo de descarga no canal de relâmpago e apresentar algumas funções analíticas usadas na representação da corrente de descarga de retorno de uma descarga atmosférica. As funções analíticas possuem vantagens e desvantagens. As vantagens estão ligadas à facilidade da representação gráfica da curva de corrente com base nos parâmetros escolhidos. As desvantagens aparecem na forma das curvas idealizadas diferentes das curvas experimentais. As funções analíticas devem ser coerentes com o processo de descarga no canal do relâmpago não necessariamente reproduzindo todas as fases, mas reproduzindo a corrente na base do canal.

4.2 – Mecanismo de Descarga

O mecanismo de descarga no canal é descrito em etapas e representam relâmpagos negativos descendentes.

4.2.1 – Etapas do Mecanismo de Descarga

Na descrição das etapas que ilustram o mecanismo de descarga, os tempos médios indicados são aqueles assinalados na Figura (4.1).

- Momentos que antecedem o aparecimento do líder ($t = 0$ a $t = 1,10\text{ms}$).

O momento que antecede a formação do líder se distingue pela ruptura preliminar da rigidez dielétrica do ar dentro da nuvem. As cargas que produzem esta ruptura não são inicialmente transportadas por um condutor elétrico, mas são dispostas em um dielétrico através de partículas de precipitação devido a intensificação do campo elétrico na região da nuvem onde as cargas se concentram. As cargas acumuladas não se descarregam através do líder, sem

antes haver uma preparação adequada dentro da nuvem. Esta preparação anterior identifica uma fase chamada de “ruptura preliminar da rigidez dielétrica do ar”. É necessário que o carregamento da nuvem (reunião de diversas cargas antes isoladas, transportadas individualmente por gotas de água e partículas de gelo para uma região de concentração) seja suficiente para produzir uma descarga interna inicial através de um fino filamento condutor. Como consequência, grandes quantidades de cargas antes isoladas dentro da nuvem são interligadas por finas estruturas de filamentos condutores na forma de uma extensa rede. Tão logo as cargas ocupem uma extensa área suficiente para criar uma polarização, o condutor carregado que daí resulta pode então suprir a corrente necessária para formar uma ligação elétrica entre cargas de sinais contrários. Uma descarga somente se inicia se um campo elétrico intenso é estabelecido na base da nuvem.

- Quebra da rigidez dielétrica do ar – Líder escalonado ($t = 1,15$ a $t = 19,00$ ms).

O processo da quebra da rigidez dielétrica inicial forma um canal condutor entre o pequeno centro de carga positiva situado na base da nuvem e o principal centro de cargas negativas situado no centro da nuvem (etapa anterior até $t = 1,10$ ms). Neste caso um relâmpago negativo descendente está prestes a acontecer. Quando este processo é completado, o campo elétrico entre as extremidades deste canal torna-se muito intenso e atinge valores da ordem de 10^5 V/m e provoca a ruptura da rigidez dielétrica do ar em algum ponto dentro da nuvem, que dará origem a um mecanismo de descarga que impulsionalará cargas para baixo formando um condutor chamado **líder escalonado** (LE) que percorrerá o caminho entre a nuvem e o solo.

O processo descrito acima identifica a formação de um líder que conduz cargas negativas.

- Canal principal ($t = 20,00$ a $t = 20,15$ ms).

Em seguida ao surgimento do envelope corona, em seu interior, forma-se o **canal principal**, que é uma região com diâmetro da ordem de 1 a 5 cm, fortemente ionizada, submetida a uma corrente elétrica muito intensa.

- Do líder escalonado ao líder contínuo ($t = 1,15$ a $t = 62,05$ ms).

Pelo canal principal é que se desenvolvem os líderes. O primeiro líder, por não encontrar na atmosfera um condutor ionizado, desenvolve sua trajetória sinuosa em pausas no seu caminho para o solo. Por esta característica, este líder é chamado de **líder escalonado** (LE) ($t = 1,15$ ms). Quando o líder escalonado se aproxima do solo, aumenta significativamente a intensidade do campo elétrico entre a sua extremidade e o solo, fazendo surgir do solo um condutor com cargas de sinal contrário chamado de **líder ascendente** (LA) ($t = 20,00$ ms). Quando os líderes se encontram definem o ponto de junção e completando o canal produzem a primeira descarga de retorno, doravante chamada simplesmente de **descarga de retorno** (DR) ($t = 20,20$ ms). A DR é um pulso de corrente que percorre o canal principal de baixo para cima e que iguala o potencial de todo o canal do relâmpago ao nível do potencial do solo. Um relâmpago pode ter uma ou múltiplas descargas de retorno. As descargas de retorno que se seguem à primeira, são chamadas doravante, de **descargas subseqüentes** (DS).

O surgimento de DS pode estar ligado ao processo regenerativo da nuvem, definido pelos **processos K e J** de descargas internas ($t = 40,00$ ms), disponibilizando cargas para novas descargas. Um novo líder percorre o caminho entre a nuvem e o solo, pelo canal principal que se encontra ionizado. Este líder que tem uma trajetória mais rápida é chamado de **líder contínuo** (LC) ($t = 60,00$ a $62,05$ ms).

O LC vai depositando cargas negativas ao longo do canal e quando se aproxima do solo, é iniciada uma descarga subseqüente ($t = 62,05$ ms). Enquanto a DR possui ramificações as DS's não as possuem.

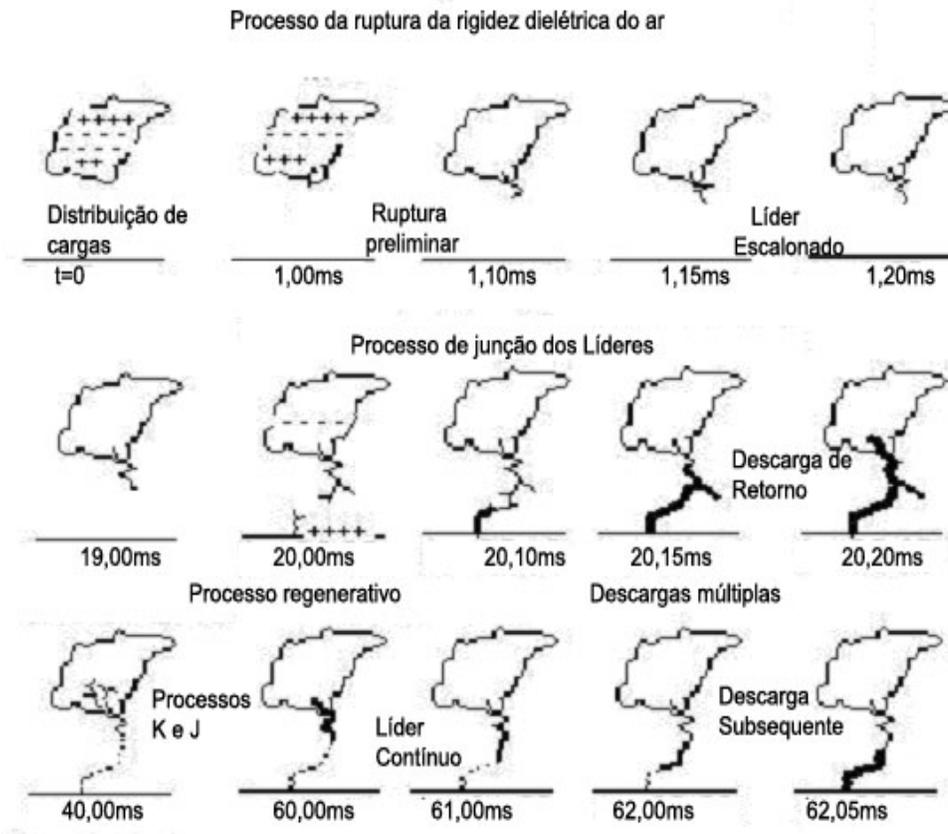


FIGURA 4.1 - Mecanismo de descarga (Os instantes de tempo t estão dados em milésimos de segundos).

FONTE: adaptada de Lacerda (1998 p. 53).

4.2.2 - Correntes que Fluem pelo Canal Principal

4.2.2.1 - Correntes de Curta Duração

As correntes consideradas de curta duração possuem elevada amplitude (I_{pico}) permanecendo no canal durante intervalos de tempos reduzidos, da ordem de dezenas de milionésimos de segundos. Estas correntes são assimétricas e seus pulsos possuem uma frente com alta taxa de crescimento ($\text{kA}/\mu\text{s}$) e um valor de crista muito elevado, podendo apresentar mais de um valor de pico. Após atingir o valor máximo, o pulso apresenta um forte amortecimento. Exemplos de correntes de curta duração: correntes corona, correntes das primeiras descargas de retorno e subseqüentes.

4.2.2.2 - Correntes de Longa Duração

As correntes de longa duração possuem pico moderado (menor que 1 kA) e sua forma de onda apresenta fraco amortecimento, sendo caracterizadas por um maior tempo de permanência no canal. Estas correntes ocorrem em intervalos de tempos que variam entre centenas de milionésimos de segundos a algumas centenas de milésimos de segundos. Estas correntes são também chamadas de correntes contínuas. Elas podem aparecer no canal do relâmpago antes, durante e após a DR.

4.2.3 – Líder Escalonado (LE)

Na fase do líder escalonado, que é comandada pelo campo elétrico de alta intensidade, da ordem de 2,6 MV/m, a intensidade da corrente corona é determinada pelo perfil do potencial à frente do líder e pelo campo elétrico mantido constante dentro da região delimitada pelo envelope corona, na ordem de 750 kV/m (Mazur e Ruhnke, 1998). As cargas elétricas negativas são impulsionadas para baixo em passos da ordem de 50 m, percorridos em média em $1\mu\text{s}$, com uma pausa de $50\mu\text{s}$ entre cada passo e com uma velocidade média ao longo da distância entre a nuvem e o solo da ordem de 2×10^5 m/s (contra uma velocidade de 3×10^6 m/s nos líderes contínuos), gerando uma corrente elétrica de 100 A a 1000 A (Uman, 1987). O desenvolvimento dessa fase foi identificado por medidas de campo elétrico confrontadas com fotografias feitas com filme de alta velocidade (Schonland, 1937; 1938). Um esquema desta fase pode ser visto na Figura 4.2.

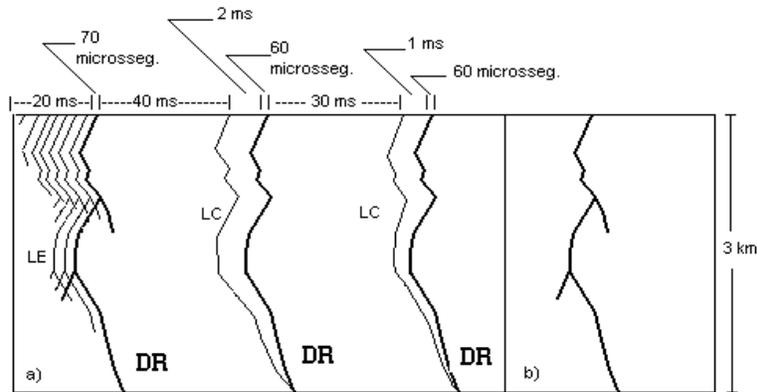


FIGURA 4.2- Esquema (fora de escala), mostrando uma descarga nuvem solo: a) tempos característicos das diversas fases (DR: Descarga de retorno; LC: líder contínuo; LE: líder escalonado) registrada por câmera com o filme girando em alta velocidade; b) a mesma descarga registrada em filme estático.

FONTE: Lacerda (1998 p 62).

A partir de medida de campo elétrico, observa-se que relâmpagos positivos geralmente são precedidos por significativas descargas intranuvens, que em média, duram de 100 a 200 ms. Estas observações sugerem que os relâmpagos positivos descendentes podem ser iniciados por uma ramificação destas descargas dentro da nuvem, que às vezes envolvem um grande canal horizontal, com algumas dezenas de quilômetros de extensão (Rakov, 1998). Evidências indicam que os líderes são iniciados na região de cargas positivas que ocorrem mais freqüentemente no estágio dissipativo das nuvens de tempestades. (Neste momento, a região de cargas positivas poderia ser menos protegida pela blindagem das cargas negativas da nuvem, como resultado de um deslocamento do principal centro de cargas no interior da nuvem (Uman, 1987)). A análise do líder destes relâmpagos mostra uma fraca luminosidade. Eles são menos visíveis e não possuem pausas bem definidas, impossibilitando às vezes, sua observação mesmo em filmes de alta velocidade (Berger, 1967). Em geral, é evidenciado que os relâmpagos positivos possuem uma única descarga de retorno e uma corrente de longa duração que após a descarga de retorno, percorre o canal produzindo uma redução do campo elétrico.

4.2.4 – Processo de Ligação

A cerca de 100 m do solo, quando os líderes escalonado e ascendente se encontram ocorre o **processo de ligação** definindo o **ponto de junção** e em seguida a primeira descarga. O que caracteriza a fase da DR é o aumento da corrente no solo, de um valor de 100 a 1000 A para valores da ordem de dezenas de kA em média, direcionada para a nuvem. Isso ocorre num intervalo de tempo de 1 a 20 μs , com um decaimento aos valores iniciais num intervalo de tempo de cerca de 200 a 500 μs , gerando um pulso que percorre a distância entre a Terra e a nuvem com uma velocidade da ordem de $1/3$ ou mais da velocidade da luz ($300 \times 10^6 \text{ m/s}$) diminuindo exponencialmente com a altura. Inicialmente, as cargas que fluem para o solo são aquelas que estão distribuídas na ponta do líder escalonado, sendo estas as responsáveis pelo primeiro pico da corrente da descarga de retorno. As cargas que estão depositadas ao longo do canal formando o envelope corona, colapsam para o centro do canal e daí para o solo, estabelecendo o pico da corrente corona e que faz surgir um segundo pico na forma de onda da corrente elétrica registrada no solo. Este segundo pico pode também receber contribuições da precipitação das cargas que foram depositadas nas ramificações durante o processo do LE.

4.2.5 – O Líder nos Relâmpagos Ascendentes

A descoberta de relâmpagos ascendentes é geralmente atribuída a McEachron (Uman, 1987). A maioria dos relâmpagos observados no Empire State Building na cidade de Nova York (EUA) era iniciada por um líder ascendente, cuja origem era a ponta da haste no topo do edifício, mas sem ocorrência de descarga de retorno. Hagenguth e Anderson (1952) registraram que a média máxima de corrente de longa duração em relâmpagos ascendentes é aproximadamente 250 A para um pico de 1440 A com um tempo de permanência destas correntes de longa duração chegando a alguns décimos de segundos. O maior tempo observado para este tipo de relâmpago, foi 1,5 s, sendo a metade destes, com tempo de ocorrência de 0,27s. McEachron (1938, 1939, 1940, 1941), citado por Uman (1987), observou que o líder negativo escalonado ascendente tinha um

comprimento médio de 8,2 m com uma variação de 6,2 m a 23 m. O intervalo de tempo entre os passos é em média de 30 μs com uma variação entre 20 μs e 100 μs .

Após o líder ascendente atingir a nuvem, uma corrente de longa duração circula pelo canal com uma descarga inicial que pode ser precedida por uma combinação de um líder contínuo descendente, com ou sem pulsos. Em aproximadamente metade das descargas ascendentes, a corrente é iniciada por uma corrente contínua seguida por descargas de retorno. Os relâmpagos ascendentes podem ser classificados segundo as características da forma da curva de corrente:

- Corrente de longa duração com valor médio de até 600 A, não ultrapassando 2000 A.
- Corrente de longa duração e superposição de pulsos próximos de 10 kA.
- Descarga inicial e a corrente de longa duração com uma ou mais descargas de retorno subsequente ascendente. (Entretanto, estes relâmpagos não possuem a primeira descarga de retorno, com a forma de onda se assemelhando às descargas subsequentes dos relâmpagos descendentes).

Os relâmpagos ascendentes são produzidos mais freqüentemente por líderes que iniciam a partir do topo de estruturas elevadas, tais como no Empire State Building, NY (McEachron, 1940; Hagenguth e Anderson, 1952), nas torres no Monte de San Salvatore na Suíça (Berger, 1967, 1975), na torre de Toronto no Canadá (Chang e Inan, 1985) e na torre do Morro do Cachimbo (Guedes, 2001). Segundo Berger (1967) os líderes ascendentes às vezes são imediatamente precedidos por descargas intranuvens, que em frações de segundo, fazem o campo elétrico no topo da estrutura dar início a um líder.

A Figura 4.3 mostra o esquema de evolução temporal do relâmpago negativo ascendente.

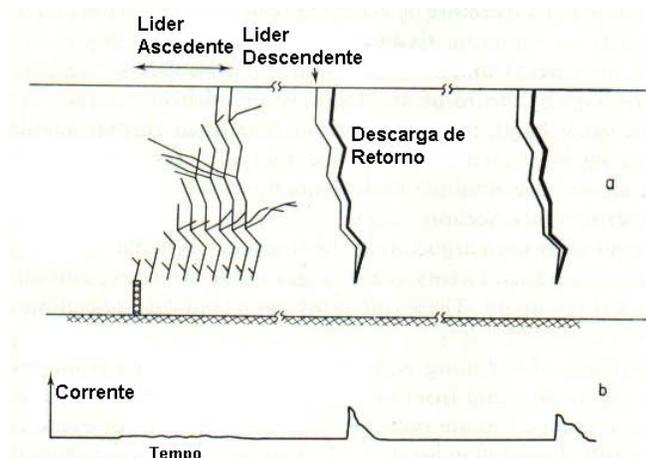


FIGURA 4.3 – Evolução temporal esquemática de um relâmpago ascendente; a) corrente de descarga de retorno; b) forma da corrente sem escala.

4.3 – Valores Típicos de Corrente da Descarga de Retorno

Berger et al. (1975) definiram vários parâmetros que poderiam ser aplicados na identificação de relâmpagos e suas descargas de retorno e subseqüentes, com base nas médias dos registros feitos em MSS desde 1943. Anderson e Eriksson (1980), com base nos registros de Berger et al (1975), definiram valores típicos de corrente de pico, carga transferida, tempos de duração das descargas e do relâmpago, máxima taxa de crescimento da frente de onda, intervalo de tempo entre descargas e a relação entre a energia dissipada e a resistência unitária. Kroninger (1974) digitalizou dados obtidos por Berger (1967). Os parâmetros usados nas definições das correntes de relâmpagos são:

- Corrente de pico (I_{pico});
- Taxa máxima de variação da corrente (di/dt_{max});
- Tempo de duração da frente de onda até que a onda atinja seu valor de pico (t_{pico});
- Tempo de decaimento da corrente até 50% do valor de pico ($t_{50\%}$); e
- Tempo de ocorrência da derivada máxima ($t_{di/dt max}$).

Estes parâmetros são utilizados como ponto de partida na modelagem analítica de corrente (Heidler et al., 1999) com maior importância quando acrescidos aos parâmetros que moldam a frente de onda, relacionando os tempos de subida e

de decaimento com valores da amplitude de corrente. No Brasil, foram feitos registros semelhantes de relâmpagos na estação do Morro do Cachimbo. Estes parâmetros foram calculados por Lacerda (1998), Schroeder (2001) e Guedes (2001), os dois últimos com uma base de dados maior, abrangendo o período de 1985 a 1998. Guedes (2001) também analisou cerca de 120 relâmpagos registrados por Berger no período de 1963 a 1971, com os registros das torres T1 e T2. Guedes digitalizou os dados separadamente e obteve valores médios para os picos das descargas de retorno nas torres T1 (42 relâmpagos) e T2 (49 relâmpagos) respectivamente. Valores médios e típicos (primeira descarga de retorno e descargas subsequentes) obtidos na Suíça, Brasil e Alemanha são mostradas na Tabela 4.1.

TABELA 4.1 – Valores Típicos de Parâmetros de Corrente.

LOCAL	I_{pico} [KA]	$(di/dt)_{\text{max}}$ [kA/ μ s]	t_{pico} [μ s]	$t_{(50\%)}$ [μ s]	$t_{di/dt\text{max}}$ [μ s]
Alemanha (Heidler, 1999)	5 – 30	12 – 120	0,2 – 4,5	-	-
MSS (Berger et al. 1975)	14 – 30	25 – 40	0,22 – 1,8	112	-
MSS (Kroninger, 1974)	14 – 30	12 – 40	0,8 – 1,2	-	-
MSS – T1 (Guedes, 2001)	14 – 29	4,28	2,7 – 23,4	150	6,64
MSS – T2 (Guedes, 2001)	10 – 29	3,29	3,2 - 12,5	140	4,95
MCS Shroeder, 2001	48,4	19,4	4,83 – 7,0	59,5	-
MCS Guedes, 2001	42,5	-	25	75	-
MCS (Lacerda, 1998; Guedes, 2001)	16 – 42,5	4,74 – 101	4 - 22	74 - 91	0,2 – 1,99

4.4 – Parâmetros de Corrente da Descarga de Retorno

As formas das curvas das correntes de relâmpagos determinam os tempos referentes à frente e ao decaimento da cauda da onda. Formas de ondas obtidas em medições de relâmpagos induzidos por foguetes são combinadas com os dados obtidos em torres para aplicar os resultados em modelos matemáticos de corrente de descarga de retorno.

Uma função de corrente que descreve analiticamente a forma da curva de corrente na base do canal deve permitir satisfatoriamente boa aproximação entre esta e a forma da curva observada em medições na base do canal.

Do ponto de vista da engenharia, é de grande importância que os cálculos dos parâmetros da corrente sejam fáceis e rápidos. Infelizmente, para calcular simultaneamente todos os parâmetros, para a maioria das funções consideradas na base do canal, é necessário resolver um sistema de quatro ou mais equações diferenciais não lineares, levando na maioria das vezes a soluções irrealis.

É diante desta necessidade que será introduzido a seguir, o conceito de uma expressão analítica empiricamente construída para modelar a corrente de uma descarga atmosférica.

4.5 – Função Analítica de Corrente da Descarga de Retorno

4.5.1 – Funções Aplicadas na Modelagem de Corrente de Descarga de Relâmpago

4.5.1.1 – Expressão de Corrente de Bruce e Golde

A expressão de corrente de descarga de retorno que foi desenvolvida por Bruce e Golde (1941) tem a forma de uma dupla exponencial, onde a corrente é instantaneamente uniforme do solo até a extremidade da frente da onda de corrente da descarga de retorno mostrada na Equação (4.1). A extremidade superior da descarga de retorno (frente do pulso) ascende através do canal com a velocidade " v_f ". Esta velocidade é válida para a primeira descarga de retorno (DR) e para a descarga subsequente (DS). Como a média do pico das correntes das descargas subsequentes é aproximadamente a metade da média das correntes de pico da primeira descarga, uma expressão semelhante para as descargas subsequentes pode ser obtida considerando a metade da corrente de pico da primeira descarga de retorno como mostrado na Equação (4.2). As Equações (4.1) e (4.2) são as funções de corrente propostas por Bruce e Golde

(1941) para reproduzir a forma de onda das correntes de uma descarga atmosférica.

$$I_t = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (4.1)$$

$$I_t = \frac{I_0}{2}(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (4.2)$$

Bruce e Golde (1941) estimaram, através de medições diretas, valores médios para as constantes α e β na base do canal, para uma corrente máxima de descarga de retorno de 30 kA. Os valores são mostrados na Tabela (4.2).

Pierce (1972) propôs novos parâmetros aplicáveis à função de corrente (Equações 4.1 e 4.2), sendo $\alpha = 2 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ e $\beta = 2 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ para uma corrente de pico 20 kA, considerando a velocidade variando exponencialmente com a altura ($v = v_0 e^{-\eta t}$), com a velocidade inicial $v_0 = 10^8 \text{ m/s}$ com a constante $\eta = 3 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$. Pierce e Cianos (1972) sugeriram a incorporação de uma segunda componente de corrente, com pico $I_{0i} = 2 \text{ kA}$, para representar a parcela de corrente que permanece no canal por um período de tempo mais longo e que pode chegar a algumas centenas de μs . Para isto eles introduziram as constantes γ e δ , também representados na Tabela (4.2), alterando a Equação (4.1) para:

$$I_t = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) + I_{0i}(e^{-\gamma t} - e^{-\delta t}) \quad (4.3)$$

As Figuras 4.4, 4.5 e 4.6 mostram as curvas de corrente usando os parâmetros propostos por Bruce e Golde (1941), Pierce (1972) e Pierce e Cianos (1972).

TABELA 4.2 – Valores Propostos para as Constantes Bruce e Golde (BG),
Pierce (P) e Pierce e Cianos (PC).

PARÂMETROS	UNID	DR		DS	
		BG	P e PC	BG	P e PC
I_0	kA	-30	-20	-15	-10
α	(s ⁻¹)	$4,4 \times 10^4$	2×10^4	$4,4 \times 10^4$	2×10^4
β	(s ⁻¹)	$4,6 \times 10^5$	2×10^6	$4,6 \times 10^5$	2×10^6
γ	(s ⁻¹)	-	10^3	-	10^3
δ	(s ⁻¹)	-	10^4	-	10^4

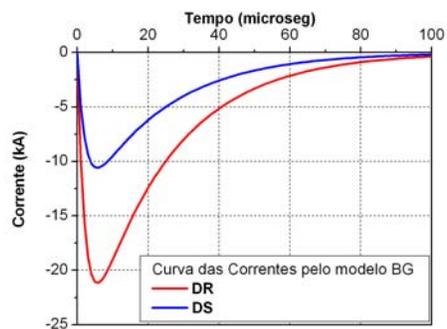


FIGURA 4.4 – Descargas de retorno (DR) e subsequente (DS) calculadas pelas equações (4.1) e (4.2) – Curva de correntes de BG (1941).

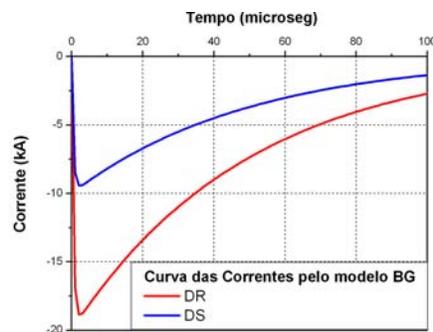


FIGURA 4.5 – Descargas de retorno (DR) e subsequente (DS) calculadas pelas Equações (4.1) e (4.2) – Curva de correntes proposta por Pierce (1972).

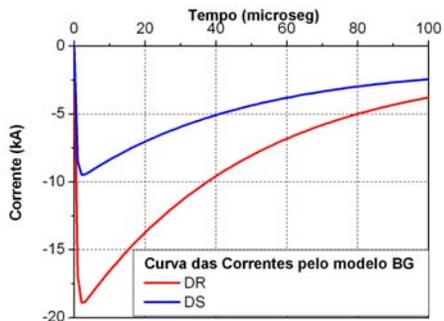


FIGURA 4.6 – Descargas de retorno (DR) e subseqüente (DS) calculadas pela Equação (4.3) – Curva de correntes proposta por Pierce e Cianos (1972).

4.5.1.2 – Outras Expressões de Correntes

Lin et al. (1979) descreveram a corrente, cuja expressão não será mostrada nesta tese, como a composição de componentes que envolvem uma parcela que corresponde ao pulso inicial que rompe a rigidez dielétrica do ar e uma outra parcela de corrente corona, acrescentando uma terceira parcela correspondendo à corrente uniforme no canal, representando a corrente contínua. A proposta de Lin et al. (1979) representa, num mesmo modelo, e, em uma única expressão, a expressão de corrente da Equação (4.3) sugerida por Pierce e Cianos (1972), para a incorporação de uma segunda componente de corrente, com valor de pico $I_{0i} = 2 \text{ kA}$, com a finalidade de representar uma componente da corrente que permanece no canal por um tempo maior que o pulso de corrente, identificada como a corrente corona. A representação da corrente corona e do pulso de corrente responsável pela quebra da rigidez dielétrica do ar como componentes da corrente de descarga de retorno, tornou-se eficiente e sua aplicação revelou-se uma ferramenta interessante para representar o comportamento espacial e temporal da corrente no canal.

Diante de situações extremas para representar a forma do pulso de corrente no canal, de um lado as funções de fácil manipulação mas com resultados inconsistentes e de outro lado funções como a expressão de corrente do modelo

de Lin et al. - mais eficiente e fisicamente coerente, porém, de manipulação complexa - muitas funções, métodos e técnicas numéricas já foram empregadas por diversos pesquisadores com o objetivo de contornar o problema da descontinuidade na origem.

Por exemplo, Raicic (1973), citado por Heidler et al. (1999), propôs uma expressão exponencial que reproduz a forma da curva de corrente sem descontinuidade na origem na primeira derivada:

$$i_0(t) = \frac{I_0}{\eta} \sqrt{\frac{\tau_1}{t}} \exp\left(-\frac{\tau_2}{2t}\right) \quad (4.4)$$

Heidler et al. (1999) cita também mais dois autores que modelaram correntes de descargas de retorno com duplas funções exponenciais, porém com os mesmos problemas de descontinuidade na origem, identificados na expressão de BG:

Gardner et al. (1985) propuseram a Expressão (4.5) e Jones (1997), a Expressão (4.6):

$$i_0(t) = \frac{I_0}{\eta} \left[\exp\left(-\frac{(t-\tau_1)}{\tau_2}\right) + \exp\left(\frac{t-\tau_1}{\tau_3}\right) \right]^{-1} \quad (4.5)$$

$$i_0(t) = \frac{I_0}{\eta} \left[\exp\left(-\frac{t^*}{\tau_1}\right) - \exp\left(-\frac{t^*}{\tau_2}\right)^2 \right] \quad (4.6)$$

onde $t^* = \frac{\tau_2}{\tau_1} + t$

A dupla exponencial da Equação (4.7) foi proposta por Kravtchenko (1991) citado por Shostack et al. (1999):

$$i_0(t) = \frac{I_0}{\eta} \left[\exp(-a_1 T(t)) - \exp(-a_2 (T(t))^2) \right] \quad (4.7)$$

onde $T(t) = \frac{a_1}{a_2} + t$

Estas expressões possuem fatores comuns que representam constantes de tempo de subida da frente do pulso de corrente e de decaimento do pulso a 50% do valor de pico, representados por τ_1 e τ_2 respectivamente. Uma terceira constante intermediária pode, no entanto, ser empregada com a finalidade de ajustar a forma do pulso convenientemente (τ_3). Com a finalidade de ajustar o valor da corrente máxima da função é empregado um fator de ajuste da corrente de pico. Este fator é ajustado de acordo com o caso e representado pelo fator η . Nestas expressões, as constantes de tempo também ajustam a taxa de variação da subida da frente do pulso de corrente. Não é objetivo demonstrar nesta Tese, como tais expressões foram definidas, uma vez que elas não serão empregadas nos cálculos.

4.5.2 – Função de Corrente de Heidler

Heidler (1985) propôs uma função analítica para a modelagem da corrente de descarga de retorno, que pode ser usada também em casos que envolvem surtos de tensão em sistemas de potências (usinas elétricas, subestações e linhas de transmissão de alta e extra-alta tensão), e em pesquisas que envolvem campos eletromagnéticos do canal de relâmpagos.

A expressão proposta por Heidler (1985) foi reapresentada por Heidler et al. (1999), considerando os estudos feitos por Lin et al. (1985), Diendorfer e Uman, (1990) e Thottappillil e Uman, (1994). A Função de Heidler (FH) é aplicada nesta Tese na modelagem das correntes de descarga de retorno dos relâmpagos na torre da estação do Morro do Cachimbo.

A corrente na base do canal do relâmpago pode ser expressa por duas componentes: o pulso da corrente que rompe a rigidez dielétrica do ar e a corrente corona que flui pelo canal, após o rompimento da rigidez dielétrica do ar.

Os processos desencadeados pelos líderes no canal do relâmpago, descritos em detalhe anteriormente, podem auxiliar a compreensão do modelo desenvolvido por Heidler (1985).

Vários trabalhos, como por exemplo Heidler (1985a, 1985b), Heidler e Hopf (1998), Heidler et al. (1999), Heidler et al. (2000) e Heidler et al. (2001), trataram da Função de Corrente para representar a corrente no canal, composta por duas porções governadas pela taxa de crescimento da frente do pulso da corrente ($x(t)$) e pelo tempo de decaimento da cauda do pulso ($y(t)$). A função analítica da corrente é então dada pela relação $i_0(t) = I_0 \max \cdot x(t) \cdot y(t)$, onde $I_0 \max$ é corrente de pico.

Durante o tempo de decrescimento da corrente, o valor da função de crescimento do pulso inicial é $x \approx 1$. Da mesma forma, o valor da função de decaimento é $y \approx 1$, durante o tempo de subida do pulso da corrente.

Para modelar a forma do pulso das correntes de descargas de retorno na base do canal, Heidler (1985), propôs uma função analítica, inicialmente na forma:

$$i_0(t) = \frac{I_0 \max}{\eta} \frac{k_s^n}{k_s^n + 1} e^{-t/\tau}$$

Onde,

$$x(t) = \frac{k_s^n}{(1 + k_s^n)}$$

e

$$y(t) = e^{-t/\tau_2}$$

sendo,

$$k_s = \frac{t}{\tau_1}$$

Nas expressões acima, η é o fator de correção para a corrente máxima. As constantes de tempo τ_1 e τ_2 determinam o tempo de crescimento e decaimento da corrente respectivamente, e “n”, o fator que considera o grau de derivada da corrente não nula.

Quando $t > 0$, $x(t) < 1$, então a corrente máxima torna-se menor que $I_0 \max$. Um fator de correção η é introduzido e o seu valor pode ser calculado pela relação:

$$i_0(t = t') = I_0 \max$$

onde t' é o tempo que a corrente atinge seu valor máximo $I_{0\max}$. Finalmente a expressão para a corrente na base do canal pode ser escrita na forma:

$$i_0(t) = \frac{I_{0\max}}{\eta} \frac{(t/\tau_1)^n}{[1 + (t/\tau_1)^n]} e^{-t/\tau_2} \quad (4.8)$$

Onde $I_{0\max}$ é a corrente de pico, η é o fator de correção para a corrente de pico, t é o tempo considerado, τ_1 é constante de tempo de frente de onda e τ_2 , constante de tempo de decaimento da onda. A equação (4.8) é conhecida como Função de Corrente de Heidler.

Nesta relação, a primeira derivada temporal da corrente no tempo $t=0$ é zero, e seu valor máximo se dá em um tempo $t>0$, condição satisfeita para o valor de $n > 1$.

O fator de correção η depende da relação $i_0(t=t') = I_{0\max}$ se o tempo t' for conhecido. Levando em consideração que o tempo t' pode ser obtido da condição de que $\frac{di_0(t)}{dt} = 0$ vem que:

$$k'_s + k'_s - n \frac{\tau_2}{\tau_1} = 0$$

onde,

$$k' = t'/\tau_1.$$

A solução analítica da expressão não pode ser dada em casos gerais onde $n > 3$. Assumindo no entanto que $k'_s \gg 1$, a expressão analítica transforma-se então em:

$$k'_s = \left(n \frac{\tau_2}{\tau_1} \right)^{1/(n+1)}$$

seguindo então que,

$$t' = \tau_1 \left(n \frac{\tau_2}{\tau_1} \right)^{1/(n+1)}$$

sendo t' simultaneamente, o tempo de crescimento da corrente na base do canal, isto é, $\tau_p = t'$, e o instante de tempo que a corrente atinge o pico que é definido pela relação entre τ_2 e τ_1 .

Considerando o grau “ n ” de derivadas não nulas que a função possa ter, então o fator de correção da corrente de pico η pode ser expresso por:

$$\eta = \exp\left[\frac{-\tau_1}{\tau_2} \left(n \frac{\tau_2}{\tau_1} \right)^{1/n+1}\right] \quad (4.9)$$

Obviamente para grandes valores de derivadas, $n \gg 1$ e $\tau_2/\tau_1 \gg 1$, o fator de correção assume o valor $\eta=1$.

- Derivada máxima da corrente de descarga.

A derivada máxima pode ser calculada diretamente da segunda derivada da função de corrente igual a zero no tempo $t = t_1$.

$$(d^2i/dt^2)_{t=t_1} = 0$$

Como o ponto em que a derivada máxima está no período de crescimento da frente de onda, pode-se assumir que $y(t) = 1$ (esta fase é identificada com o momento de crescimento da frente do pulso de corrente).

Da segunda derivada de $i(t)$ obtém-se:

$$t_1 = \tau_1 f_1, \text{ onde } f_1 = [(n-1)/(n+1)]^{1/n}.$$

Onde τ_1 é o instante em que a corrente possui sua máxima taxa de crescimento. Assim da relação anterior, tem-se que a derivada máxima da corrente é:

$$(di_0/dt)_{\max} = (I_0/\eta)(n/4\tau_1) f_2, \text{ onde } f_2 = (n^2-1)/n^2 [(n+1)/(n-1)]^{1/n}.$$

Para grandes valores de “n”, pode-se assumir que $f_1 = 1$. Da relação de “t₁” segue-se que $t_1 = \tau_1$. Neste caso, a derivada máxima da corrente é:

$$(di_0/dt)_{\max} = I_0 n / (4\tau_1 \eta), \quad n \gg 1.$$

A magnitude da corrente, quando esta atinge a máxima derivada, é:

$$i_0(t_1) = I_0 f_3 / \eta, \quad f_3 = (n-1)/(2n).$$

Várias relações entre as funções auxiliares f_1 , f_2 e f_3 podem ser estabelecidas, de forma que a relação $\tau_1/\tau_2 \gg 1$ e para grandes valores de n, o fator de correção $\eta = 1$ e $f_3 = 0,5$, de forma que a derivada máxima ocorra aproximadamente na metade do valor de pico da corrente.

4.6 - Aplicações Práticas da Função de Corrente de Heidler

4.6.1 - Aplicação 1

Em 1995 a Função de Heidler foi adotada pela norma internacional IEC61312-1, visando a padronização no nível de proteção I, da forma de onda para os cálculos das correntes das primeiras descargas de retorno e descargas subseqüentes, inclusive para aplicação na engenharia aeronáutica e nos estudos de transitórios produzidos por relâmpagos em aeronaves.

Heidler et al. (1999) analisaram as formas de onda das correntes de descargas de retorno e subseqüentes, aplicadas ao estudo de proteção de aeronaves contra transitórios produzidos por relâmpagos. Os valores dos parâmetros das Equações (4.8) e (4.9), aplicados aos cálculos destas formas de onda, são mostrados na Tabela (4.3).

TABELA 4.3 – Parâmetros Aplicados na Equação (4.8) que Originaram as Correntes de Descarga de Retorno e Subseqüente Padronizadas pela IEC.

PARÂMETROS	UNIDADE	DESCARGA DE RETORNO	DESCARGA SUBSEQÜENTE
$I_{o,max}$	kA	200	50
η	-	0,930	0,993
τ_1	μs	19,0	0,454
τ_2	μs	485	143

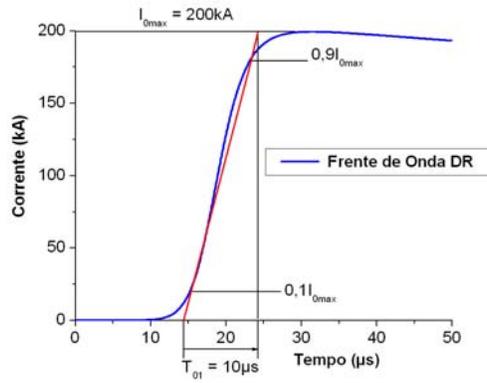
Com os valores da Tabela (4.3), foram obtidas as Figuras (4.7) e (4.8).

A Tabela 4.4 contém os valores característicos dos parâmetros das correntes reproduzidas pela Equação (4.8) e os parâmetros de corrente aplicados à engenharia, definidos por Berger et al. (1975) e Anderson e Eriksson (1980) retirados das Figuras 4.7 e 4.8.

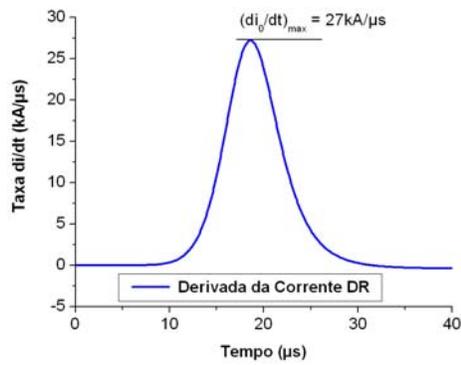
TABELA 4.4 – Parâmetros Característicos de Corrente Calculada pela Equação (4.8).

DESCRIÇÃO	UNIDADE	DESCARGA DE RETORNO	DESCARGA SUBSEQÜENTE
$I_{o,max}$	kA	200	50
$(di_o/dt)_{Max}$	kA/ μs	27	280
T_{01}	μs	10	0,25
T_{02}	μs	350	100
$Q_0 = \int i_o dt$	C	100	7,2
$A_0 = \int i_o^2 dt$	A ² s	1×10^7	$1,8 \times 10^5$

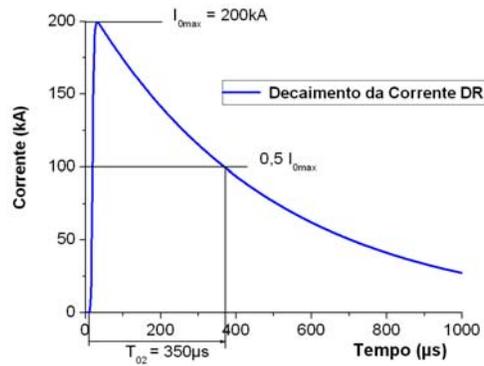
T_{01} = Tempo de frente de onda; T_{02} = Tempo de decaimento a 50% do valor de pico; $I_{o,max}$ = Corrente de pico; Q_0 = Carga; A_0 = Energia específica (W / R); $(di_o/dt)_{max}$ = máxima taxa de crescimento da corrente.



(a)

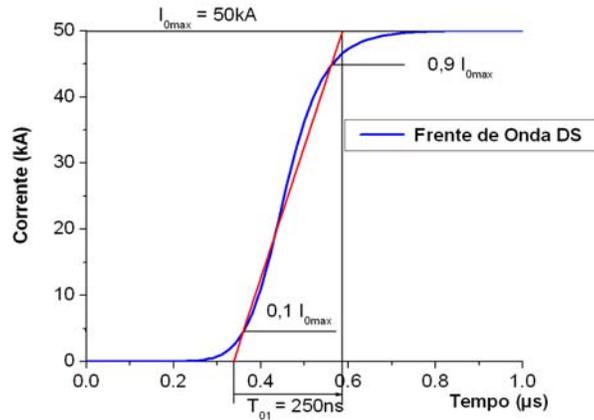


(b)

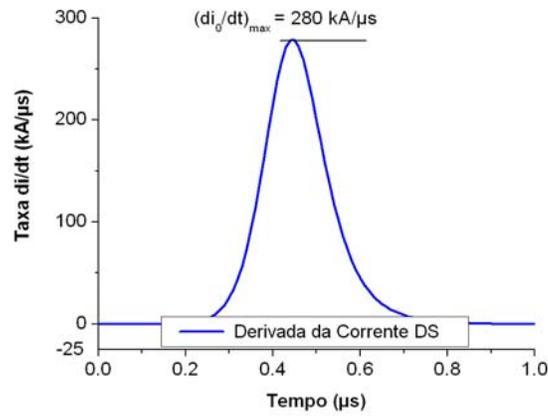


(c)

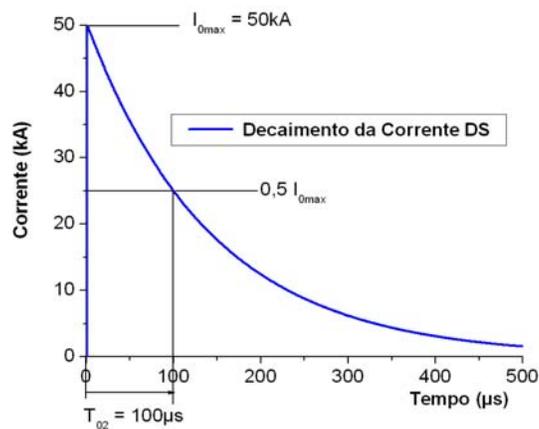
FIGURA 4.7 – Padronização da norma IEC61312 – 1, Nível 1 de proteção; a) Frente da curva de corrente DR; b) Derivada da curva de corrente DR; c) Decaimento da curva de corrente de DR.



(a)



(b)



(c)

FIGURA 4.8 – Corrente da descarga subsequente no ponto de junção de acordo com a norma IEC61312 – 1, Nível 1 de proteção; a) – Frente de onda da corrente DS; b) Derivada; c) Decaimento da corrente DS.

4.6.2 - Aplicação 2

A Tabela 4.5 mostra os parâmetros adotados na idealização das curvas de Corrente 1 e 2 aplicadas por Diendorfer e Uman (1990). Os resultados do modelo MDU, considerando duas formas de ondas de corrente modeladas pela função Heidler, foram usados nos cálculos de campos irradiados.

TABELA 4.5 – Parâmetros Utilizados por Diendorfer e Uman (1990).

PARÂMETROS	UNIDADE	MDU		MDU	
		CORRENTE 1		CORRENTE 2	
		I_{bd}	I_c	I_{bd}	I_c
$I_{o\max}$	kA	13	7	28	16
η	-	0,72	0,64	0,73	0,53
τ_1	μs	0,15	5	0,3	10
τ_2	μs	3	50	6	50

I_{bd} = componente de corrente em forma de pulso; I_c = componente de corrente corona.

A Figura 4.9 (a) e (b), mostra as formas de curvas de correntes originadas dos valores das Tabela (4.5), que correspondem aos valores típicos obtidos por Berger et al. (1975) e que representam, a) a descarga subsequente (Corrente – 1); e b) a descarga de retorno (Corrente – 2). As curvas representam a corrente na base do canal e são compostas por duas componentes, sendo um pulso de corrente que rompe a rigidez dielétrica do ar no canal e uma corrente corona, como proposto no modelo MDU.

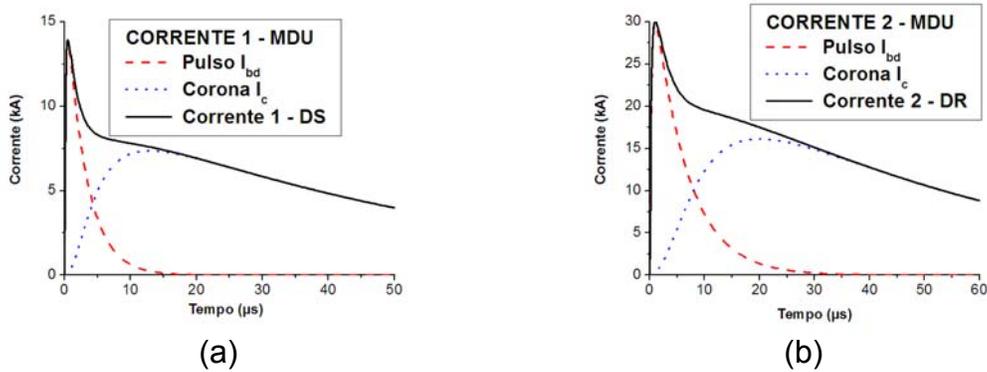


FIGURA 4.9 – Correntes na base do canal divididas em duas componentes – I_{bd} – Pulso de corrente e I_c – Componente corona - usadas no modelo MDU. (a) Corrente 1 – Descarga subsequente; (b) Corrente 2 - Descarga de retorno.

4.6.3 - Aplicação 3

Nucci et al. (1990) usaram uma combinação da Função de Corrente de Heidler Equação (4.8) com a dupla exponencial Equação (4.1), propondo a Equação (4.10), para validar os modelos de engenharia até então mais utilizados. Assim como Diendorfer e Uman (1990) fizeram, Nucci et al. (1990) procuraram definir as formas de onda de corrente, similares às formas de onda médias obtidas por Berger et al. (1975). A expressão em análise é particularmente conveniente para produzir resultados com formas de onda muito próximas da corrente medida na base do canal, porque ela permite variações nos valores da corrente de pico e da derivada máxima, apenas variando os parâmetros I_{0max} e τ_1 respectivamente.

$$i(0,t) = \frac{I_{01}}{\eta} \frac{(t/\tau_1)^2}{[1 + (t/\tau_1)^2]} e^{-t/\tau_2} + I_{02}(e^{-t/\tau_3} - e^{-t/\tau_4}) \quad (4.10)$$

A Tabela (4.6) mostra os parâmetros utilizados nas modelagens analíticas das correntes de Nucci et al. (1990).

TABELA 4.6 – Parâmetros Utilizados por Nucci et al (1990).

PARÂMETROS	UNIDADE	NUCCI ET AL	
		Corrente DR	
		I_H	I_{BG}
$I_{o,max}$	kA	9,9	7,5
η	-	0,845	-
τ_1	μs	0,072	-
τ_2	μs	5	-
τ_3	μs	-	100
τ_4	μs	-	6

I_H = Componente de corrente em forma de pulso (Função de Corrente de Heidler); I_{BG} = Componente de corrente corona (dupla exponencial).

Com uma amplitude de pico de 11 kA e uma derivada máxima de 105 kA/ μs , a corrente na base do canal foi escolhida por ser semelhante às correntes medidas em relâmpagos induzidos por foguetes, já que as mais recentes evidências sugerem que dados obtidos por torres podem ser subestimados, notadamente com respeito ao valor da máxima taxa de crescimento da corrente (exemplo: Weidman e Krider (1980), Uman et al. (1982), Leteinturier et al. (1990), Guerieri et al. (1998) e Guedes et al. 2002). Apesar disto, a forma de onda de corrente adotada nas condições acima descritas, tem uma forma similar às correntes de descargas subseqüentes observadas por Berger et al. (1975) em medições feitas nas torres da estação do Monte San Salvatore. Esta evidência considera que as formas de onda das correntes de relâmpagos induzidos se assemelham às descargas subseqüentes dos relâmpagos em torres.

A Figura (4.10) mostra os resultados obtidos por Nucci et al. (1990) na modelagem da corrente de descarga de retorno na base do canal, idealizadas para validar os modelos MBG, MTL, TCS e MTLE.

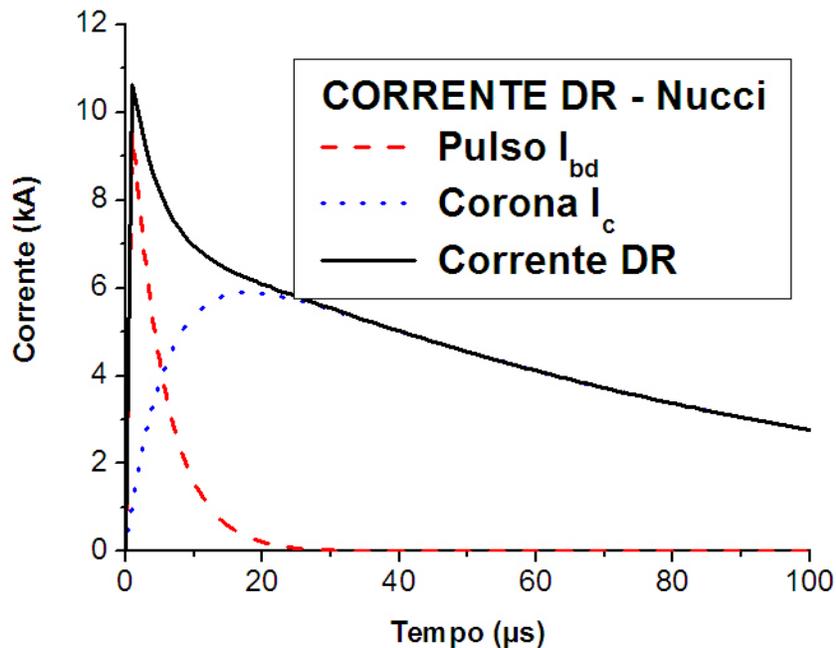


FIGURA 4.10 – Corrente de descarga de retorno na base do canal dividida em duas componentes – I_{bd} – Pulso de corrente e I_c – Componente corona - usadas por Nucci et al. (1990).

Pela aplicação prática da função de corrente (Equação 4.8) na representação das formas das curvas de correntes de descarga de retorno como demonstrado, esta função terá, nesta Tese, duas diferentes aplicações:

- a) será empregada na modelagem das curvas médias de correntes das primeiras descargas de retorno e das descargas subseqüentes, que foram obtidas em medições diretas na torre da estação do Morro do Cachimbo;
- b) será empregada na idealização de curvas de corrente em forma de pulso, para ser injetado nos topos das torres ou do canal de descarga, para simulações de medições de correntes no topo e na base das torres.

CAPÍTULO 5

CRITÉRIOS METODOLÓGICOS APLICADOS NO CÁLCULO DE CORRENTES EM TORRES

5.1 – Objetivo

O objetivo deste capítulo é definir os critérios metodológicos para a escolha de alguns parâmetros utilizados na reprodução gráfica das curvas de correntes medidas. Entre os parâmetros, os coeficientes de reflexão na torre merecem atenção especial, por não serem parâmetros mensuráveis, ou seja, são específicos para cada situação. As simplificações assumidas produzem certas limitações nos resultados, dependendo da abordagem. Estimar coeficientes de reflexão para simulação, também pode trazer limitações aos resultados. Porém, é possível minimizar os efeitos causados pela escolha dos coeficientes, fazendo simulações com diferentes pares de coeficientes. Para cada simulação, uma análise é feita no sentido de se confirmar a tendência dos resultados. Na medida que os resultados converjam para um comportamento que independe dos pares de coeficientes escolhidos, então as simulações cujos resultados fazem parte deste grupo, podem ser consideradas satisfatórias. No APÊNDICE B são mostradas simulações de correntes, com a aplicação de vários pares de coeficientes diferentes. Neste capítulo, são examinados os resultados de várias torres que mostram diferentes técnicas de estimação de coeficientes. Também neste capítulo, as curvas médias de corrente nas torres MCS e MSS são apresentadas e com base nelas, os parâmetros referentes aos tempos de subida de frente de onda e de decaimento são determinados. Será calculada a altura efetiva da torre do Morro do Cachimbo, aproveitando a estatística de relâmpagos ascendentes na torre. Finalmente, ainda neste capítulo, três trabalhos que abordam a questão de modelagem de corrente em torres são analisados.

5.2 – Formas de Pulsos de Corrente Utilizadas em Simulações de Correntes em Torres

Beierl (1992) analisou correntes medidas na torre de Peissenberg (Alemanha) aplicando uma corrente em forma de rampa para estimar valores medidos no topo e na base da torre.

Rakov (2001) fez uma análise do comportamento do transiente eletromagnético em torres, usando a função degrau de fácil manipulação. Rakov concluiu que a magnitude da corrente medida no topo e na base se aproxima assintoticamente da corrente injetada.

As funções utilizadas por Beierl (1992) e Rakov (2001), função rampa e degrau respectivamente, não reproduzem curvas similares à forma do pulso de corrente que percorre o corpo da torre no momento de uma descarga atmosférica. Facilitam, no entanto, uma análise rápida do transiente eletromagnético e das amplitudes das correntes nos tempos de tráfego na torre.

Quando a preocupação do analista é avaliar o comportamento transitório na torre, as funções rampa e degrau não são eficientes (a derivada de uma função rampa é uma reta até o momento que a rampa atinge o regime permanente e para $t > t_{\text{pico}}$ a derivada é nula e da função degrau é nula, para $t' > 0$ e para $t' < \infty$, e igual ao impulso para $t' = t$).

Em geral, identificar a derivada máxima da corrente durante o processo transitório é mais fácil que identificar picos da corrente, porque a curva da derivada possui picos mais nítidos. O processo transitório se estabelece no intervalo de tempo entre o momento que a onda começa a subir (frente de onda) e o momento que a onda atinge o valor máximo (valor de pico).

Relâmpagos acontecem ao ar livre e as condições definidas em laboratório fornecem importantes indicadores, mas não podem repetir com precisão as condições externas, tais como vento, umidade, condutividade do ar, pressão atmosférica enfim, todos os parâmetros termodinâmicos importantes na análise do fenômeno. A aplicação de formas de ondas tipo rampa e outras nas avaliações, servem no entanto, para fazer uma aproximação da realidade, auxiliando os cálculos, fornecendo subsídio e indicando os rumos a seguir.

É de significativa importância se obter uma forma analítica do pulso de corrente que se aproxime da corrente de descarga de retorno medida. Assim, a função de corrente de Heidler escolhida para a modelagem analítica,

consegue melhor reproduzir a forma do pulso de corrente se comparada com as demais funções já citadas.

Nas correntes das descargas subseqüentes, geralmente quando a derivada é medida no topo da torre, a chegada ao topo da onda refletida na base da torre exibe um segundo pulso, separado do primeiro pulso da derivada máxima, pelo tempo de ida e volta necessário para a onda de corrente trafegar pelo corpo da torre, com uma velocidade próxima da velocidade da luz. Esta característica é vista apenas, se o tempo de subida da frente do pulso de corrente incidente for menor que o tempo de tráfego da onda. Assim, tem-se uma condição importante para que a análise possa ser feita considerando a torre do Morro do Cachimbo, com apenas 60 m de altura.

5.3 – Curvas de Correntes Medidas em MCS

Lacerda (1998) obteve uma média aritmética das 22 curvas de correntes registradas até o ano de 1994 na estação do MCS, conforme mostrado na Figura 5.1. A curva central representa o valor médio, enquanto as curvas acima e abaixo representam o valor médio acrescido do desvio padrão com sinal positivo e negativo respectivamente. As demais curvas representam as curvas de corrente da amostra. A escala logarítmica foi utilizada para evidenciar a tendência a um comportamento exponencial da curva média.

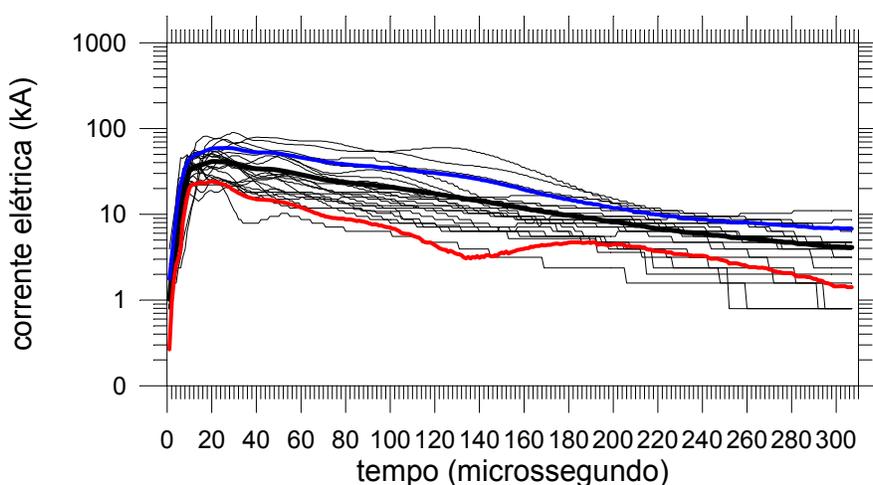


FIGURA 5.1 - Curva média da corrente da primeira descarga de retorno.

FONTE: Lacerda (1998 p. 74).

Guedes (2001) calculou e comparou as curvas médias das descargas de retorno e subseqüentes de relâmpagos negativos descendentes registrados na estação do Morro do Cachimbo no período que vai de 1985 a 1998 utilizando 29 curvas com um total de 89 descargas, 60 destas, consideradas subseqüentes. As curvas médias de correntes das estações MCS, como na estação MSS, foram consideradas no intervalo de registro de medição de 150 μ s.

Em todas as curvas, o valor inicial da corrente em $t = 0$ foi ajustado em 1 kA para evitar que a fase inicial de circulação de corrente contínua que flui pelo canal do relâmpago antes da descarga de retorno possa interferir no tempo de subida da frente de onda. Isto porque em alguns registros, a corrente contínua circula no canal por várias centenas de μ s, com amplitude menor que 1 kA.

O erro padrão (EP) das curvas médias foi calculado para definir o intervalo de confiança de 68,27%. Este intervalo foi obtido somando e subtraindo o EP da curva média.

As Figuras (5.2) e (5.3) mostram respectivamente, as curvas médias da primeira descarga de retorno e das descargas de retorno subseqüentes, designadas doravante como curvas experimentais.

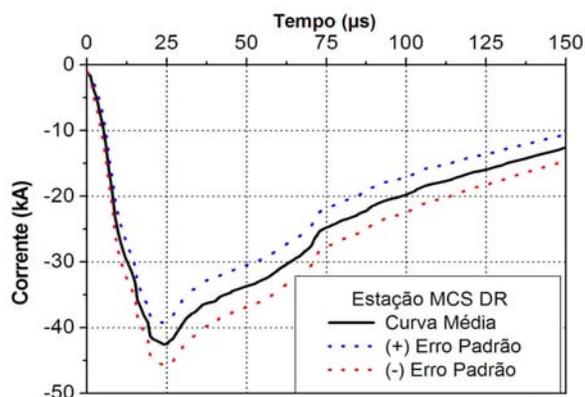


FIGURA 5.2 – Curva média experimental de descarga de retorno da estação do Morro do Cachimbo.

FONTE: Guedes (2001).

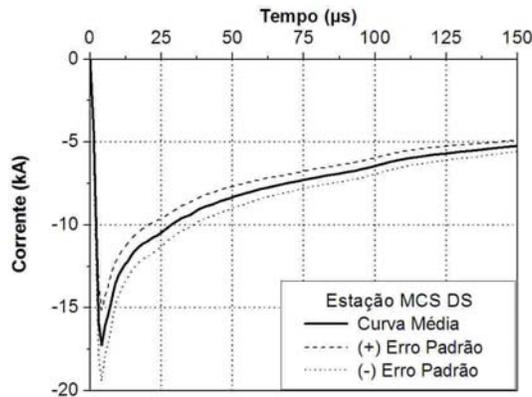


FIGURA 5.3 – Curva média experimental das descargas subsequentes da estação do Morro do Cachimbo.
 FONTE: Guedes (2001).

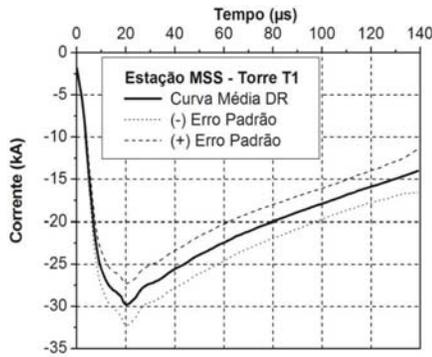
5.4 – Curvas de Correntes Medidas em MSS

Guedes (2001) realizou um levantamento de cerca de 120 dos relâmpagos registrados na estação MSS, no período entre 1963 e 1971, e digitalizou as curvas de corrente de descargas nas torres individualmente e calculou as curvas médias para cada uma das torres.

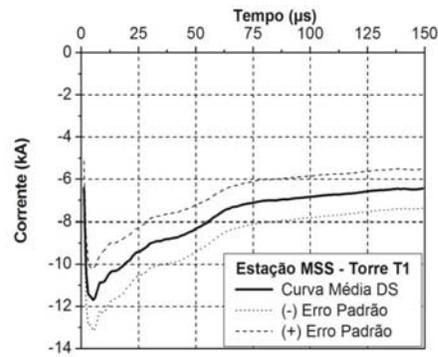
Berger e Anderson (1975) calcularam as curvas médias das correntes de descarga de retorno, não considerando os eventos por torre, calculando uma curva média que se presume representar as médias das duas torres conjuntas.

As curvas médias de correntes das estações MSS foram consideradas no intervalo de registro de medição de $150\mu\text{s}$.

As Figuras (5.4) e (5.5) mostram as curvas médias que serão designadas doravante como curvas experimentais.

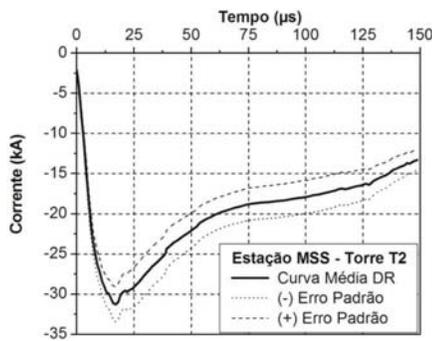


(a)

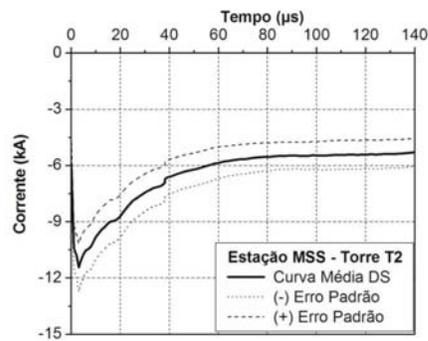


(b)

FIGURA 5.4 – Curva média experimental no topo da torre T1 da estação MSS. (a) Corrente DR; (b) Corrente DS.



(a)



(b)

FIGURA 5.5 – Curva média experimental no topo da torre T2 da estação MSS. (a) Corrente DR; (b) Corrente DS.

5.5 – Parâmetros de Curvas de Correntes nas Torres MCS e MSS

5.5.1 – Estação do Morro do Cachimbo

Nas formas de onda das Figuras 5.6 e 5.7 foram determinados os tempos T_{01} e T_{02} , relacionados com os tempos necessários para a corrente atingir o pico máximo e, em seguida, reduzir a sua amplitude a 50% do valor de pico máximo, respectivamente.

Das curvas médias calculadas por Guedes (2001), são retirados os parâmetros de corrente similares aos definidos por Anderson e Eriksson, 1980. Estes parâmetros são adotados na modelagem das correntes e são mostrados na Tabela (5.1). Apenas serão consideradas válidas, as curvas

modeladas que estiverem dentro da faixa de erro padrão que define o intervalo de segurança.

TABELA 5.1 – Parâmetros característicos de corrente obtidos das curvas médias de descarga de retorno e subsequente da estação do morro do cachimbo.

DESCRIÇÃO	UNIDADE	DESCARGA DE RETORNO	DESCARGA SUBSEQÜENTE
I_{0max}	Ka	- 42,5	- 17,3
$(di_0/dt)_{max}$	kA/ μ s	4,7	6,4
T_{01}	μ s	17	4
T_{02}	μ s	91	44
$Q_0 = \int i_0 dt$	mC	- 5,6	-1,85
$A_0 = \int i_0^2 dt$	A^2s	$1,2 \times 10^5$	$0,1 \times 10^5$

T_{01} = Tempo de frente de onda; T_{02} = Tempo de decaimento a 50% do valor de pico; I_{0max} = Corrente de pico; Q_0 = Carga; A_0 = Energia específica (W/R); $(di_0/dt)_{max}$ = máxima taxa de crescimento da corrente.

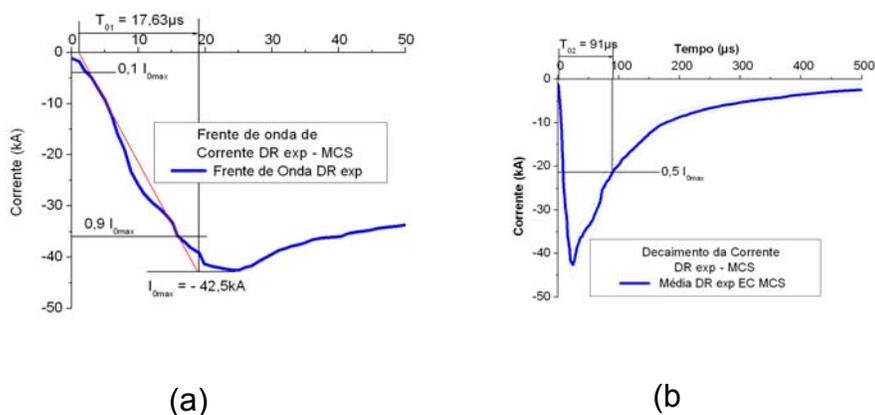


FIGURA 5.6 – Curva média de corrente da primeira descarga de retorno na base da torre da estação MCS. (a) Frente de onda da corrente DR; (b) Decaimento da corrente DR.

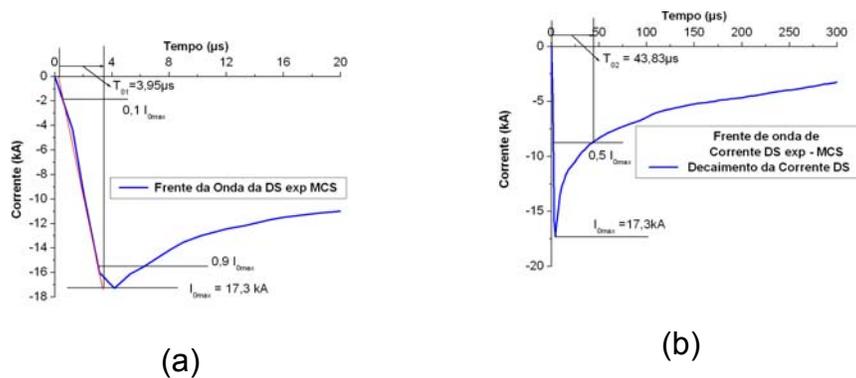


FIGURA 5.7 – Curva média de corrente de descarga de retorno subsequente na base da torre da estação MCS. (a) Frente de onda da corrente DS; (b) Decaimento da corrente DS.

5.5.2 – Estação do Monte San Salvatore

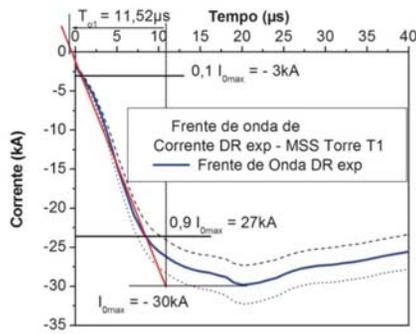
Nas torres T1 e T2 da estação do Monte San Salvatore, os parâmetros das correntes são determinados, retirados diretamente das curvas experimentais das Figuras 5.8 e 5.9, respectivamente.

Os valores então obtidos são representados na Tabela 5.2.

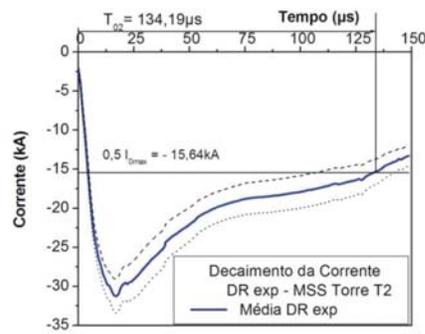
TABELA 5.2 – Parâmetros Característicos Obtidos nas Curvas Médias de Correntes da Estação Monte San Salvatore – Torres T1 E T2.

DESCRIÇÃO	UNIDADE	DESCARGA DE RETORNO		DESCARGA SUBSEQÜENTE	
		T1	T2	T1	T2
I_{0max}	KA	- 29	- 29	- 11,32	- 11,64
$(di_0/dt)_{max}$	kA/μs	-3,45	- 3,54	- 5,78	- 7,85
T_{01}	μs	15	15,64	3,58	2,62
T_{02}	μs	130,38	134,19	>150	65,15
$Q_0 = \int i_0 dt$	MC	- 2,87	- 2,42	-1,14	-0,92
$A_0 = \int i_0^2 dt$	A ² s	$0,6 \times 10^5$	$0,6 \times 10^5$	-	-

T_{01} = Tempo de frente de onda; T_{02} = Tempo de decaimento a 50% do valor de pico; I_{0max} = Corrente de pico; Q_0 = Carga; A_0 = Energia específica (W/R); $(di_0/dt)_{max}$ = máxima taxa de crescimento da corrente.

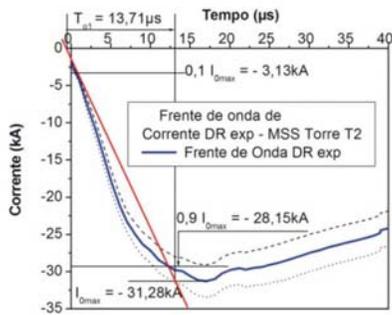


(a)

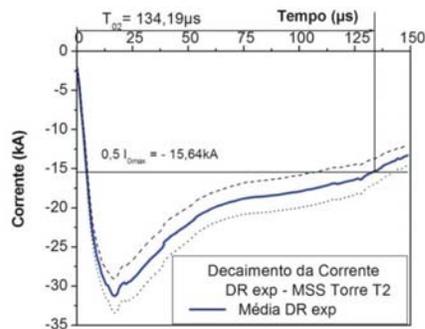


(b)

FIGURA 5.8 – Curva média de corrente de descarga de retorno da torre T1 da estação MSS. (a) Frente de onda da corrente DR; (b) Decaimento da corrente DR.



(a)



(b)

FIGURA 5.9 – Curva média de corrente de descarga de retorno da torre T2 da estação MSS. (a) Frente de onda da corrente DR; (b) Decaimento da corrente DR.

5.6 - Análise das Curvas de Correntes das Estações MCS e MSS

O tempo que uma onda de corrente leva para trafegar ida e volta com velocidade da luz pela torre MCS é $2\tau_T = 2 \times 0,2\mu\text{s} = 0,4\mu\text{s}$ (400 ns) e 467 ns nas torres MSS.

O intervalo de tempo de subida da frente do pulso (T_{01}) para a estação MCS é de $17\mu\text{s}$ para a DR e $4\mu\text{s}$ para a DS. O tempo de subida da frente do pulso (T_{01}) para a estação MSS é aproximadamente $15\mu\text{s}$ (DR) para ambas as torres e $3,58\mu\text{s}$ e $2,62\mu\text{s}$ (DS) nas torres T1 e T2 respectivamente.

Os tempos de subida investigados são, portanto, maiores que o tempo de tráfego da onda através do corpo das torres MCS e MSS.

A taxa de variação da corrente é mais alta nas descargas subseqüentes se comparadas às primeiras descargas de retorno.

Os parâmetros associados ao tempo de frente do pulso, tais como, T10 e T30, na definição de Anderson e Eriksson (1980), são maiores nas curvas medidas na torre do Morro do Cachimbo que nas curvas do Monte San Salvatore.

As taxas de crescimento da frente do pulso de corrente também são menos intensas nas torres do Monte San Salvatore onde as medições são feitas no topo.

5.7 – Comentários sobre os Parâmetros Obtidos nas Curvas

Experimentais

Os dados registrados em três torres fornecem para aplicação, os parâmetros de corrente da primeira descarga de retorno e subseqüentes, obtidos pelas médias calculadas para as curvas de relâmpagos negativos descendentes. São medidas realizadas em locais bem diferentes, onde as condições meteorológicas e atmosféricas não se repetem.

Guedes (2001) comparou os resultados de medições realizadas nas estações MCS localizada em baixa latitude $20^{\circ} 00' 39''\text{S}$, $43^{\circ} 58' 26''\text{O}$, e MSS localizada em alta latitude $45^{\circ} 59'\text{N}$, $8^{\circ} 57'\text{L}$. Guedes concluiu que os valores de maiores amplitudes foram registrados nas estações localizadas em baixa latitude.

Conclusões semelhantes aplicáveis à estação do Morro do Cachimbo foram obtidas por Lacerda (1998) e Schroeder (2001).

A explicação para as diferenças nas médias e medianas em questão, considerava a diferença na posição dos centros de cargas nas nuvens, configurada pela altitude da isoterma de 0°C . Em regiões tropicais, o centro de cargas negativas na nuvem de tempestade localiza-se em alturas mais elevadas e como o canal é mais longo, mais cargas são armazenadas pelo líder.

Os resultados obtidos em MCS apontam para médias e medianas mais altas que os valores de Berger et al. (1975). O interesse em conhecer os fatores que influenciam as medições, não restringindo ao comprimento do canal, direcionou os estudos às condições em que as medições são feitas em cada torre. Resta assim, avaliar se as diferenças podem ser também justificadas pela posição dos sensores no corpo das torres com suas diferentes alturas de montagem.

Melander (1984) comparou resultados de Berger et al. (1975) e de Eriksson (1978), e concluiu que as correntes medidas nos sensores localizados no topo da torre apresentavam resultados mais próximos das correntes de descarga de relâmpagos naturais. Em torres nas quais os sensores são posicionados na base, as correntes medidas são mais intensas que as correntes de relâmpagos naturais.

Na seção 5.10 os resultados dos trabalhos de Melander (1984), Shostack et al. (1999) e de Schoreder (2001) são analisados.

5.8 – Determinação de Coeficientes de Reflexão de Ondas

5.8.1 – Considerações

Na análise dos dados obtidos em torres, dentre várias, duas importantes características devem ser avaliadas, a saber:

a) a altura da torre, que é comparada com o comprimento de onda de corrente (conseqüência da freqüência fundamental da onda de corrente incidente na torre).

b) os coeficientes de reflexão na base e topo da torre.

Os coeficientes de reflexão são parâmetros que não são medidos diretamente, mas obtidos individualmente para cada evento, desde que o tempo de frente de onda seja menor que o tempo de tráfego da torre. Uma das maneiras de se obter os valores dos coeficientes para uma determinada torre, é a avaliação de medições de corrente nas formas temporal e derivada, em pelo menos duas posições na torre. Com base nos dados experimentais, é possível identificar os tempos de tráfego de onda pelo corpo da torre e então, fazer uma estimativa dos valores dos coeficientes de reflexão na base

e no topo da torre. Na torre MCS é necessária a definição de critérios para estimar valores confiáveis de coeficientes de reflexão, o que será feito nesta seção.

5.8.2 – Espectro de Freqüência

O espectro de freqüência das correntes de descarga de retorno de relâmpagos em torres ocupa uma faixa que vai de valores muito baixos, quase nulos (correntes contínuas), a freqüências elevadas em torno de dezenas de megahertz. Por esta razão, a onda de corrente da descarga de retorno pode ser vista como sendo uma superposição de um grande número de componentes, onde cada uma tem comprimento de onda $\lambda = cf^{-1}$ sendo “c” a velocidade da luz no vácuo e “f” a freqüência em hertz. Normalmente, para ondas cujos comprimentos sejam iguais ou menores que a altura da torre “h”, a estrutura da torre comporta-se como um circuito distribuído para esta dada faixa de freqüência. Como resultado, correntes impulsivas medidas nestas estruturas podem ser influenciadas pelos transientes na estrutura.

5.8.3 – Coeficientes de Reflexão Observados em Torres

Segundo Rakov (2001), foram observadas diferentes formas de onda de correntes de relâmpagos na torre de Ostankino de 540 m de altura, situada em Moscou em alturas de 47, 272 e 533 m. Os valores médios das correntes de pico nas alturas de 47 e 533 m foram de 18 e 9 kA, respectivamente. A diferença no valor de pico observada, sugere que a efetiva impedância de aterramento da torre é muito menor que a impedância característica da torre e que esta é apreciavelmente menor que a impedância equivalente do canal do relâmpago.

$$Z_{gr} \text{ (efetiva)} \ll Z_T \text{ (característica)} < Z_{ch} \text{ (equivalente)}$$

As formas de onda registradas próximo do topo da torre de Ostankino, nos casos em que tempo de frente da onda de corrente foi menor que o tempo necessário para a onda de corrente deslocar-se do topo até a base com a velocidade da luz (com tempo de percurso de $2\tau_T = 3,5\mu s$), foram usadas para estimar a impedância equivalente do canal do relâmpago (Z_{ch}). As estimativas da impedância do canal na torre de Ostankino indicaram valores

que variavam de 600 Ω a 2,5 k Ω , enquanto a impedância característica da torre (Z_T) foi estimada em 300 Ω e a resistência de aterramento considerada nula ($Z_{gr} = 0$) (para corrente em baixa tensão e em baixa frequência, o valor da resistência de aterramento é aproximadamente 0,2 Ω).

$Z_T = 300 \Omega \Rightarrow 600 \Omega < Z_{ch} < 2,5 \text{ k}\Omega$ assim vale a relação $Z_{ch} = 3Z_T$
A razão entre a impedância equivalente do canal do relâmpago (Z_{ch}) e a impedância característica da torre (Z_T) apresentou um valor médio de 3,3 na torre de Ostankino.

Beierl (1992) estimou para a torre de Peissenberg de 160 m de altura, localizada próximo de Munique na Alemanha, valores de coeficientes de reflexão da corrente medida na base, próximos da unidade e em medidas no topo, em torno de -0,5. Este último coeficiente implica que a impedância equivalente do canal do relâmpago é cerca de 3 vezes maior que a impedância característica da torre, consistente com os valores de Ostankino (Rakov 2001).

Fuchs (1998) mediu simultaneamente 13 descargas de retorno na torre Peissenberg, encontrando coeficientes de reflexão com valores médios de 0,70 na base e -0,53 no topo, com uma faixa de variação de 0,64 a 0,81 e de -0,39 a -0,68 na base e no topo da torre, respectivamente.

Em resumo, na Alemanha (Torre de Peissenberg):

$$0,64 < \rho_{tb} < 0,81$$

$$-0,39 < \rho_{tt} < -0,68$$

Estes resultados estão de acordo com os resultados obtidos na torre de Ostankino, embora sejam torres muito diferentes na estrutura e na localização.

Os coeficientes de reflexão de correntes de DR's estimados tanto na base quanto no topo da torre Peissenberg, aparentemente não dependem nem da corrente de pico que varia de 1 a 8 kA, nem da máxima taxa de crescimento da frente de onda de corrente que, por sua vez, varia de 5 a 60 kA/ μ s (Rakov 2001).

Na torre CN no Canadá, coeficientes de reflexão foram estudados por Janischewskyj et al. (1996). Com base em 5 medições feitas a 474 m de altura e com modelagem matemática, coeficientes de reflexão médios foram

estimados na base e no topo da torre: 0,40 a -0,37, respectivamente. Neste caso, os coeficientes de reflexão na base variaram de 0,34 a 0,43, enquanto que no topo, a variação foi de -0,27 a -0,49.

Em resumo, no Canadá (Torre CN):

$$0,34 < \rho_{tb} < 0,43$$

$$-0,27 < \rho_{tt} < -0,49$$

A média da razão entre a impedância equivalente do canal e a impedância característica da torre CN é de 2,2. Janischewskyj et al. (1996) consideraram a torre CN como uma linha de transmissão sem perdas.

Estes resultados sugerem que a inclusão de reflexões nos pontos de descontinuidade na torre pode alterar os coeficientes de reflexão estimados nas extremidades da torre.

Schroeder (2001) modelou o aterramento real da torre da estação do Morro do Cachimbo. Várias resistividades do solo foram experimentadas para modelar o sistema de aterramento da torre. Os valores escolhidos foram 1000, 2000, 4000, 5000 e 8000 $\Omega.m$. Em regime permanente, a resistência equivalente do sistema de aterramento ($Z_{gr} = R_T$) da torre do Morro do Cachimbo pode ser calculada com base em Visacro (1998), considerando valor final estacionário. O cálculo do coeficiente de reflexão na base da torre, com base nestas considerações, é mostrado na Tabela (5.3).

Segundo Schroeder (2001), a resistividade do solo na região da estação do Morro do Cachimbo possui um valor típico de 5000 $\Omega.m$ e, considerando a impedância da torre variando entre 150 Ω e 450 Ω (Schroeder considerou $Z_T = 150 \Omega$ e $Z_T = 480 \Omega$) é possível aferir um valor médio para o coeficiente de reflexão na base da torre de aproximadamente $\rho_{tb} = 0,545$.

Em resumo, em regime permanente, no Morro do Cachimbo:

$$0,36 < \rho_{tb} < 0,73$$

TABELA 5.3 – Coeficiente de Reflexão na Base da Torre do Morro do Cachimbo (Admitindo $Z_{gr} = R_T$).

DESCRIÇÃO		COEFICIENTE DE REFLEXÃO(P_{TB})	
		IMPEDÂNCIA DA TORRE	
RESISTIVIDADE ($\Omega.m$)	RESISTÊNCIA DO SOLO(Ω)	$R_T = 150 \Omega$	$R_T = 450 \Omega$
1000	14	0,83	0,94
2000	28	0,69	0,88
4000	56	0,46	0,78
5000	70	0,36	0,73
8000	112	0,15	0,60

Fuchs (1998) concluiu que os coeficientes de reflexão na base e no topo da torre Peissenberg eram aparentemente independentes do valor de pico da corrente e da máxima taxa de variação da corrente.

Rakov (2001), analisando os efeitos transitórios sobre correntes medidas em torres, considerou que a impedância equivalente do canal, durante o processo de junção dos líderes, depende da impedância no ponto de junção ou da proximidade deste à torre e que depois de estabelecida a junção dos líderes, a impedância equivalente do canal é a mesma que a sua impedância característica, assumindo que a impedância do solo, vista deste ponto, é puramente resistiva. Para isto, foram desprezados os efeitos não lineares que poderiam interferir nos valores destes parâmetros. Concluiu ainda que, se a corrente de descarga fosse considerada injetada por uma fonte de corrente ideal ($Z_{ch} = \infty$), então a corrente medida no nível do solo seria sempre igual a corrente de curto – circuito da fonte e independente da impedância do solo Z_{gr} ou seja, independente das condições no ponto de junção dos líderes. Na presença de torre elevada, no caso de $Z_{ch} = \infty$, a torre não afeta a corrente medida no topo.

As torres elevadas, localizadas em altas latitudes e em regiões mais úmidas onde a isoterma de zero grau está localizada em alturas menores, podem ser comparadas a um “jumper” entre a nuvem e o solo, transformando o conjunto canal-torre, em um condutor. Tal comparação não pode ser feita para torres

de baixas alturas, tais como a torre do Morro do Cachimbo. Na região da torre de MCS o centro de carga da nuvem de tempestade localiza-se em maior altitude. Neste caso, a altura da torre de 60 m é muito inferior à extensão do canal do relâmpago, estimada entre 7000 a 10.000 m.

No caso de MCS, a impedância do canal pode não acompanhar a relação encontrada por Rakov (2001). Porém na falta de informações precisas, é razoável adotar esta relação nas simulações.

Na realidade Z_{ch} varia numa faixa de centenas a vários $k\Omega$, constatado pelas observações de Rakov (2001). Por outro lado, Rakov et al. (1998) mostraram que a corrente de descarga de retorno de relâmpagos induzidos, medida em uma estrutura com sua base enterrada no solo sob diferentes condições de aterramento (inclusive sem malha de aterramento), eram similares, sugerindo que o relâmpago é capaz de abaixar o valor da impedância do solo para valores que são muito menores que a impedância do canal. Esta redução da impedância do solo é aparentemente facilitada pelo desenvolvimento do canal ionizado ao longo do solo e da sua superfície.

Portanto, a impedância de aterramento seja no regime permanente, ou no regime transitório, pode assumir valores constantes que independem de processos não lineares advindos da presença da estrutura da torre.

Em consequência desta conclusão, Rakov (2001) definiu a corrente “sem distúrbios” e “não atenuada pelos processos transitórios”, como aquela que seria medida na base do canal no solo ideal, sem a presença de estruturas aterradas. Pode ser também interpretada como a corrente que seria medida numa torre, se o coeficiente de reflexão no topo fosse nulo e na base fosse igual a 1. Esta condição impõe que a impedância do solo seja nula e que a da torre, por sua vez, seja igual à do canal.

Em termos práticos é possível baixar a impedância do solo a valores mínimos, ou alterá-la de forma que seja maior ou menor que a impedância da torre, dependendo da necessidade operacional. Porém, a impedância do canal não depende da vontade humana.

A consideração de corrente não contaminada remete a análise a uma condição ideal. O que se deseja é justamente conhecer o quanto a presença da torre pode influenciar as medições de correntes, sejam elas feitas na base ou no topo da torre. Não é possível desprezar a torre e o aterramento desta,

porque os dados foram adquiridos justamente pela aplicação de torre instrumentada, como no caso da torre do Morro do Cachimbo. O que pode ser inferido é que os sensores montados no corpo da torre podem influenciar os valores registrados, dependendo da altura de montagem.

Por conseguinte, o que se deseja é verificar a influência do sistema nos valores medidos, tendo como ponto de partida medidas na base da torre. Os resultados obtidos deverão ser confirmados em trabalhos posteriores por medições simultâneas na base e no topo.

Aparentemente, pode parecer inconsistente a comparação de coeficientes de reflexão na base (ρ_{tb}) e no topo (ρ_{tt}) de torres diferentes. Mas pode-se aceitar que os valores dos coeficientes de reflexão variam numa faixa que pode ser apenas para fins de avaliação dependendo no entanto, de futura validação, aceita como:

$$\rho_{tb} = 0,5 \text{ e } \rho_{tt} = -0,5$$

Nas simulações de corrente, estes são os valores adotados para os coeficientes de reflexão na base e no topo das torres MCS e MSS.

5.9 - Altura Efetiva da Torre do Morro do Cachimbo

O ponto de junção localiza-se a uma distancia acima do topo da torre, mas é menos provável que ocorra no topo. O conhecimento da distância de atração, assim como a determinação da altura do ponto de junção no canal de descarga, são parâmetros importantes no estudo do comportamento das torres - a distância de atração, que depende da geometria do canal, é um importante parâmetro no estudo de proteção contra descargas atmosféricas, porque define o raio de atração entre os líderes e permite o desenvolvimento de técnicas adequadas para instalação de hastes protetoras na blindagem contra descargas atmosféricas. Adicionalmente, são subsídios na concepção dos cenários em simulações de correntes em torres.

A distância de atração, para dois relâmpagos negativos descendentes, analisados a partir de medições experimentais na torre do Morro do Cachimbo calculada por Eriksson resultou em 121 m e 195 m (NEERI, 1985).

Eriksson (1978) analisou cerca de 20 relâmpagos incidentes na torre de Pretória na África do Sul, cuja estrutura é semelhante à da torre do Morro do

Cachimbo e calculou a relação entre a distância de atração e a intensidade da corrente máxima associada ao relâmpago. De acordo com os resultados dos estudos do canal, reproduzido em um modelo tridimensional, Eriksson identificou por tentativas, o ponto de junção dos líderes. Embora seja um estudo especulativo, ele considerou que os resultados encontrados foram conservativos para concluir que “a distância de atração cresce com a intensidade da corrente de pico da descarga de retorno”.

Em estudo geométrico do canal, Schroeder (2001) analisou o ângulo de ataque entre o canal e a torre e concluiu que não há, aparentemente, influência do ângulo de incidência do canal na torre, nem na forma do pulso, nem no pico da corrente da descarga de retorno. Para tanto, foram analisados ângulos de 90°, 45° e 180° na torre do Morro do Cachimbo.

Quando ocorre uma descarga atmosférica em estruturas elevadas, localizadas em terrenos planos ou, em estruturas baixas, localizadas no topo de montanhas, estas descargas apresentam um comportamento estatístico comum. Nestas estruturas, uma significativa percentagem de relâmpagos se inicia com uma descarga através do líder ascendente no topo da torre, caracterizando os relâmpagos ascendentes positivos e negativos.

Na realidade, a influência da estrutura no mecanismo de atração entre os líderes, é determinada pelo campo elétrico divergente ou eletrostático nas imediações da torre, que é intensificado pela presença da estrutura e pela carga do líder ou, em casos extremos, pelo campo elétrico da nuvem. Por sua vez, esta influência é mais uma função da forma da estrutura, que pode ser expressa pela relação entre a altura e o raio equivalente da estrutura (h/R), do que apenas pela sua altura.

Em uma análise comparativa de medidas em torres, em diferentes estações de pesquisa, é necessário levar em conta não apenas a altura da torre como parâmetro básico, uma vez que a relação h/R pode ser inexpressiva em muitos casos, simplesmente por uma questão estrutural que, afinal, pode representar os mesmos valores para o parâmetro h/R em diferentes estruturas.

Como exemplo, estruturas de alturas moderadas situadas sobre montanhas

elevadas apresentam estatísticas de incidência de relâmpagos muito parecidas com estruturas de alturas elevadas em terrenos planos, como o caso da torre do Monte San Salvatore na Suíça (torres de 70 m) - esta apresenta maior percentagem de relâmpagos ascendentes na estatística de Berger (1975). Por esta razão é que foi necessário definir o conceito de “altura efetiva”, que é definida geralmente a partir da percentagem de relâmpagos ascendentes na torre. Rakov (2002 b), analisou os relâmpagos ascendentes em diversas técnicas de medidas (relâmpagos induzidos e em torres), usando a relação:

$$P_u = 52,8 \ln(h_s) - 230 \quad (5.1)$$

P_u é a percentagem de relâmpagos ascendentes, e h_s , a altura efetiva da torre. Eriksson (1978) aplicou duas diferentes relações para calcular a altura efetiva das torres da África do Sul e do Monte San Salvatore:

$$N_F = 1,48 \times 10^{-6} (h_s)^{2,8} \quad (5.2)$$

$$P_u = 68,2 \ln(h_s) - 315,5 \quad (5.3)$$

N_F é a percentagem anual de relâmpagos na estrutura. Guedes (2001), analisou descargas atmosféricas em diversas torres e encontrou percentuais de 26,9% nas torres T1 e T2 da estação do Monte San Salvatore, 39,6% no Morro do Cachimbo, 27% na torre de Narita no Japão e 13% na torre de Pretória na África do Sul. Berger (1975) identificou um percentual de 86,2% de relâmpagos ascendentes no Monte San Salvatore numa base de dados mais extensa do que aquela analisada por Guedes (2001).

Enquanto a estação MSS possui uma altura efetiva de 350 m, calculada por Eriksson usando o percentual de 84% de relâmpagos ascendentes, a África do Sul possui uma altura efetiva de 148 m (Eriksson, 1978). Usando o percentual de 39,6% e as Equações (5.1) e (5.2), a torre Morro do Cachimbo possui uma altura efetiva entre 165 m e 185 m.

5.10 – Modelagens de Correntes em Torres

5.10.1 – Comparação entre Correntes de Relâmpagos Naturais e Correntes Medidas em Torres (Melander, 1984)

5.10.1.1 – Resumo do Trabalho de Melander (1984)

Melander (1984) investigou os efeitos dos parâmetros R, L e C das torres das estações do Monte de San Salvatore e da África do Sul, usando os modelos físicos MDG de Strawe (1979) e de Braginskii (1958) e em seguida aplicou os resultados no modelo de circuitos distribuídos. Do modelo de Braginskii, foi desenvolvido o cálculo da resistência por unidade de comprimento, determinada pela condutividade e pelo raio do canal do arco. A condutividade foi considerada uniforme devido às aproximações feitas para simplificar o processo físico de expansão do canal (determinada pela temperatura e pressão), as quais são aproximadamente constantes no tempo devido às condições de contorno adotadas.

O modelo de Strawe, desenvolvido em laboratório, considera o arco de descarga dividido em inúmeras seções ou fragmentos de comprimentos infinitesimais. Considerando as condições de contorno que diferenciam o meio interno e abrigado (laboratórios) e o meio externo ao tempo, os resultados obtidos em laboratório podem ser aproximados ao canal real de um relâmpago natural, guardando as devidas diferenças entre os meios.

- Comentários sobre o trabalho de Melander.

Melander normalizou os parâmetros das torres, de relâmpagos naturais e da corrente de descarga de retorno registradas nas torres em estudo.

Os parâmetros analisados foram: resistência de aterramento, resistência da torre, impedância de surto, velocidade do pulso da onda de corrente e altura da torre, sendo:

- ❖ Resistência de aterramento.

Os sistemas de aterramento de torres foram caracterizados por baixas resistências de terra. Para medições de corrente feitas no topo da torre, a resistência de aterramento apresenta baixa variação e para medições feitas na base da torre, embora as variações estejam dentro da faixa de 10 a 100 Ω , estas foram consideradas bem realistas levando à escolha do valor nominal de 30 Ω .

- ❖ Resistência da torre

Como as torres metálicas são consideradas bons condutores, o valor da resistência da torre foi estimado numa faixa de 0,1-2 Ω . Em medições, a resistência da torre chega a valores acima de 10 Ω . Porém, a resistência

característica pode não ser um parâmetro crítico para caracterizar uma torre metálica, a menos que as junções entre as peças sejam alvo de corrosão. O valor escolhido para uma torre padrão foi de 1 Ω .

❖ Impedância de surto

A impedância de surto é muito mais significativa do que a resistência calculada em corrente contínua. A faixa típica de valores medidos e calculados fica dentro de uma faixa que vai de 80 Ω a 500 Ω . Também neste caso, medidas de corrente feitas na base da torre são mais sensíveis a variações da impedância de surto do que as medidas feitas no topo da torre. O valor nominal escolhido foi de 130 Ω .

❖ Velocidade da onda.

Os parâmetros de corrente variam com a velocidade de propagação da onda, embora não seja um parâmetro crítico. O valor escolhido foi de 0,7c, onde c é velocidade da luz no vácuo (3×10^8 m/s).

❖ Altura da torre

As alturas das torres consideradas foram 70m, 40m e 60m. Numa análise de aproximação, foram consideradas as alturas da torre de 20, 40, 50, 60, 80 e 100 m, sendo verificadas correntes e taxas de variação para cada altura. A variação máxima encontrada foi de 10% na taxa de crescimento de corrente, assumindo neste momento que os demais parâmetros não variem. Como todos os demais parâmetros dependem da altura da torre, especialmente a impedância de surto, os resultados obtidos nesta abordagem podem não ser precisos. Foi escolhido, no entanto a altura média de 50 m para todas as torres, objetivando uma padronização para facilitar as comparações finais.

Fatores de normalização para os níveis de correntes de pico e de taxa de crescimento foram determinados para a altura de 50m, resultando 12 kA e 81 kA/ μ s, respectivamente. A partir da comparação entre os fatores de normalização que resultaram das diversas torres, foi determinada a impedância de surto de um relâmpago natural.

O modelo de Strawe permite variações das condições iniciais para variar a corrente de pico e a taxa de crescimento da corrente. Duas correntes com diferentes amplitudes, mas com a mesma taxa de crescimento e duas taxas de crescimento com a mesma amplitude de corrente foram testadas, onde o fator de normalização é o compromisso entre os valores encontrados com a

presença de torres (**I**) e os valores encontrados sem a presença de torres (**DI**), mostrados na Tabela (5.4).

TABELA 5.4 – Parâmetros de Corrente em Função dos Fatores de Normalização.

Fator de Normalização					
Sem torre		Base da torre		Topo da torre	
I_{pico} (kA)	$[di/dt]_{\text{(pico)}}$ (kA/ μ s)	I	DI	I	DI
12,0	81	1,57	1,58	1,07	0,951
12,0	164	1,57	1,56	1,07	0,976
22,2	164	1,55	1,57	1,16	0,951
Média		1,56	1,57	1,10	0,959

Fator de normalização é dado pela relação:

$$I = (I_{\text{pico}} - \text{com torre}) / (I_{\text{pico}} - \text{sem torre})$$

$$DI = (di/dt_{\text{(pico)}} - \text{com torre}) / (di/dt_{\text{(pico)}} - \text{sem torre})$$

Fatores de normalização com valores maiores que a unidade indicam parâmetros em torre maiores que parâmetros de relâmpagos naturais, enquanto valores menores que a unidade indicam parâmetros em torre menores que os de relâmpagos naturais. Os fatores de normalização não variam substancialmente quando os parâmetros de corrente são modificados. Por conseguinte, a média das constantes de normalização pode ser calculada e utilizada para as medidas em todas as torres.

- ❖ Resistência de aterramento, em relâmpagos naturais.

Melander escolheu o valor de 100 Ω para a resistência de aterramento, em uma faixa de variação mais ampla de 10 a 500 Ω . A Tabela (5.5) mostra que os resultados variam $\pm 13\%$ para os fatores de normalização, o que implica que a resistência do solo não é um parâmetro crucial quando derivado de fatores de normalização para uma torre, exceto para valores extremos, os muito altos ou os muito baixos.

TABELA 5.5 – Fatores de Normalização em Função da Resistência do Solo.

Resistência do solo (Ω)	Base da torre		Topo da torre	
	I	DI	I	DI
10	1,38	1,39	0,941	0,837
50	1,47	1,49	1,00	0,895
100	1,57	1,58	1,07	0,951
200	1,74	1,78	1,18	1,07
500	2,27	2,42	1,54	1,45

5.10.1.2 – Resultados e Conclusões de Melander (1984).

Os dados obtidos por Berger, Garbagnati e Eriksson foram normalizados pelos fatores da Tabela (5.4), podendo ser destacados os seguintes resultados:

- ◆ Os registros na estação MSS apresentaram uma boa aproximação. Enquanto o valor de pico da corrente diminuiu, o valor da taxa de variação da frente de onda aumentou.
- ◆ O mesmo aconteceu com os dados de Garbagnati que, assim como Berger, mediu corrente no topo da torre.
- ◆ Os registros na estação de Pretória adquiridos por Eriksson, são muito mais afetados pela normalização adotada, por terem sido medidos na base da torre.

A estação da África do Sul apresentou uma taxa máxima de crescimento de 180 kA/ μ s em 11 eventos, indicando que apenas 9% dos eventos apresentaram uma taxa de 115 kA/ μ s ou mais, enquanto neste mesmo percentual de frequência cumulativa, os dados da estação MSS apresentaram 102 kA/ μ s (Melander 1984).

Há algumas diferenças quantitativas nos dados analisados entre publicações de Berger e de Eriksson. Berger (1975) apresentou estatísticas detalhadas de relâmpagos positivos e negativos, ascendentes e descendentes, enquanto Eriksson (1978) publicou dados referentes aos seis primeiros anos de atividade da estação, abrangendo dados apenas de relâmpagos negativos

descendentes (Geldenhuis et al. (1984) incluíram dados de 15 anos de pesquisa de relâmpagos registrados na África do Sul).

Melander conclui seu trabalho anotando as discrepâncias encontradas, quando comparados com resultados anteriores (por exemplo, por Krider e Weidman, 1983) sugerindo a necessidade de apresentar novas estatísticas sobre correntes de descargas de retorno de relâmpagos.

5.10.1.3 – Outras Considerações sobre a Influência do Corpo da Torre

Registros experimentais em torres instrumentadas mostram o comportamento da onda de corrente ao longo da estrutura e permitem que se faça uma análise do comportamento da corrente e dos campos elétrico e magnético irradiados pelo canal do relâmpago através da atmosfera. É possível fazer uma análise teórica do efeito da propagação do pulso de corrente ascendente no canal até o centro de cargas da nuvem. Se considerarmos a condutividade não infinita do solo, também é possível fazer uma análise do comportamento das parcelas de ondas refletidas ao longo do canal nos pontos de descontinuidades entre o solo e o centro de cargas na nuvem, definidos na junção dos líderes descendente e ascendente, na interface do canal-topo da torre e na base da torre-solo (Beierl 1992; Guerrieri et al. 1996; Guerrieri et al. 1998; Schroeder 2001 e Guedes et al. 2002).

5.10.2 – Modelagem de Correntes de Relâmpagos na Torre do Canadá por Shostack et al. (1999)

A abordagem prática da influência de sensores instalados no topo e na base da torre mostra que o efeito causado pelo fenômeno das reflexões de onda em torres com alturas superiores a 100 m é mais perceptível.

No Canadá, dois sensores foram instalados na torre CN, de 453 m de altura (Shostack et al. 1999) resultando diferentes valores de pico de uma mesma corrente medida simultaneamente.

Dentro do contexto que esta Tese se insere, é interessante analisar os resultados obtidos por Shostack et al. (1999). Os autores mostraram, por modelagem, que os dados adquiridos em torres são mais confiáveis, quanto

mais isentos de ruídos sejam. A existência dos ruídos na rede é consequência do tipo de interligação adotada.

Medições na torre CN são feitas em várias alturas e as correntes e suas derivadas registradas por Shostack et al. (1999), mostraram que dados obtidos por dois sistemas diferentes, mas com idênticos sensores de corrente do tipo bobina de Rogowski e idênticos registradores digitalizadores de 10 bit – 10 ns, possuem qualidades que dependem do tipo de interligação entre os sensores localizados na torre e os instrumentos de medição e de registro de dados, bem como do sistema de interligação sensor – medidor / registrador.

- Descrição do sistema - Uma bobina foi montada na torre CN, inserida no meio do corpo da estrutura metálica a uma altura de 475 m do solo, designada como FRC, que é o primeiro sistema a ser analisado. A FRC e os transdutores foram interligados através de cabos condutores convencionais do tipo triaxiais blindados. Posteriormente uma segunda bobina de Rogowski designada por SRC foi instalada a uma altura de 35 m acima da FRC correspondendo a uma altura de 510 m do solo. Ao contrário da FRC, a SRC foi instalada na parte superficial externa da estrutura metálica da torre. A SRC e os transdutores foram interligados através de fibra ótica e transdutores eletro / óticos (EO) na torre e ótico / elétricos (OE) na entrada dos digitalizadores. Por esta razão, a SRC registrou sinais com relação entre sinal e ruídos muito melhor do que a FRC.

As curvas registradas pela SRC são menos onduladas do que os sinais registrados nas curvas pela FRC, que apresentam uma forma pulsada no decaimento da curva, após o valor máximo da corrente. No caso em estudo, as medições foram feitas em dois diferentes eventos, cada um com duas descargas, ou seja, uma descarga de retorno e uma descarga subsequente, ambas pertencentes a relâmpagos negativos mas representadas nas Figuras (5.10) e (5.11) por conveniência, com a polaridade invertida.

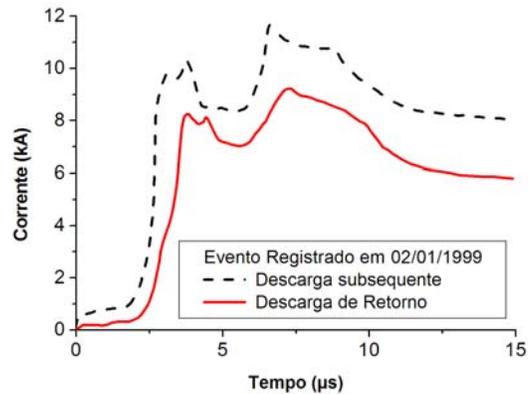


FIGURA 5.10 – Curvas de corrente das descargas de retorno e subsequente do Evento 02/01/1999.

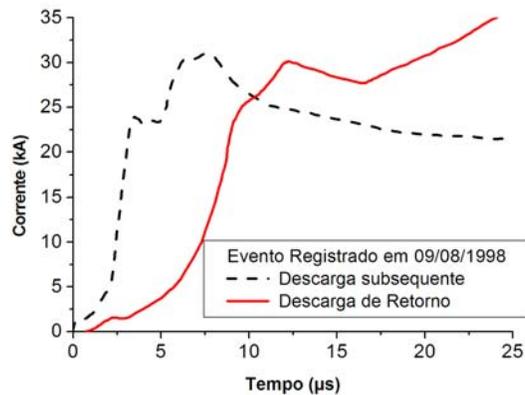


FIGURA 5.11 - Curvas de corrente das descargas de retorno e subsequente do Evento 09/08/1998.

O experimento desenvolvido por Shostack et al. (1999) teve como objetivo o desenvolvimento de expressões baseadas no Modelo Linha de Transmissão usando a Equação (4.4) para reproduzir a corrente de DR e analisar a variação espacial e temporal da corrente na torre e no canal do relâmpago. Foi considerado o ponto da descarga de retorno ou de junção como o local no canal, onde os líderes descendente e ascendente se encontram, produzindo duas frentes de onda que se movem em direções opostas no canal com velocidades v_u (líder ascendente) e v_d (líder descendente).

O líder descendente, ao encontrar o topo da torre é refletido (com um coeficiente de reflexão ρ_{cb}) e parcialmente penetra na torre por onde continua a se deslocar agora com a velocidade da luz c . Após encontrar o solo ou a

base da torre, este pulso é refletido (ρ_{tb}) e retorna ao topo da torre. Lá, o pulso é novamente refletido ($\rho_{tt} = -\rho_{cb}$) e parcialmente penetra no canal. (foi considerado que os pulsos refletidos da base do canal e extremidades da torre se movem com a velocidade da luz, tanto na torre quanto no canal). Após a frente da descarga de retorno chegar no topo do canal, os pulsos são refletidos (ρ_{ct}) e retornam ao topo da torre.

Este processo, que é comum em todas as correntes de descarga de retorno em torres, se repete um número infinito de vezes. O modelo no entanto, considera a possibilidade de uma atenuação exponencial: a) do pulso inicial da descarga de retorno durante sua propagação ascendente, com o fator de decaimento λ_1 definido por Rachidi e Nucci (1990), no modelo MTLE; e b) todos os demais pulsos durante sua propagação no canal enquanto este existir, com o fator de decaimento λ_2 .

Em resumo, algumas observações sobre a simulação a se destacar são:

- a corrente original foi injetada no topo da torre;
- o pulso inicial na torre é menor que o pulso da corrente injetada;
- as principais características das curvas de corrente obtidas com a aplicação do modelo MTLE mostram boa aproximação com os valores experimentais registrados;
- em particular a forma convexa da Figura (5.10) foi reproduzida fielmente no modelo;
- a influência exercida pelos coeficientes de reflexão da frente da DR (ρ_{cb}).
- assim como nas medições experimentais onde o valor de pico da corrente registrada na FRC de um mesmo evento registrado simultaneamente na SRC é ligeiramente mais alto, também nas simulações, o valor de pico da curva calculada para a altura de montagem do sensor de 475 m (h_{FRC}) é ligeiramente mais elevado que o valor de pico da curva calculada para a altura de montagem do sensor de 510 m (h_{SRC}).

- os valores dos parâmetros usados nas simulações com a expressão (4.7) são representados na Tabela 5.6 (a_1 corresponde a uma frente de onda de $3\mu\text{s}$ e a_2 $0,55\mu\text{s}$ respectivamente):

TABELA 5.6 – Parâmetros das curvas médias de descarga de retorno e subsequente na torre CN – modelos MTLL e MTLE.

DESCRIÇÃO	UNIDADE	DESCARGA DE RETORNO
Vel. Asc. (vu)	$\text{m}\mu\text{s}^{-1}$	0,15c
Vel. Desc (vd)	$\text{m}\mu\text{s}^{-1}$	0,30c
ρ_{tt}	-	-0,365
ρ_{tb}	-	0,395
ρ_{ct}	-	-0,5 e -0,9
λ_1	m	2000
λ_2	m	3000
h	m	555
h_{SRC}	m	510
h_{FRC}	m	475
a_1	s^{-1}	5×10^3
a_2	s^{-1}	0,364 ou $10,64 \times 10^6$

Os resultados mostrados por Shostack et al. (1999) vêm confirmar que medições efetuadas em torres de alturas elevadas em diferentes alturas, estão mais susceptíveis aos efeitos da reflexão tanto na base da torre quanto no topo desta, mesmo que no caso de Shostak et al, a diferença de altura de montagem dos sensores seja de apenas 35 m, comparando com uma torre de altura equivalente à utilizada por Garbanati e Lo Piparo na Itália, com 40 m de altura, analisada por Melander (1984).

- ❖ Comentários sobre os resultados das medições feitas pelos sistemas FRC e SRC:

Os resultados do SRC, sensor montado em um nível 35 m acima do sensor FRC, apresentaram valor de pico menor que o valor de pico da mesma corrente medida pelo FRC, cujo sistema mede sinais com ruídos e interferências decorrentes do tipo de cabo convencional usado para a aquisição das curvas experimentais. Ou seja, a existência de ruídos no sinal

medido pela FRC, que podem causar perdas no valor do sinal medido diminuindo o ganho na saída mais a ação transitória da torre, não foram suficientes para inibir os efeitos decorrentes da diferença nas alturas de montagem dos dois sistemas (de apenas 35 m), confirmando as conclusões de Melander (1984). Por outro lado, as simulações do modelo de Shostack et al. (1999) mostraram as mesmas alterações nas amplitudes das correntes modeladas para os dois sistemas, nas alturas respectivas de 475 m e 510 m, para os sensores FRC e SRC respectivamente. Parecem indicar portanto, que medições simultaneamente efetuadas em diferentes alturas em torres, apresentam valores de amplitudes mais elevados para sinais registrados no sensor montado em nível inferior se comparado com o mesmo sinal registrado no sensor montado no nível superior. A diferença entre as magnitudes do sinal medido simultaneamente nos dois níveis, parece estar fortemente correlacionada com a ação dos efeitos transitórios da torre. Parâmetros como coeficientes de reflexão, velocidade de deslocamento do pulso, impedâncias de surto, impedâncias equivalentes da torre e do canal, e impedâncias características da torre parecem influenciar menos que a própria altura de montagem dos sensores. No caso da torre CN, as diferenças nas amplitudes dos sinais medidos são muito insipientes, quase imperceptível. Porém, após uma análise minuciosa, é possível constatar uma ligeira alteração nas amplitudes máximas, apesar de não serem percebidas distorções na curva de corrente alteradas na sua forma, a não ser no caso dos ruídos produzidos no sistema FRC.

5.10.3 – Modelagem de Correntes de Relâmpagos na Torre do Morro do Cachimbo por Schroeder (2001)

Schroeder (2001) analisou as curvas de correntes medidas na base da torre do Morro do Cachimbo e concluiu que os efeitos da reflexão da onda nas extremidades da torre podem alterar os valores medidos em torres. O autor, numa primeira aproximação, considerou o modo TEM para fazer várias análises e concluiu que os modelos aplicados a torres não apresentam resultados completos por não levar em conta o acoplamento eletromagnético entre o canal – torre e torre - solo. Contornando esta situação, tendo em vista que o modo TEM não é adequado para este tipo de estudo, Schroeder optou

por trabalhar com um modelo eletromagnético elaborado para obter a curva original da corrente de relâmpago da torre da estação do Morro do Cachimbo sem contaminações conseqüentes dos processos transitórios na torre. A pesquisa foi desenvolvida para avaliar quantitativamente estas contaminações em dois casos, um injetando corrente no topo da torre sem considerar o canal e outro considerando um canal de 300 m de comprimento, injetando a corrente no topo do canal, concluindo que quanto mais alto o ponto de injeção no canal maior será a influência produzida pelas reflexões nas extremidades da torre, para medições feitas na base.

CAPÍTULO 6

DESENVOLVIMENTO DO MODELO MATEMÁTICO PARA CÁLCULO DE CORRENTES EM TORRES

6.1 – Objetivos

Neste capítulo são apresentados os critérios necessários para o desenvolvimento de uma rotina para o cálculo de correntes em torres, a partir de três cenários que simulam a corrente na torre.

Cálculos de correntes em torres envolvem equações diferenciais e problemas de valores de contorno, com soluções complexas. Os parâmetros utilizados, por sua vez, são muitas vezes, grandezas dependentes de mais de uma variável, tais como tempo, espaço e frequência, que são de difícil manipulação conjunta. Os cálculos são feitos no domínio do tempo e por isto, simplificações se fazem necessárias, uma vez que o deslocamento da frente de onda da corrente se dá num sistema dinâmico oscilante. Procedimentos que visam simplificar o problema são comuns em estimativa de valores que reproduzam medições efetuadas sob condições tão adversas, quanto as limitações materiais existentes na aquisição de dados *“in loco”*.

A modelagem matemática, portanto, é feita na base de simplificações que possibilitam a abordagem do sistema constituído pelo canal de descarga e pela torre. A modelagem é representada neste contexto, pelo mecanismo de reflexão de onda entre as extremidades da torre. As simplificações decorrem, de um lado, da necessidade de se criar condições para o procedimento dos cálculos matemáticos e, de outro lado, da necessidade de se obter do modelo, resultados que sejam eficientes, confiáveis e representativos dos cenários propostos.

Com o objetivo de obter uma expressão matemática que represente o sistema em estudo, os coeficientes de reflexão de corrente são estimados de forma que o algoritmo possa reproduzir os resultados desejados.

O esquema simplificado do canal de descarga, elaborado para representar um circuito elétrico equivalente inclui o sistema de aterramento da torre, sabendo-se que cada tipo de solo requer um sistema de aterramento adequado. São definidas ainda, as parcelas de corrente que percorrem o canal do relâmpago e a torre no momento da descarga, para cada cenário proposto. Para tanto, os tempos de deslocamento da frente de onda de corrente e os tempos de tráfego da onda de corrente no canal e torre são definidos.

Os mecanismos de reflexão de onda no canal e na torre são descritos com base em um diagrama esquemático. Finalmente, dois algoritmos capazes de estimar correntes na torre MCS são construídos. O primeiro algoritmo foi proposto por Guerrieri et al. (1998) para estimar corrente no topo e o segundo foi desenvolvido a partir do primeiro, para estimar as correntes na base. Alguns trabalhos já publicados foram revistos à luz dos algoritmos construídos e dos cenários propostos. Algumas modificações foram introduzidas na técnica de cálculo resultando a revisão de alguns resultados das publicações originais de Beierl (1992), Guerrieri et al. (1998) e Guedes et al. (2002). As modificações introduzidas transferem aos cálculos de correntes em torres, maior fidelidade na aplicação dos algoritmos nos capítulos seguintes.

6.2 – Coeficientes de Reflexão de Correntes

Ao considerar o canal do relâmpago, uma linha de transmissão, os parâmetros - impedância (aterramento, torre e canal) e velocidade (pulso de corrente e onda) definem os coeficientes de reflexão e de refração da onda incidente. O fator $\sqrt{\mu/\varepsilon}$ tem unidade em ohms (V/A) e é chamado de impedância intrínseca “ η ” do meio de propagação (“ ε ” é a constante de permissividade elétrica, e “ μ ” de permissividade magnética). Entretanto o fator $\sqrt{\mu/\varepsilon}$, também é conhecido, como impedância de onda Z_0 . Em síntese:

$$Z_0 = \eta = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \quad (6.1)$$

Para ondas planas uniformes no modo TEM (Transverso Eletromagnético), a impedância de onda tem o mesmo valor da impedância intrínseca do meio de propagação.

Se a corrente flui em uma linha de transmissão, é possível se determinar os coeficientes de reflexão e de transmissão de corrente nos pontos onde haja modificação da impedância na linha.

Para conseguir este objetivo, considera-se que a corrente flui por uma linha de transmissão que tem as seguintes características: impedância $Z_L = R + j\omega L$ e admitância $Y_T = G + j\omega C$ (R é a resistência, frequência angular $\omega = 2\pi f$, f a frequência, L a indutância, C a capacitância da linha e G a condutância). A impedância característica da linha de transmissão é:

$$Z = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (6.2)$$

As tensões e correntes da linha de transmissão são dadas pelas Equações (6.3) e (6.4) que descrevem as ondas de tensão e de corrente propagando na direção positiva de z ou seja, z crescente:

$$V = V_0 e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \phi - \beta z) \quad (6.3)$$

$$I = \frac{V_0}{|Z|} e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \phi - \beta z - \theta_2) \quad (6.4)$$

Onde, genericamente definindo, $\gamma = \alpha + j\beta$ é a constante de propagação (α é constante de atenuação e β de fase), θ_2 é o ângulo de defasamento entre a corrente e tensão (se Z é real, θ_2 é igual a zero). Se a corrente possui frequência muito elevada, a impedância característica da linha de transmissão se transforma em impedância de surto da linha, e com $\omega L \gg R$ e $\omega C \gg G$, a impedância de surto é igual a

$$Z_{surto} = \sqrt{L/C} \quad (6.5)$$

O coeficiente de reflexão de corrente (fração de onda de corrente que é refletida num ponto de descontinuidade entre duas linhas de diferentes impedâncias

características, Z_{01} e Z_{02}), é dado pela relação entre a corrente refletida e a corrente incidente, sendo:

$$\rho = \frac{I_0^-}{I_0^+} = \frac{\text{onda refletida}}{\text{onda incidente}} = \frac{Z_{0\text{meio1}} - Z_{0\text{meio2}}}{Z_{0\text{meio1}} + Z_{0\text{meio2}}} \quad (6.6)$$

6.3 – Algoritmo para Estimar Correntes em Torres

6.3.1 – Finalidade e Aplicação do Algoritmo

O algoritmo para simular correntes no topo e na base da torre foi desenvolvido em termos de corrente representada pela função de Heidler definida na Equação (4.8) e os parâmetros altura da torre (h), altura do ponto de injeção de corrente (z), impedância do canal (Z_{ch}), impedância da torre (Z_T) e impedância de aterramento (Z_{gr}), velocidade de deslocamento do pulso de onda no canal (v_f) e na torre (c), como exemplificado no esquema da Figura 6.1.

A principal descontinuidade no caminho da corrente é demarcada por uma região imediatamente acima do plano de interface canal-torre, como mostrado na Figura 6.1 que também mostra os coeficientes de reflexão de correntes. Nas simulações, visando contornar a descontinuidade do canal de descarga-torre, a corrente será observada na base do canal (acima do plano de interface), no topo da torre (abaixo do plano de interface) e na base da torre (acima do nível do solo). Após a definição das curvas de corrente, são comparadas as amplitudes máximas na base e no topo da torre.

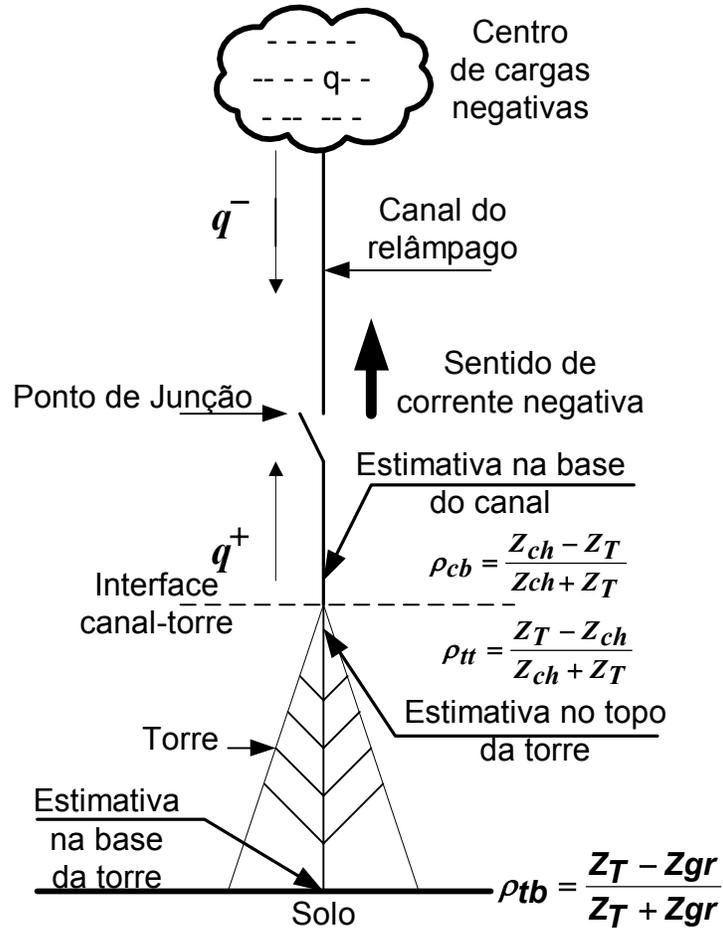


FIGURA 6.1 – Esquema simplificado de um relâmpago negativo descendente.

Um circuito elétrico equivalente NORTON, mostrado na Figura 6.2 a seguir, foi elaborado com base no esquema da Figura 6.1.

Neste circuito, o canal é representado por sua impedância Z_{ch} , a torre é representada por sua impedância característica Z_T e o aterramento da torre é representado pela impedância Z_{gr} .

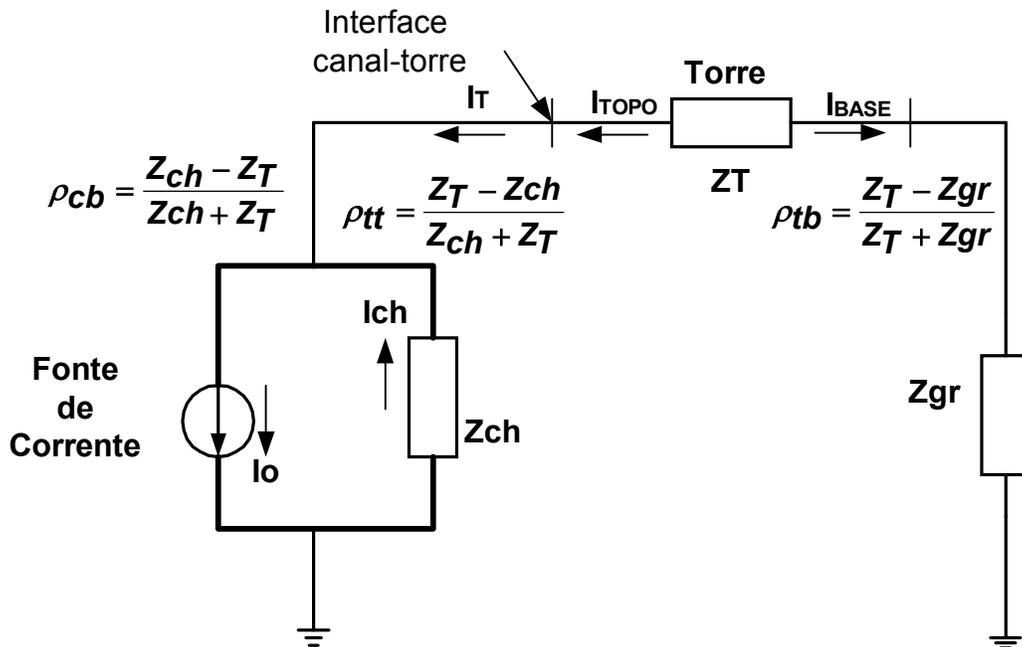


FIGURA 6.2 – Circuito equivalente NORTON de um relâmpago negativo descendente em torre aterrada. A onda de corrente se propaga na direção descendente, num tempo em que a corrente ainda não atingiu o solo.

6.3.2 – Sistema de Aterramento

Torres em estação de pesquisa de relâmpago, em geral, são aterradas e para efeito de cálculo, em alguns casos e em regiões onde a resistividade do solo é baixa, é possível baixar o valor da impedância de aterramento a valores próximos de zero ($Z_{gr} = 0$). Entretanto no Brasil, e em especial no Morro do Cachimbo, a resistividade do solo é muito elevada. Na seção 5.8.3 estimou-se a resistência do sistema de aterramento da torre entre 14 a 112 Ω , para uma faixa de resistividade de solo de 1000 a 8000 $\Omega.m$ (veja Tabela 5.3).

A descontinuidade de impedância na base da torre, conseqüência da diferença das impedâncias da torre e de aterramento da torre produz uma parcela de corrente que é transmitida ao solo (não levada em consideração) além da parcela de corrente que é refletida na base em sentido ascendente, esta sim, levada em consideração nos cálculos que se seguem.

6.3.3 – Parcelas de Correntes no Canal de Descarga

O desenvolvimento do algoritmo para cálculo das correntes em torres, considera o processo de evolução de um relâmpago negativo descendente, baseando-se no pulso de corrente, que percorre o canal de descarga, desde o solo até o centro de cargas da nuvem, iniciando-se no momento de junção dos líderes ascendente e descendente, produzindo a corrente de descarga de retorno.

Este processo, será analisado em duas etapas:

- a) fase de deslocamento da frente onda de corrente no canal, do ponto de junção até o topo da torre, e sua reflexão para o canal, produzindo uma onda ascendente; e
- b) fase de deslocamento da parcela de onda transmitida à torre e sua reflexão no corpo da torre.

São considerados os seguintes parâmetros identificáveis no esquema da Figura 6.1 e/ou no circuito da Figura 6.2.

- Altura do ponto de junção desde o topo da torre, z ;
- Velocidade de deslocamento da frente do pulso no canal, v_f ;
- Velocidade de deslocamento da onda refletida no canal e na torre, c ;
- Momento em que a corrente é injetada no ponto de junção, correspondendo ao fechamento da “chave” no encontro dos líderes ascendente e descendente, $t = 0$;
- Tempo de deslocamento do pulso de corrente no canal (τ_{ch}), z/v_f ;
- Tempo de deslocamento da onda refletida no canal (τ_{chw}), z/c ;
- Tempo de deslocamento da onda transmitida ou refletida na torre (τ_T);
- Coeficiente de reflexão de onda descendente na base do canal, ρ_{cb} ;
- Coeficiente de reflexão de onda ascendente no topo da torre, ρ_{tt} ;
- Coeficiente de reflexão de onda descendente na base da torre, ρ_{tb} ;

6.3.4 – Descrição do Processo de Reflexão da Onda no Canal

- ❖ Ponto de junção entre os líderes.

No momento que os líderes se encontram, uma corrente na forma de um pulso, com direção ascendente (corrente positiva coincidindo com o movimento descendente de elétrons) percorre o canal de descarga.

- Corrente ascendente

É a parcela que percorre o canal, desde o ponto de injeção ao centro de cargas da nuvem, com a velocidade de deslocamento v_f (velocidade do pulso de corrente). Nas simulações, as reflexões desta parcela pelo canal, não serão computadas. Isto porque, o tempo para esta parcela atingir centro de carga na nuvem e retornar, desconsiderando outros pontos de descontinuidade no canal, pode ser muito maior que o tempo de tráfego da onda no corpo da torre.

- Corrente descendente

É a parcela que percorre o canal, desde o ponto de junção ao topo da torre, com a velocidade de deslocamento " v_f " (velocidade do pulso de corrente). O pulso descendente chega ao topo da torre, onde uma porção é refletida para o canal, com o coeficiente de reflexão " ρ_{cb} " (base do canal) e outra é transmitida à torre com o coeficiente de transmissão $(1 + \rho_{cb})$. A parcela refletida para o canal será desconsiderada, nos cálculos da corrente no topo e na base da torre.

A parcela descendente transmitida à torre pelo coeficiente de transmissão $(1 + \rho_{cb})$ atinge a base da torre e é refletida pelo coeficiente de reflexão " ρ_{tb} " (base da torre), se propagando em direção ao topo da torre. No topo da torre, a onda ascendente é refletida com o coeficiente de reflexão " ρ_{tt} " de volta à base da torre. Uma parcela desta onda é transmitida ao canal com o coeficiente de transmissão igual a $(1 + \rho_{tt})$, que no entanto não será computada na simulação. O processo de reflexão na base e no topo se repete por um número infinito de vezes. Porém, são consideradas apenas 3 reflexões em cada estimativa.

6.3.5 – Mecanismo de Transmissão e Reflexão de Onda no Canal e Torre

O mecanismo proposto baseia-se no modelo de engenharia. Alguns trabalhos recentes aplicaram técnicas semelhantes, como por exemplo, Beierl (1992); Heidler e Zundl (1995) e Guerrieri et al. (1996, 1998).

Várias alternativas que consideram o cálculo da corrente no topo e na base das torres são aplicadas. As principais podem ser resumidas em três cenários usados para descrever a forma de injeção de corrente. O Cenário 3 é descrito no Capítulo 7. Os Cenários 1 e 2 são definidos a seguir.

6.3.5.1 – Configuração de Cenários para Cálculo de Correntes em Torres

Dependendo da posição de injeção, a corrente injetada pela fonte (I_o) pode: a) ser integralmente transmitida à torre ($I_o = I_T$); b) se dividir em duas parcelas ($I_o = I_T + I_{ch}$); e c) transmitir à torre uma parcela e ter outra refletida ao canal.

Baseado nas possibilidades acima, os Cenários 1 e 2 podem ser configurados e representados de forma esquemática, na Figura 6.3.

- Cenário 1 - Inexistência do canal no momento de injeção de corrente no topo da torre.

O Cenário 1: a corrente injetada é integralmente transmitida à torre ($I_o = I_T$), a corrente é refletida na base para o topo, com o coeficiente de reflexão ρ_{tb} . No topo, parte é refletida para a base, pela existência do coeficiente de reflexão ρ_{tt} , e parte da corrente é transmitida ao canal pelo coeficiente de transmissão ($1 + \rho_{cb}$). No esquema da Figura 6.3, o Cenário 1 não está representado. Basta porém, desconsiderar o canal no Cenário 2, no momento de injetar a corrente na torre e depois considerar o canal nas parcelas transmitidas da torre ao canal. Este cenário não fornece resultados consistentes.

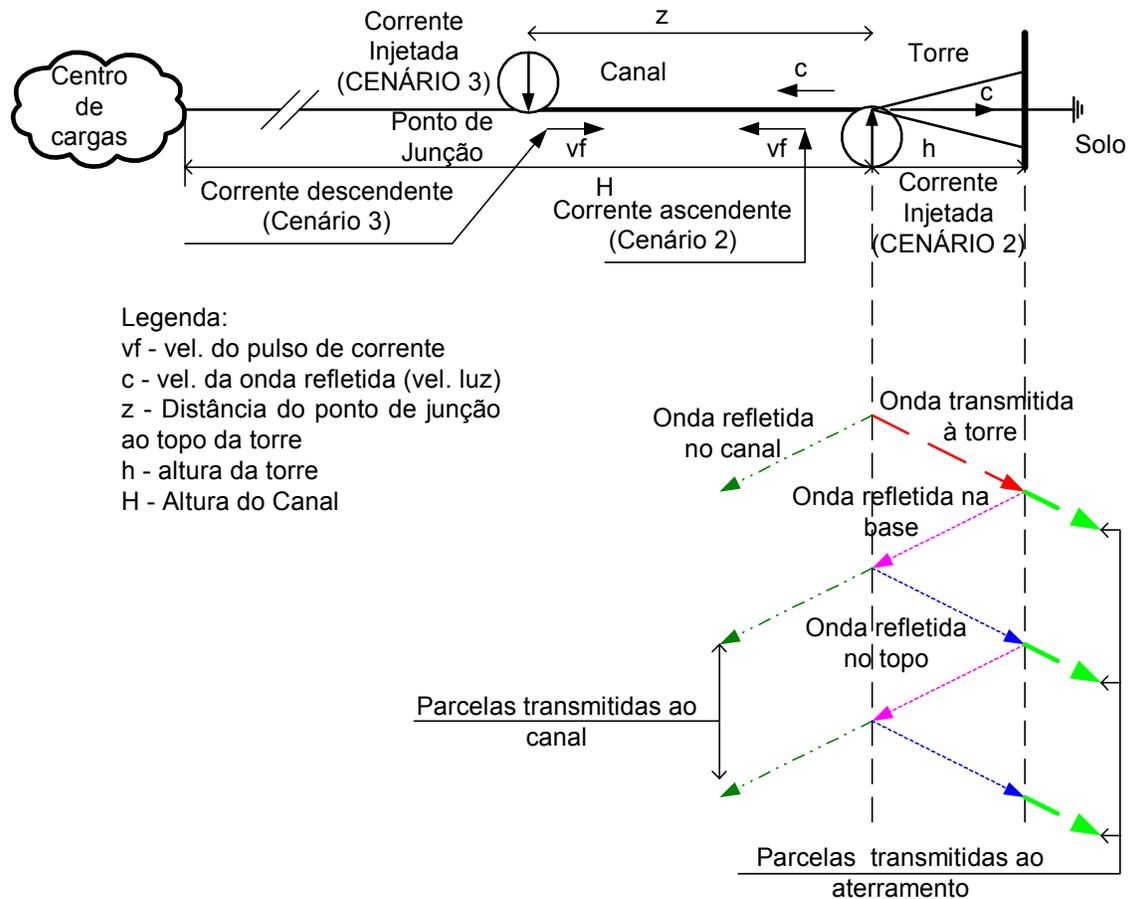


FIGURA 6.3 – Diagrama esquemático simplificado do mecanismo de transmissão e reflexão de onda no canal, torre e aterramento - Cenários.

- Cenário 2 - Existência do canal, desde o momento de injeção de corrente.

No Cenário 2, o canal e torre participam do processo de fluxo de corrente e transmissão e reflexão de onda. As parcelas de corrente ascendente (I_{ch}) e descendente (I_T) podem ser calculadas pelas seguintes relações:

$$I_{ch} = I_0 \frac{Z_T}{Z_{ch} + Z_T}$$

$$I_T = I_0 \frac{Z_{ch}}{Z_{ch} + Z_T}$$

6.3.5.2. – Coeficientes de Reflexão de Corrente

O coeficiente de reflexão de onda na base do canal, e que governa a reflexão da onda da corrente refletida no topo da torre, para o canal em todos os cenários, é:

$$\rho_{cb} = \frac{Z_{ch} - Z_T}{Z_{ch} + Z_T} \quad Z_{ch} > Z_T \text{ então } \rho_{cb} > 0.$$

A porção de corrente transmitida à torre é refletida na base, pelo coeficiente de reflexão “ ρ_{tb} ”. Na base, o coeficiente de reflexão é dado pela relação:

$$\rho_{tb} = \frac{Z_T - Z_{gr}}{Z_T + Z_{gr}} \quad Z_T > Z_{gr} \text{ então } \rho_{cb} > 0.$$

Ao retornar ao topo, decorrido o tempo ($2\tau_T$) necessário para a onda trafegar pelo corpo da torre, a onda é novamente refletida para a base, com o coeficiente de reflexão no topo da torre:

$$\rho_{tt} = \frac{Z_T - Z_{ch}}{Z_T + Z_{ch}} \quad Z_{ch} > Z_T \text{ então } \rho_{tt} < 0.$$

6.3.5.3 – Processo de Reflexão de Onda na Torre

- Corrente na torre como soma das parcelas incidente e refletida

De acordo com a Figura 6.3, a corrente na torre pode ser estimada, analisando o seguinte processo: a corrente é transmitida à torre quando $t = 0$, chegando na base da mesma após transcorrido o tempo $t = h/c$. De volta ao topo, a corrente se divide em duas parcelas, uma é transmitida ao canal, e outra refletida, do topo da torre, para a base desta. A primeira não será considerada neste processo, a segunda contribui para a corrente calculada no topo e na base da torre. A corrente total pode ser calculada pela contribuição das parcelas no topo e na base, como segue:

i) Para $m = 0$, $t = 0$ (corrente é transmitida ao topo da torre).

$$I_{\text{Topo}} = i(h,t) = i_0(h,0) = i_0(t) \text{ no topo da torre}$$

$$I_{\text{Base}} = i(0,t) = i_0(0,0) = 0 \text{ na base da torre.}$$

ii) No momento $\tau = h/c = (m+1)h/c$, no topo e na base da torre, as correntes são:

$$I_{\text{Topo}} = i(h,t) = i_0(t) \text{ no topo da torre e,}$$

$$I_{\text{Base}} = i(0,t) = i_0(t-h/c) \rho_{\text{tb}} + i_0(t-h/c).$$

iii) Para $m = 1$, $t = 2h/c = 2mh/c$, no topo e na base da torre, as correntes são:

$$I_{\text{Topo}} = i(h,t) = i_0(t) + i_0(h,t-2h/c)\rho_{\text{tb}} + i_0(h,t-2h/c) \rho_{\text{tb}}\rho_{\text{tt}} \text{ e,}$$

$$I_{\text{Base}} = i(0,t) = (1 + \rho_{\text{tb}}) i_0(t-h/c).$$

iv) No momento $t = 3h/c = (2m+1)h/c$, no topo e na base, as correntes são:

$$I_{\text{Topo}} = i(h,t) = i_0(t) + (1 + \rho_{\text{tt}}) \rho_{\text{tb}} i_0(h,t-2h/c)$$

$$I_{\text{Base}} = i(0,t) = i_0(h,t-h/c) + i_0(h,t-h/c) \rho_{\text{tb}}\rho_{\text{tt}} + i_0(h,t-3h/c)\rho_{\text{tb}} \rho_{\text{tt}}$$

v) Para $m = 2$, $t = 4h/c = 2mh/c$, no topo e na base, as correntes são:

$$I_{\text{Topo}} = i(h,t) = i_0(t) + (1 + \rho_{\text{tt}}) \rho_{\text{tb}} i_0(h,t-2h/c) + i_0(h,t-2.2h/c)\rho_{\text{tb}}^2 \rho_{\text{tt}} + i_0(h,t-2.2h/c) \rho_{\text{tb}}^2 \rho_{\text{tt}}^2$$

$$I_{\text{Base}} = i(0,t) = i_0(t-h/c) + i_0(h,t-h/c) \rho_{\text{tb}}\rho_{\text{tt}} + i_0(h,t-3h/c)\rho_{\text{tb}} \rho_{\text{tt}}$$

As expressões são representadas na forma de um somatório, com índice “m” que é o número de reflexões no topo, dos coeficientes de reflexão na base e no topo da torre e da função de corrente que depende do tempo, da altura da torre e da velocidade de deslocamento de onda. Na seção seguinte são apresentadas as expressões para cálculo da corrente na base e no topo.

6.3.6 – Algoritmo para o Cálculo das Correntes

Para fins de cálculos computacionais, as relações entre corrente incidente, corrente refletida e coeficientes de reflexão são definidas no algoritmo construído de acordo com processo de reflexão de onda, que pode ser implementado em qualquer programa computacional.

Nas equações seguintes, “m” é o número de reflexões, h a altura da torre, c a velocidade da luz,

No topo, a corrente é estimada pela equação:

$$i(h,t) = i_0(t) + (1 + \rho_{\text{tt}}) \sum_{m=1}^{\infty} \rho_{\text{tb}}^m \rho_{\text{tt}}^{(m-1)} i_0\left(h, t - \frac{2mh}{c}\right) \quad (6.7)$$

Na base, a corrente é estimada pela equação:

$$i(0,t) = (1 + \rho_{\text{tb}}) \sum_{m=0}^{\infty} \rho_{\text{tb}}^m \rho_{\text{tt}}^m i_0\left(h, t - \frac{(2m+1)h}{c}\right) \quad (6.8)$$

A Equação (6.7), representa a expressão proposta por Guerrieri et al. (1998) desenvolvida para estimativas de correntes no topo das torres. A equação (6.8), representa a modificação da Equação (6.7), proposta por Guedes et al. (2002),

para estimações de correntes na base da torre.

6.4 – Aplicação do Algoritmo no Cálculo de Correntes na Torre de Peissenberg (Alemanha) (Beierl, 1992)

Beierl (1992), usou uma corrente em forma de rampa, com amplitude unitária para injetar no topo da torre de Peissenberg com 160 m de altura e estimar as correntes no topo e na base. Esta simulação é representada em dois cenários, no Cenário 1 e no Cenário 2.

Beierl (1992), ao analisar transitórios em torres, assumiu algumas condições iniciais, a começar considerando o coeficiente de reflexão do topo da torre $\rho_{tt} = -0,5$. Esta escolha significa que a impedância do canal é cerca de três vezes maior que a impedância da torre ou, $Z_{ch} = 3Z_T$. O tempo $t = 0$ foi considerado no momento em que a corrente é injetada e integralmente transmitida para o corpo da torre na direção descendente. Para repetir os resultados, é razoável computar uma seqüência de 3 reflexões nas extremidades da torre. A primeira reflexão da onda ocorre no solo em um tempo transcorrido igual h/c , onde $h = 160$ m, $c = 300$ m/ μ s e $h/c = 0,53$ μ s.

Beierl (1992) considerou o coeficiente de reflexão na base da torre igual a 1 ($\rho_{tb} = 1$) que corresponde a impedância de aterramento $Z_{gr} = 0$ (vide seção 5.8.3).

O pulso injetado foi substituído por um pulso de corrente idealizado pela função de corrente da Equação (4.8), Figura 6.4, cujos parâmetros são identificados na Tabela 6.1.

As reflexões produzidas pelo pulso de corrente em torres são mais facilmente percebidas quando o tempo de crescimento da frente do pulso (T_R) é menor que o tempo de tráfego da onda ($\tau_T = 2h/c$) pela torre.

A corrente i_B , tem amplitude máxima $I_0 = 1$ pu e tempo de crescimento da frente de onda menor que o tempo de tráfego da onda na torre ($T_R < 2\tau_T$).

A rampa com amplitude unitária e tempo de subida $0,6\mu$ s foi substituída pela curva da Figura (6.4), idealizada com os parâmetros da Tabela 6.1.

TABELA 6.1 – Parâmetros Aplicados na Equação (4.8) que Originaram a Corrente de Descarga de Retorno no Topo da Torre Peissenberg.

PARÂMETROS	DESCRIÇÃO	UNIDADE	DESCARGA DE RETORNO
$I_{o,max}$	Corrente máxima	Pu	1
η	Fator de correção	-	1
τ_1	Constante de tempo da frente do pulso	μs	0,2
τ_2	Constante de tempo de decaimento do pulso	μs	300
ρ_{tt}	Coefficiente de reflexão no topo da torre	-	-0,5
ρ_{tb}	Coefficiente de reflexão na base da torre	-	1
ρ_{cb}	Coefficiente de reflexão na base do canal	-	0,5

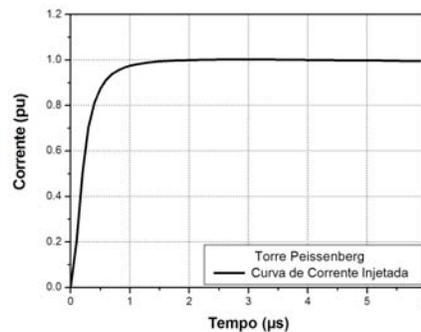


Figura 6.4 – Curva de corrente injetada na torre Peissenberg

Nas simulações, a fonte de corrente foi considerada ideal, a impedância da torre foi considerada menor que a do canal, $Z_T < Z_{ch}$, e a impedância de aterramento foi considerada menor que a impedância da torre, $Z_{gr} < Z_T$.

Segundo Beierl (1992), a análise de várias correntes medidas na torre Peissenberg, mostrou que os valores médios dos coeficientes de reflexão no topo e na base da torre são aproximadamente iguais a $\rho_{tb} = 1$ e $\rho_{tt} = -0,5$.

6.4.1 – Resultados Obtidos no Topo da Torre – Cenário 1

A forma de onda de corrente estimada no topo da torre é representada na Figura 6.5 e está de acordo com os resultados de Beierl (1992), considerando o

Cenário 1, onde a impedância do canal é considerada infinita no momento de injeção da corrente.

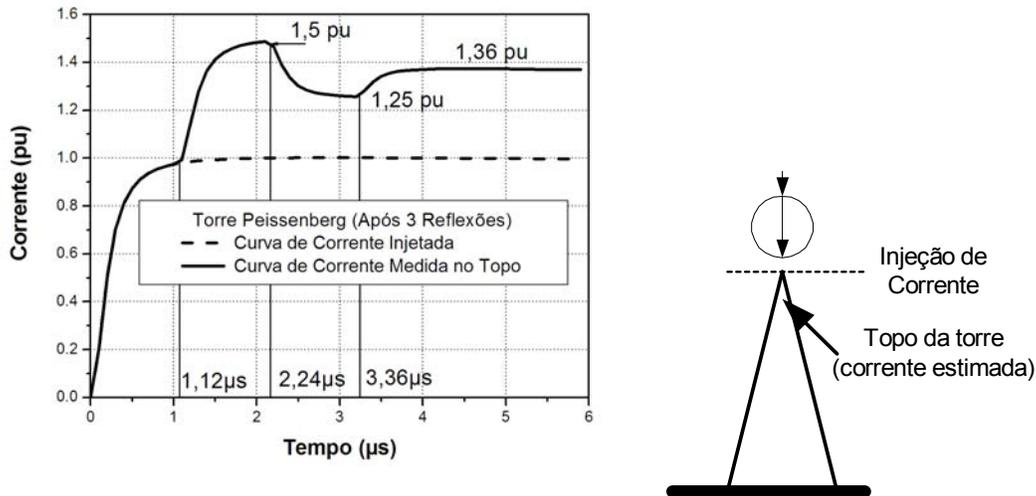


Figura 6.5 – Efeito das reflexões entre a base e o topo da torre, na corrente injetada no topo e estimada no topo – Cenário 1.

No entanto, para incluir o canal com impedância finita no momento de injeção de corrente, é necessário repetir a simulação no Cenário 2.

Beierl (1992), não considerou a parcela de corrente ascendente no canal, bem como, a parcela refletida na base do canal / topo da torre para o canal, por considerar a impedância do canal infinita.

6.4.2 – Resultados Obtidos no Topo da Torre – Cenário 2

Esta análise considera a existência do canal com impedância $Z_{ch} = 3Z_T$. Como conseqüência, a amplitude da corrente no corpo da torre será menor que a da corrente da fonte. Considerando a injeção de corrente imediatamente acima do topo da torre e que a amplitude máxima da corrente $I_0 = 1\text{ pu}$, então a corrente transmitida à torre I_T será:

$$I_T = I_0 \frac{Z_{ch}}{Z_{ch} + Z_T} = 1 \frac{3Z_T}{4Z_T} = 0,75\text{ pu}$$

$$\rho_{tt} = -0,5, \text{ logo } Z_{ch} = 3Z_T.$$

A Figura 6.6 mostra a curva resultante da simulação a qual está de acordo com os resultados de Schroeder (2001). O esquema que representa o cenário da simulação é mostrado ao lado da figura.

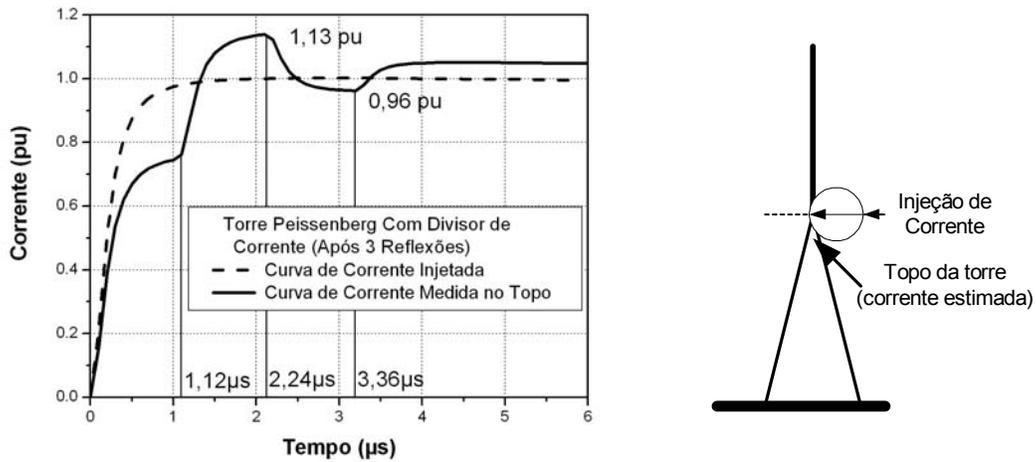


FIGURA 6.6 – Efeito das reflexões entre a base e o topo da torre, na corrente injetada no topo e estimada no topo – Cenário 2.

6.4.3 – Resultados Obtidos na Base da Torre - Cenário 1

A Figura 6.7 mostra as curvas de correntes injetada no topo (linha tracejada) e calculada na base da torre Peissenberg (linha cheia), com a fonte de corrente considerada ideal, que corresponde ao Cenário 1.

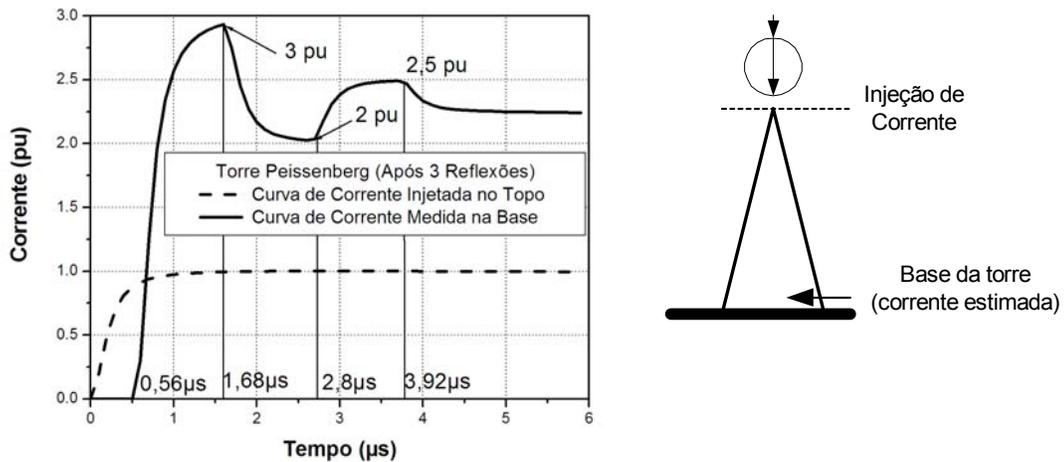


FIGURA 6.7 – Efeito das reflexões entre a base e o topo da torre, na corrente injetada no topo e estimada na base – Cenário 1.

6.4.4 – Resultados Obtidos na Base da Torre – Cenário 2

Na Figura 6.8 a forma de curva de corrente simulada na base (linha cheia), para

o mesmo pulso injetado no topo da torre (linha tracejada), considerando o canal, e fonte de corrente não ideal, que corresponde ao Cenário 2.

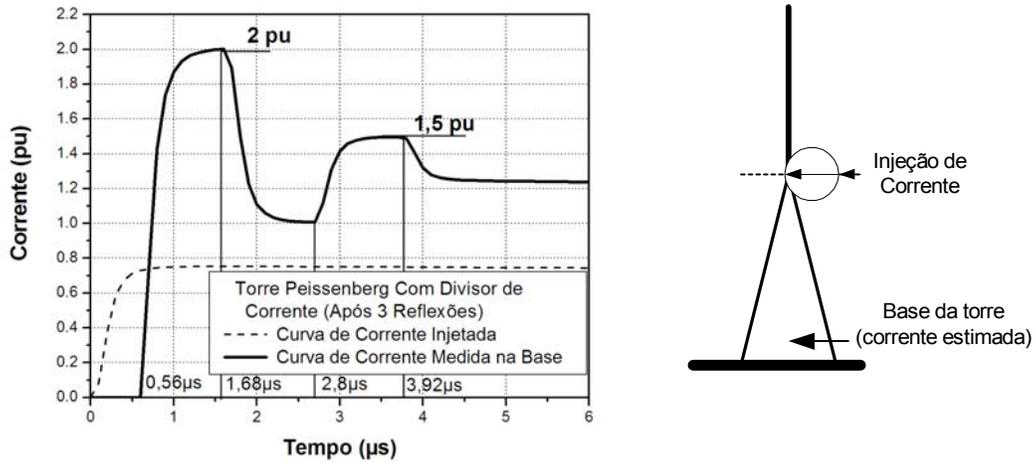


FIGURA 6.8 – Efeito das reflexões entre a base e o topo da torre, na corrente injetada no topo e estimada na base – Cenário 2.

Em ambos cenários, os resultados na base (sensores de corrente instalados no nível do solo), são diferentes daqueles obtidos nas estimativas no topo.

Dependendo do tempo de subida da frente de onda, e do tempo de tráfego da onda na torre, a corrente medida na base da torre pode ser influenciada pelo processo transitório, causado pela reflexão da onda, nos pontos de descontinuidade do meio (Rakov 2001).

A corrente medida na base (I_{base}) é cerca de 2 vezes I_0 ou mais:

$$I_{base} = \frac{I(3\tau T)}{I_0} = 2 pu$$

Considerando que a corrente é injetada no topo da torre no tempo $t = 0$, a onda chega à base no tempo $t = \tau_T = h/c$. De acordo com a Equação (6.8), a corrente estimada na base é:

$$I_{Base} = I_{\tau_T} = (1 + \rho_{tb}) \cdot (1 - \rho_{tt}) I_T = (1 + 1) (1 + 0,5) (1) = 3 pu$$

Os valores encontrados estão de acordo com as curvas nas Figuras 6.8 e 6.7, respectivamente.

Os resultados obtidos, tanto na base quanto no topo, podem apresentar

discrepâncias entre valores medidos e estimados. Estas diferenças são conseqüências das diversas simplificações assumidas.

6.5 – Resultados dos Cálculos de Corrente no topo das Torres St. Chrischona e San Salvatore (Suíça) (Guerrieri et al, 1998)

Guerrieri et al. (1998) desenvolveram o algoritmo (Equação 6.7), para estimar campos elétricos e magnéticos remotos, a partir de correntes medidas em torres, estimadas pelo modelo MTL. Em sua premissa básica, os autores consideraram a necessidade de introduzir uma técnica de descontaminação da corrente medida na torre, já que a medição do campo eletromagnético, naturalmente, sofre influência da contaminação na onda de corrente na torre.

6.5.1 – Resultados Obtidos no Topo das Torres

Para estimar a corrente medida no topo da torre, foi aplicado o modelo de Linha de Transmissão (MTL).

O objetivo foi determinar uma relação entre a corrente medida no topo da torre (considerada a corrente contaminada) e a corrente que seria medida se não houvesse o processo de reflexão na torre (determinando assim a corrente não contaminada). Os cálculos de Guerrieri et al. (1998) são reproduzidos inicialmente considerando o Cenário 1.

No desenvolvimento do algoritmo, foi considerado que o pulso de corrente injetado na torre teria uma forma de curva de corrente semelhante às médias obtidas por Berger (1975), mas com duas componentes de corrente, sugeridas no modelo Diendorfer e Uman (MDU), como exemplificado na **Aplicação 2** e modelada pela função de corrente de Heidler da Equação (4.8), com os parâmetros mostrados na Tabela (6.2).

A Figura 6.9 mostra o pulso de corrente idealizado por Guerrieri et al. (1998) e a sua derivada temporal (as curvas em linhas interrompidas, traço - traço e traço-ponto, são as componentes do pulso e da corrente corona, respectivamente).

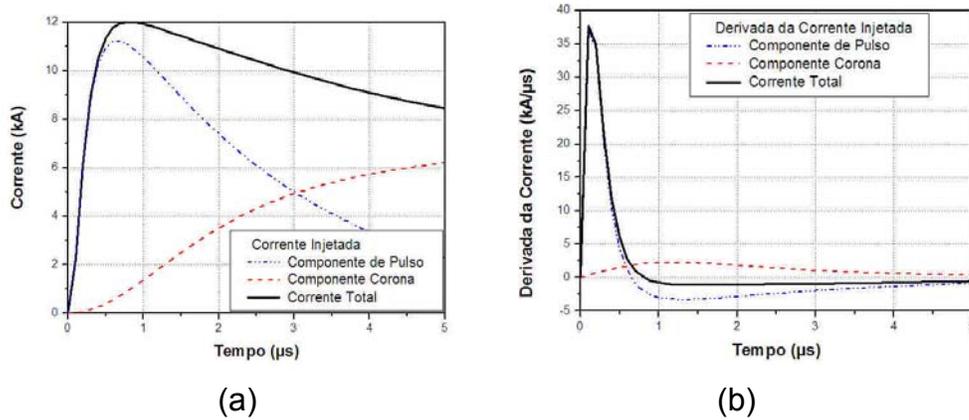


FIGURA 6.9 – Pulso de corrente idealizado por Guerrieri et al (1998); (a) Corrente; (b) Derivada temporal.

TABLEA 6.2 – Parâmetros das Duas Parcelas de Corrente que Reproduzem a Corrente Injetada no Topo da Torre.

PARÂMETROS	UNIDADE	MTL
		CORRENTE DR
I_{0bd}	kA	10,7
I_{0cr}	kA	6,5
η	-	-
τ_{11}	μs	0,25
τ_{21}	μs	2,5
τ_{12}	μs	2,1
τ_{22}	μs	230

FONTE: Guerrieri et al. (1998).

Os autores aplicaram o algoritmo a duas torres localizadas na Suíça, com alturas diferentes, St Chrischona, com 248 m de altura, e San Salvatore, com 55 m de altura.

Uma correção na altura da torre de MSS é necessária: segundo Berger (1967 e 1975), a altura das duas torres da estação de San Salvatore era 60 m, com a extensão de haste metálica de 10 m, com 70 m de altura total.

Foram considerados três casos e três grupos de coeficientes de reflexão cujos critérios de escolha foram:

- caso “a” - resultado de estudos de Willet et al (1989) ($\rho_{tb} = 0,74$; $\rho_{tt} = 0$);
- caso “b” - os mesmos coeficientes determinados por Beierl (1992) ($\rho_{tb} = 1$; $\rho_{tt} = -0,5$);
- caso “c” - estimativas próprias dos autores, para o caso específico da torre de St Chrischona, com base em medições de derivadas de corrente na própria torre ($\rho_{tb} = 0,3$; $\rho_{tt} = 0$).

As Figuras 6.10 e 6.11 reproduzem os resultados obtidos pelos autores considerando o Cenário 1.

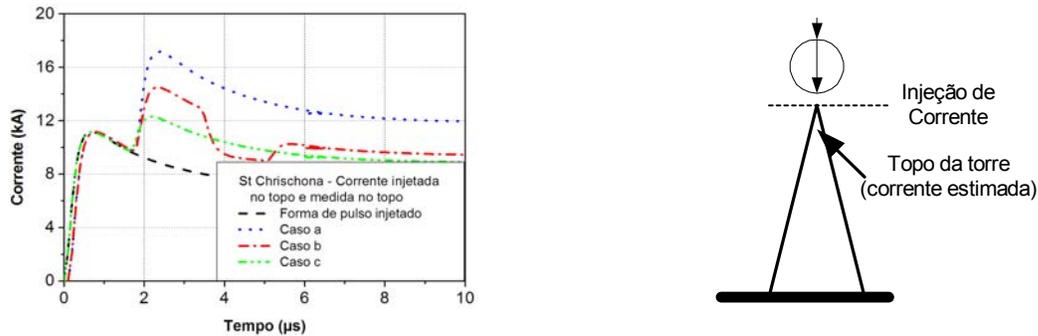


FIGURA 6.10 – Efeito das reflexões entre a base e o topo da torre St. Chrischona, corrente injetada no topo e estimada no topo – Cenário 1.

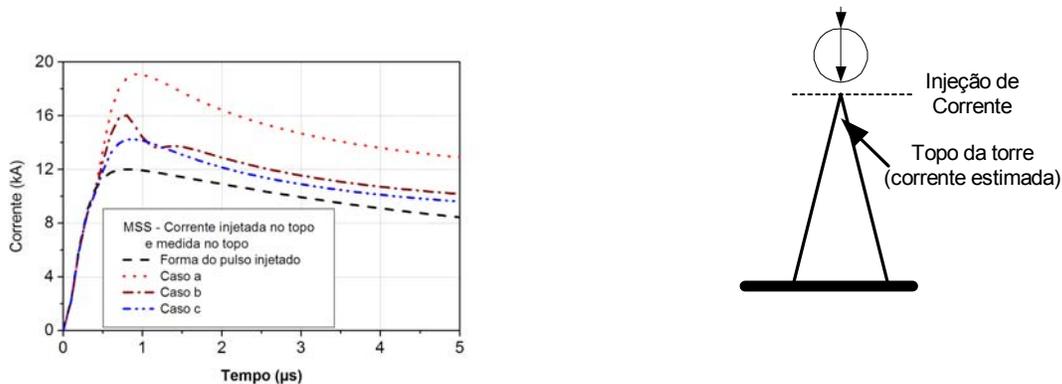


FIGURA 6.11 – Efeito das reflexões entre a base e o topo da torre Monte San Salvatore, corrente injetada no topo e estimada no topo – Cenário 1.

6.6 – Resultados dos Cálculos de Corrente na Base das Torres San Salvatore (Suíça) (Guedes et al. 2002)

Guedes et al. (2002) fizeram uma modificação do modelo de Guerrieri et al. (1998) para acessar os valores de correntes que seriam medidos na base das torres, considerando os mesmos critérios adotados no caso do item 6.5. Estes critérios, envolvem a aplicação do mesmo pulso injetado no topo da torre, coeficientes de reflexão nos casos “a”, “b” e “c” para calcular a corrente na base da torre de MSS.

O objetivo foi buscar uma aproximação teórica entre os valores estimados no topo e na base, para um mesmo pulso aplicado no topo da torre. A Figura 6.12 reproduz os resultados obtidos por Guedes et al. (2002).

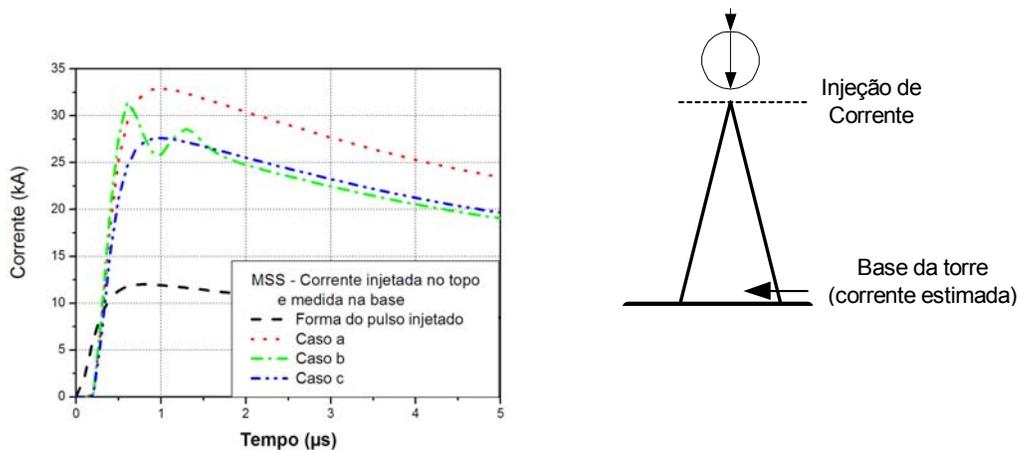


FIGURA 6.12 – Efeito das reflexões entre a base e o topo da torre Monte San Salvatore, corrente injetada no topo e estimada na base – Cenário 1.

6.7 – Restrições aos Modelos Guerrieri et al. e Guedes et al.

As restrições aos modelos Guerrieri et al. e Guedes et al. dizem respeito ao cenário no qual os cálculos foram efetuados. O algoritmo desenvolvido por Guerrieri et al. (1998), e por extensão, a modificação proposta por Guedes et al.

(2002), quando simulados no Cenário 1, não reproduzem resultados consistentes. A onda descendente propaga-se ao longo do canal, com a velocidade “c” como é especificado pelo modelo de engenharia, para a descarga de retorno. Como notado por Guerrieri et al. (2000), (em citação de Rachidi et al. 2002), a consideração de idênticas ondas injetadas, no canal do relâmpago e na torre ao mesmo tempo, implica que suas impedâncias características são iguais entre si, o que significa que, em grande parte estes modelos são inconsistentes, porque:

- a) não há descontinuidade no topo da torre no momento da junção dos líderes; e
- b) existe uma descontinuidade quando as reflexões na base chegam ao topo da torre.

Para eliminar as restrições é necessário fazer a simulação no Cenário 2.

6.8 – Resultados Obtidos nos Cálculos das Correntes nas Torres San Salvatore (Suíça) – Cenário 2

No Cenário 2, o que diferencia as técnicas, e revela um método diferencial em relação aos itens 6.5 e 6.6, é a eliminação da descontinuidade no momento da injeção de corrente no topo da torre, considerando a existência do canal e permitindo a identificação de parcelas de onda no canal e na torre.

A consequência imediata é a redução da corrente no corpo da torre, e o aparecimento de uma parcela de corrente fluindo pelo canal, pela consideração da existência deste. No entanto, as reflexões da onda refletida no canal só serão consideradas para a primeira onda refletida. As demais contribuições serão desprezadas.

Da relação
$$\rho_{tt} = \frac{Z_T - Z_{ch}}{Z_T + Z_{ch}}$$

é possível obter-se a relação entre as impedâncias da torre e do canal pela expressão

$$\frac{Z_T}{Z_{ch}} = \frac{1 + \rho_{tt}}{1 - \rho_{tt}}$$

que permite estimar as relações entre as impedâncias do canal e da torre:

para os casos “a” e “c”, como $\rho_{tt} = 0$, resulta $Z_T = Z_{ch}$;

e no caso “b”, como $\rho_{tt} = -0,5$ resulta $Z_{ch} = 3 Z_T$;

Nos casos “a” e “c”, onde as impedâncias do canal e da torre são iguais, a corrente injetada no topo da torre divide-se em duas parcelas iguais, com amplitudes máximas iguais a metade da amplitude da corrente injetada. Uma parcela ascendente flui pelo canal, e a outra descendente, percorre o corpo da torre até o solo.

No caso “b”, as parcelas de correntes que fluem pelo canal (ascendente), e pela torre (descendente), possuem respectivamente, amplitudes 25% e 75% menores que a amplitude da corrente injetada no topo da torre. Os resultados são apresentados, apenas para a torre da estação de transmissão, nos gráficos mostrados nas Figuras 6.13 e 6.14, respectivamente no t

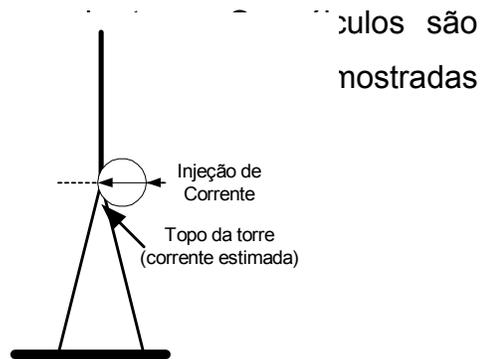
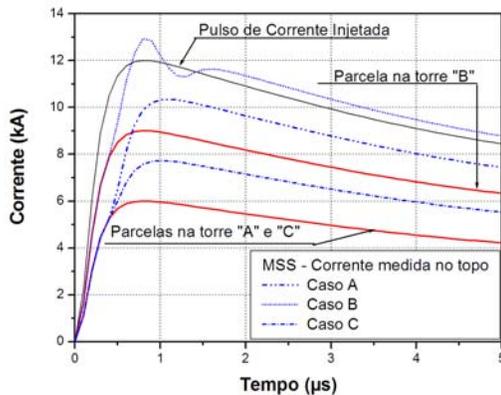


FIGURA 6.13 – Efeito das reflexões entre a base e o topo da torre Monte San Salvatore, corrente injetada no topo e estimada no topo – Cenário 2.

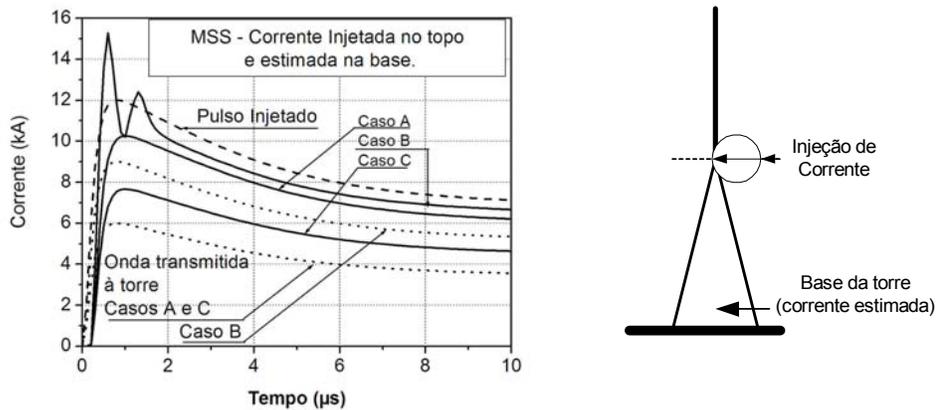


FIGURA 6.14 – Efeito das reflexões entre a base e o topo da torre Monte San Salvatore, corrente injetada no topo e estimada na base – Cenário 2.

6.9– Um Teste para as Equações (6.7) e (6.8)

Rakov (2001) define a corrente não contaminada como aquela que poderia ser medida em uma estrutura aterrada de altura desprezível. Na prática isto significa a inexistência da torre ($h = 0$) e que a impedância da torre Z_T é igual à impedância do canal Z_{ch} ($Z_T = Z_{ch}$), implicando que $\rho_{tt} = 0$. Rakov et al. (1998) mostraram que as descargas de retorno de relâmpagos induzidos medidas sob diferentes configurações de aterramento eram similares, sugerindo que a descarga era capaz de reduzir a impedância do solo vista do ponto de junção, a valores muito menores do que a impedância do canal. A redução da impedância do solo aparentemente é facilitada pela extensão ao solo e superfície, do canal ionizado de descarga.

No caso em que o número de reflexões $m = 0$, a altura da torre $h = 0$, o coeficiente de reflexão no topo da torre $\rho_{tt} = 0$, e o solo é plenamente condutor, de sorte que $\rho_{tb} = 1$, as equações (6.7) e (6.8) mostram os seguintes resultados:

a) Equação (6.7)

$$i(h,t) = i_0(t)$$

Este resultado significa que a corrente estimada a uma altura h , é igual à corrente não contaminada, consistente com a definição de Rakov (2001), se o

solo for considerado bom condutor. Neste caso não existem transitórios por não haver descontinuidade no canal.

b) Equação (6.8)

$$i(0,t) = 2i_0(t - h/c)$$

Este resultado significa que, na base de uma estrutura de altura h , onde a onda é totalmente refletida, a corrente estimada é duas vezes maior que a corrente incidente. Este resultado está de acordo com aqueles já mostrados anteriormente (Beierl, 1992) e com os resultados simulados por Rakov (2001), e com os resultados de Rachidi et al. (2002).

Se a altura da torre for desprezada, a Equação (6.8) resulta em $i(0,t) = 2i_0(t)$, o mesmo resultado da Equação (6.7).

Algumas das principais restrições / limitações aos algoritmos adotados, conforme Equações (6.7) e (6.8), como descrito nos modelos Guerrieri et al. (1998) e Guedes et al. (2002) respectivamente, são:

- a) canal e torre modelados como linhas de transmissão uniformes (indutância L e capacitância C não variam ao longo da extensão do canal e da torre);
- b) aterramento modelado como elemento concentrado;
- c) desconsideração do acoplamento eletromagnético entre canal, torre e aterramento;
- d) consideração de descontinuidade de impedância somente nas extremidades da torre (topo e base);
- e) modo de propagação do campo eletromagnético transversal (TEM).

Estas aproximações indicam que o modo de propagação TEM não é adequado para o estudo de contaminação e descontaminação de correntes estimadas em

torres “instrumentadas”, principalmente para torres de altura reduzida (como a do Morro do Cachimbo).

Schroeder, 2001 estimou as correntes medidas na base da torre do Morro do Cachimbo e verificou que os resultados finais são influenciados por tais restrições / limitações, considerando o modo TEM.

As influências as que se refere esta análise são identificadas nos casos em que o tempo de subida da frente da onda de corrente que percorre a torre é menor que o tempo necessário para a onda de corrente percorrer a torre do topo até a base e voltar ao topo com a velocidade da luz, sendo tão mais significativa a influência, quanto menor for o tempo de subida da frente de onda em relação ao tempo de tráfego na torre. Outros fatores podem influenciar esta relação, tais como a relação entre a impedância equivalente do canal e a impedância característica da torre.

CAPÍTULO 7

APLICAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO NO CÁLCULO DE CORRENTES NAS TORRES DAS ESTAÇÕES MORRO DO CACHIMBO E MONTE SAN SALVATORE

7.1 – Objetivo

O objetivo deste capítulo é a aplicação dos algoritmos no cálculo das correntes nas torres MCS e MSS. Três diferentes curvas de correntes são idealizadas, sendo duas para reproduzir as primeiras descargas de retorno nas estações MCS e MSS e uma para reproduzir as descargas subseqüentes, comuns às duas estações MCS e MSS.

Dois cenários são escolhidos para as simulações. Repete-se o Cenário 2 apenas no caso de MCS para a corrente de descarga subsequente e compõe-se um terceiro cenário com o deslocamento do ponto de injeção de corrente para uma posição a 300 m acima da torre (vide Figura 6.3). No Cenário 3, as correntes de descarga de retorno e subseqüentes são simuladas nas duas estações.

As curvas idealizadas são representadas pelos seguintes pulsos de corrente, e convencionou-se que a corrente negativa tem o sentido do solo para a nuvem:

a) um pulso de corrente (onda rápida), com tempo de frente de onda semelhante a uma descarga de retorno subseqüente, chamada de curva “DS”, aplicável às duas estações MCS e MSS, injetado no topo do canal de 300 m. Na estação MCS, além da injeção sobre o canal de 300 m, o pulso DS será injetado diretamente no topo da torre;

b) pulso de corrente com tempo (onda lenta) de frente de onda semelhante às primeiras descargas de retorno na torre MCS, chamada de “DR1”. Este pulso será injetado no topo do canal de 300 m sobre a torre MCS; e

c) pulso de corrente com tempo (onda lenta) de frente de onda semelhante às primeiras descargas de retorno na torre MSS, chamada de “DR2”. Este pulso será injetado no topo do canal de 300 m sobre a torre MSS.

7.2 – Pulso de Corrente

7.2.1 – Descarga Subseqüente

Na Seção 5.5.1 (vide Capítulo 5), os parâmetros das curvas de descarga de retorno na torre MCS foram obtidos diretamente nas curvas médias e foram mostrados na Tabela 5.1. O tempo de frente de onda T_{01} encontrado para as descargas subseqüentes de MCS, corresponde a $4\mu\text{s}$. O mesmo foi feito para as torres MSS na Seção 5.5.2, Tabela 5.2. Os tempos de frente de onda T_{01} encontrados para as descargas subseqüentes de MSS, correspondem a $3,58\mu\text{s}$ (torre T1) e $2,62\mu\text{s}$ (torre T2). Os tempos de frente de onda são muito semelhantes nas duas estações. No entanto, analisando as curvas individualmente em cada evento, foram identificados casos em que o tempo de subida da frente de onda variou numa faixa de $0,6\mu\text{s}$ a $10\mu\text{s}$.

Devido ao critério de alinhamento utilizado na obtenção da curva média das descargas DS (Figuras 5.3, 5.4b e 5.5b), os tempos de subida são muito altos ($4\mu\text{s}$ em MCS e $3,5\mu\text{s}$ em MSS). Para obter tempos de subida da frente de onda menores que aqueles obtidos nas curvas médias, foi idealizada uma curva de corrente de descarga subsequente com tempo de subida menor que $1\mu\text{s}$, sem no entanto, representar estatisticamente as curvas experimentais.

A Tabela 7.1 mostra os parâmetros aplicados na Equação (4.8) na idealização da curva de corrente DS representada na Figura 7.1a amplitude em função do tempo e Figura 7.1b, derivada temporal.

7.2.2 – Primeira Descarga de Retorno

Também na Seção 5.5.1 (vide Capítulo 5), os parâmetros das curvas das primeiras descargas de retorno na torre MCS foram obtidos diretamente nas curvas médias. O tempo de frente de onda T_{01} mostrado na Tabela 5.1,

corresponde a $17\mu\text{s}$. O mesmo foi feito para as torres MSS na seção 5.5.2, Tabela 5.2. Os tempos de frente de onda T_{01} encontrados para as primeiras descargas de retorno de MSS, correspondem a $15\mu\text{s}$ (torre T1) e $15,64\mu\text{s}$ (torre T2).

Embora os tempos de frente de onda das duas estações sejam próximos, os valores médios de pico de corrente são diferentes, acarretando diferentes taxas de crescimento da frente de onda. Por esta razão, duas formas de onda de corrente foram idealizadas para representar as primeiras descargas de retorno. A curva DR1 será aplicada em MCS e a curva DR2 em MSS.

Uma análise individual das curvas de correntes das primeiras descargas nas estações MCS e MSS (Figuras 5.2, 5.4a 5.5a), mostra tempos de frente de onda variando numa ampla faixa que vai de $12\mu\text{s}$ a $25\mu\text{s}$. As curvas idealizadas objetivam portanto, reproduzir os casos mais extremos encontrados.

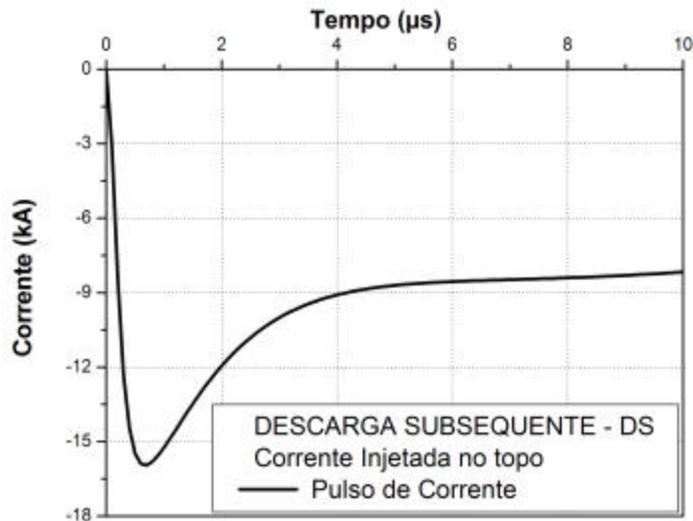
Os parâmetros da Tabela 7.1 definem os pulsos de corrente das descargas DS, DR1 e DR2.

TABELA 7.1 – Parâmetros Aplicados na Equação (4.8) que Originaram as Correntes da Primeira Descarga de Retorno e Descargas Subseqüentes.

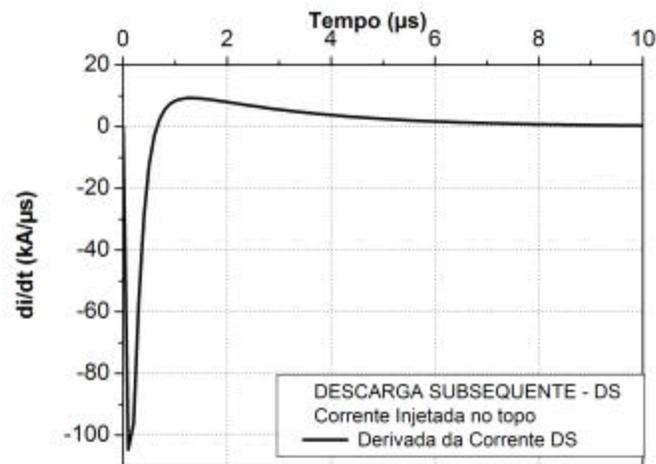
PARÂMETROS	DESCRIÇÃO	UNIDADE	DS	DR1	DR2
I_{01}	Pulso de corrente que rompe a rigidez dielétrica	kA	-15	-30	-21
I_{02}	Corrente corona	kA	-8	-16	-10
n	Fator de derivação (*)	-	-	4	4
τ_{11}	Constante da frente do pulso I_{01}	μs	0,25	15	8
τ_{21}	Constante de decaimento do pulso I_{02}	μs	2,5	20	14
τ_{12}	Constante de tempo da frente parcela corona	μs	6	20	12
τ_{22}	Constante de decaimento da corrente corona	μs	20	100	100
ρ_{tt}	Coeficiente de reflexão no topo	-	-0,5	-0,5	-0,5
ρ_{tb}	Coeficiente de reflexão na base	-	0,5	0,5	0,5
ρ_{cb}	Coeficiente de reflexão na base do canal	-	0,5	0,5	0,5
ρ_{ct}	Coeficiente de reflexão no topo do canal	-	-1	-1	-1

(*) – A curva DR1 foi obtida pela soma da corrente corona com fator de derivação $n = 2$ e do pulso de corrente que rompe a rigidez dielétrica do ar com $n = 4$.

Os pulsos de correntes DS, DR1 e DR2 são mostradas nas Figuras 7.1, 7.2 e 7.3, respectivamente.

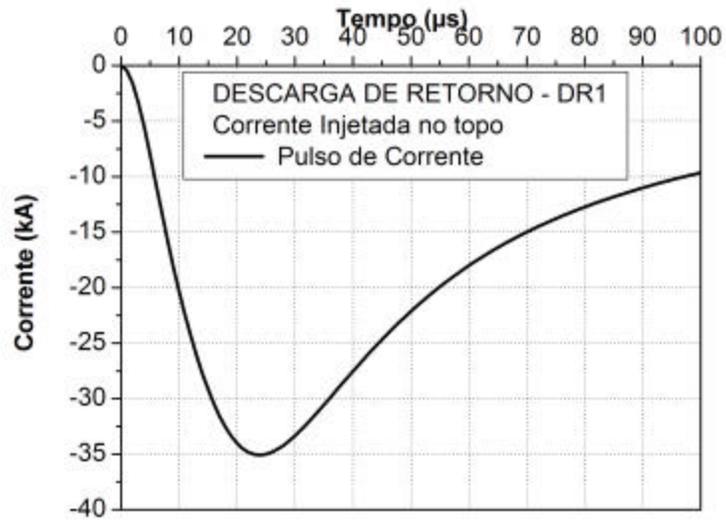


(a)

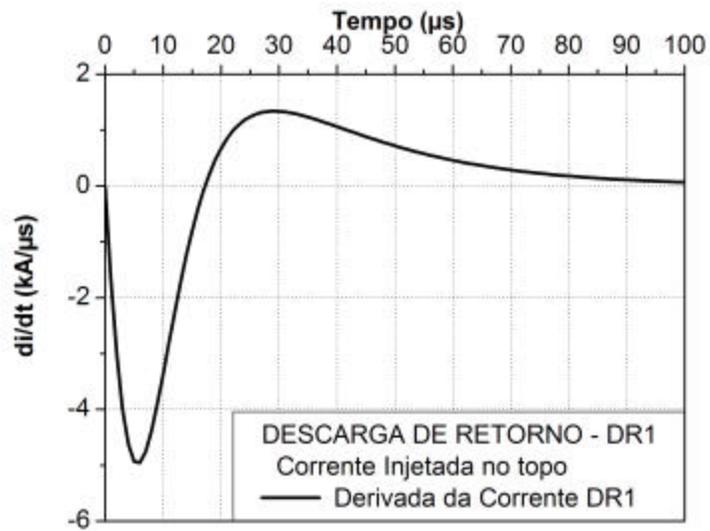


(b)

FIGURA 7.1 – Descarga subsequente DS, a) Pulso de Corrente; b) Derivada.

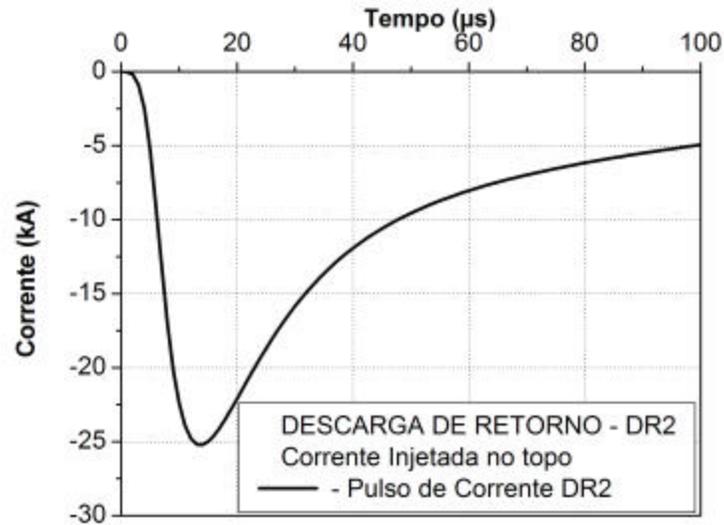


(a)

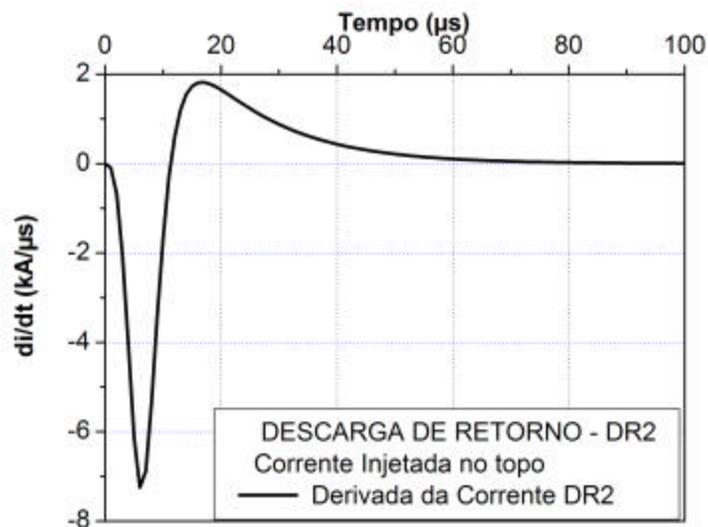


(b)

FIGURA 7.2 – Descarga de retorno DR1, a) Pulso de Corrente; b) Derivada.



(a)



(b)

FIGURA 7.3 – Descarga de retorno DR2, a) Pulso de Corrente; b) Derivada .

7.3 – Cálculo das Correntes nas Torres

7.3.1 – Esquema do Conjunto Canal-Torre-Aterramento

Os cálculos serão desenvolvidos nas torres MCS e MSS onde duas situações diferentes são analisadas. No primeiro caso simula-se a injeção de corrente DS

no topo da torre MCS, considerando-se a existência do canal, como no Cenário 2.

No segundo caso, que constitui o Cenário 3, a corrente foi suposta injetada no topo de um canal de 300 m. Numa estimativa mais conservadora, considera-se o ponto de junção localizado a 300 m acima da torre.

- No primeiro caso (Cenário 2) a corrente é injetada diretamente no topo da torre MCS. Uma parcela de corrente ascendente percorre o canal até o centro de cargas na nuvem. Outra parcela descendente chega à base da torre e é refletida com o coeficiente de reflexão na base ρ_{tb} . Uma parcela da onda é transmitida ao aterramento, pelo fator $(1 + \rho_{tb})$. A onda refletida ao topo da torre é novamente refletida para a base com o coeficiente de reflexão no topo da torre ρ_{tt} . No topo da torre, uma parcela é transmitida ao canal com o coeficiente de transmissão $(1 + \rho_{tt})$. As correntes no topo e na base são calculadas para um número de três reflexões.

Não são computadas, no primeiro caso (Cenário 2), as parcelas de corrente transmitidas da base da torre para o aterramento, nem do topo da torre para o canal, pois só importam as correntes que trafegam pelo corpo da torre.

- No segundo caso (Cenário 3), a corrente trafega pelo canal com a velocidade v_f até chegar ao topo da torre. A região entre o topo da torre e a base do canal, define um plano de interface que demarca uma descontinuidade. A corrente descendente que incide no plano de interface, se reflete para o canal com o coeficiente de reflexão ρ_{cb} e transmite uma parcela para a torre, com o fator de transmissão $(1 + \rho_{cb})$. A parcela de onda refletida no canal trafega ascendente com a velocidade da luz e reflete na fonte de corrente que se encontra no ponto de injeção. No cômputo da corrente imediatamente acima do plano de interface, são consideradas três reflexões na base do canal.

A parcela que é transmitida à torre chega a base desta e é refletida com o coeficiente de reflexão na base da torre ρ_{tb} . Uma parcela no entanto é

transmitida ao aterramento, pelo fator $(1 + \rho_{tb})$. A onda refletida que chega ao topo, é novamente refletida para a base com o coeficiente de reflexão no topo da torre ρ_{tt} . No topo da torre uma parcela é transmitida ao canal com o coeficiente de transmissão $(1 + \rho_{tt})$. As correntes no topo e na base são calculadas para o total de três reflexões.

A Figura (7.4) mostra o esquema do conjunto canal-torre-aterramento considerado.

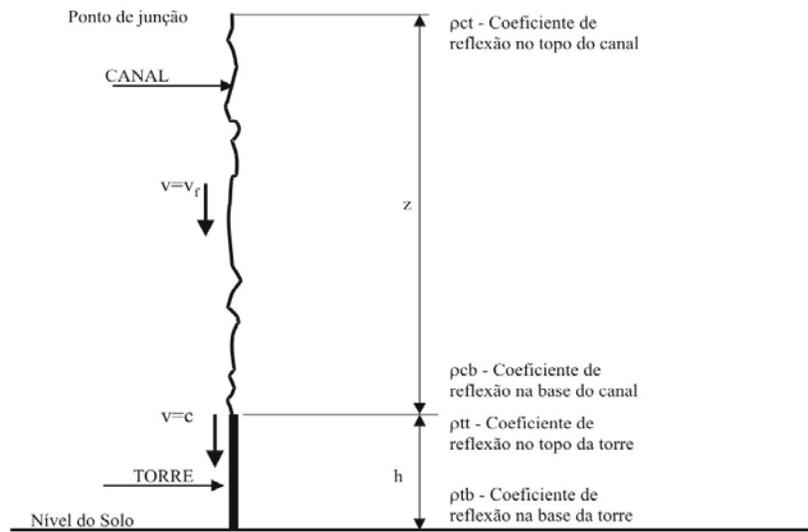


FIGURA 7.4 – Esquema de injeção da corrente no canal e no topo da torre.

Não são computadas as parcelas de corrente transmitidas da base do canal, no plano de interface, para a torre, a partir da segunda reflexão, nem da base da torre, para o aterramento, e nem do topo da torre, para o canal.

7.3.2 – Tempos de Tráfego no Canal e Torre

A velocidade da frente de onda é $130 \text{ m}/\mu\text{s}$ para as descargas de retorno DR1 e DR2, e a velocidade da frente de onda da descarga subsequente DS é $190 \text{ m}/\mu\text{s}$. Com base no esquema da Figura 7.4, os seguintes tempos de tráfego no canal e na torre são calculados a partir do momento que o pulso é injetado em $t = 0$:

- Onda do pulso de descarga de retorno DR1 e DR2, com velocidade $v_f =$

130 m/ μ s, no canal de 300 m de comprimento: $\tau_{ch} = 300/130 = 2,31\mu$ s.

- Onda do pulso de descarga subsequente DS, com velocidade $v_f = 190$ m/ μ s, no canal de 300 m de comprimento: $\tau_{ch} = 300/190 = 1,58\mu$ s
- Onda de corrente refletida no canal de 300 m de comprimento, DS, DR1 ou DR2, com velocidade de 300 m/ μ s: $\tau_{chw} = 300/300 = 1\mu$ s
- Termo de tráfego da onda refletida no canal, do topo da torre até o ponto de injeção e de volta ao topo da torre: DR1, DR2, $\tau_{chw} = 2 + 2,31 = 4,31\mu$ s; DS, $\tau_{chw} = 2 + 1,58 = 3,58\mu$ s.

Os tempos de tráfego na torre são:

- Torre de MCS com 60 m de altura e onda com velocidade de 300 m/ μ s: $\tau_T = 60/300 = 0,2\mu$ s. Tempo de tráfego em MCS = $2\tau_T = 400$ ns.
- Torre de MSS com 70 m de altura e onda com velocidade de 300 m/ μ s: $\tau_T = 70/300 = 0,23\mu$ s. Tempo de tráfego em MSS = $2\tau_T = 467$ ns.

Os tempos totais são determinados pelas seguintes relações, considerando o momento inicial ($t = 0$), quando a corrente é injetada no topo da torre (tempos no canal são iguais a $2,31\mu$ s para DR1 e DR2, e $1,58\mu$ s para DS):

- Base da torre para DS, MCS: $1,58\mu$ s + $3 \cdot (2 \cdot 0,2\mu$ s) = $2,78\mu$ s .
- Base da torre para DS, MSS: $1,58\mu$ s + $3 \cdot (2 \cdot 0,23\mu$ s) = $2,96\mu$ s .
- Base da torre para DR1, MCS: $2,31\mu$ s + $3 \cdot (2 \cdot 0,2\mu$ s) = $3,51\mu$ s.
- Base da torre para DR2, MSS: $2,31\mu$ s + $3 \cdot (2 \cdot 0,23\mu$ s) = $3,69\mu$ s .

As correntes são estimadas no topo da torre considerando o tempo inicial $t = 0$, no momento que a corrente é injetada no topo do canal. As correntes são estimadas na base da torre considerando o tempo inicial $t = 0$, no momento que a onda é transmitida ao topo da torre.

7.3.3 – Coeficientes de Reflexão de Onda

As reflexões de onda ocorrem nos pontos onde há descontinuidade no meio condutor. Tais pontos são considerados nesta análise, localizados nas extremidades da torre e no topo do canal. No item 5.8.3 (vide Capítulo 5) os coeficientes de reflexão na torre foram analisados. Para o topo e base da torre são escolhidos portanto, os seguintes valores:

- No topo da torre: $\rho_{tt} = -0,5$
- Na base da torre: $\rho_{tb} = 0,5$

Na fonte de corrente, a onda de corrente é totalmente refletida como uma onda de corrente negativa, portanto o coeficiente neste ponto é:

- No topo do canal: $\rho_{ct} = -1$

Na base do canal, imediatamente acima do plano de interface, para uma corrente descendente, o coeficiente é:

- Na base do canal: $\rho_{cb} = 0,5$

A Equação (6.8), quando aplicada ao cálculo da corrente na base do canal acima do plano de interface, deve ter os termos de reflexão na base e no topo da torre, substituídos pelos termos referentes à base e ao topo do canal, ou seja, “ ρ_{tb} ” por “ ρ_{cb} ” e “ ρ_{tt} ” por “ ρ_{ct} ”.

7.3.4 – Processo de Reflexão de Onda no Canal e na Torre

Considera-se que o pulso é supostamente injetado no topo do canal no tempo ($t = 0$). O tempo de tráfego do pulso no canal, do ponto de injeção até o topo da torre compreende o intervalo de tempo $0 < t < \tau_{ch}$.

No momento que o pulso chega ao topo da torre, o tempo transcorrido é $t = \tau_{ch}$. O pulso no topo da torre divide-se em duas componentes. Uma é refletida para o canal, com o coeficiente de reflexão ρ_{cb} e outra é transmitido para a torre, com o fator $(1 + \rho_{cb})$.

Onda refletida no canal no sentido ascendente:

- A onda refletida no topo da torre para o canal leva um tempo de $2\tau_{chw}$ para voltar ao topo da torre, após ser refletida no topo do canal pelo coeficiente de reflexão $\rho_{ct} = -1$, na fonte de corrente.

Onda transmitida à torre no sentido descendente:

- A parcela transmitida para o corpo da torre, leva um tempo igual a τ_T , para chegar à base onde é refletida para o topo com o fator $\rho_{tb} = 0,5$. Após $2\tau_T$, a onda refletida volta ao topo da torre de onde é novamente refletida para a base com o fator $\rho_{tt} = -0,5$. Após três reflexões a corrente é estimada no topo e na base da torre.

Ondas transmitidas do topo da torre para o canal no sentido ascendente:

- Cada vez que a parcela refletida na base da torre atinge o topo, parte dela é transmitida para o canal. No Cenário 2 a onda levará um tempo de tráfego maior que o tempo de registro nos instrumentos para retornar, considerando que a altura do canal é muito maior que a da torre. No Cenário 3, a onda levará um tempo de $2\tau_{chw} = 2\mu s$, para retornar ao topo da torre. As contribuições destas parcelas todavia, serão desprezadas.

7.4 – Resultados Obtidos Após Injeção do Pulso na Torre MCS – Cenário 2

Quando o pulso de corrente é injetado no topo da torre, duas parcelas de corrente são identificadas. Uma ascendente no canal (não levada em consideração) e outra descendente na torre. Esta componente de corrente descendente contribui com 3 reflexões para a corrente estimada no topo e na base da torre.

7.4.1 – Resultados Obtidos no Cálculo da Corrente DS no Topo da Torre

A corrente estimada no topo da torre é mostrada na Figura (7.5), com esquema ilustrativo da injeção do pulso e estimação da corrente ao lado da figura.

Na Figura (7.5) tem-se: a) o pulso de corrente injetado no topo da torre (linha

tracejada); b) a parcela de corrente ascendente no canal (linha pontuada); c) a parcela de corrente descendente no corpo da torre (linha traço-dois pontos); d) a corrente estimada no topo da torre (linha cheia), após três reflexões.

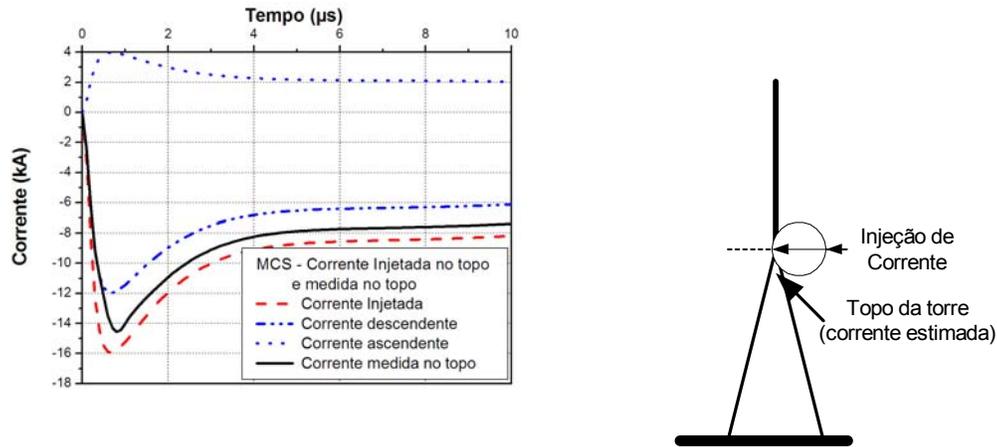


FIGURA 7.5 - Efeito das reflexões entre a base e topo da torre para corrente injetada no topo e estimada no topo da torre - Cenário 2.

A simulação no Cenário 2 fornece resultados que devem ser avaliados à luz das restrições impostas ao processo pela não consideração das contribuições da parcela ascendente de onda.

7.4.2 – Resultados Obtidos no Cálculo de Corrente DS na Base da Torre

A corrente estimada na base da torre é mostrada na Figura 7.6, com esquema ilustrativo de injeção do pulso e estimação da corrente ao lado da figura.

Na Figura 7.6 tem-se: a) o pulso de corrente injetado no topo da torre (linha tracejada); b) a parcela de corrente ascendente no canal (linha pontuada); c) a parcela de corrente descendente no corpo da torre (linha traço-dois pontos); d) a corrente estimada na base da torre (linha cheia), após três reflexões.

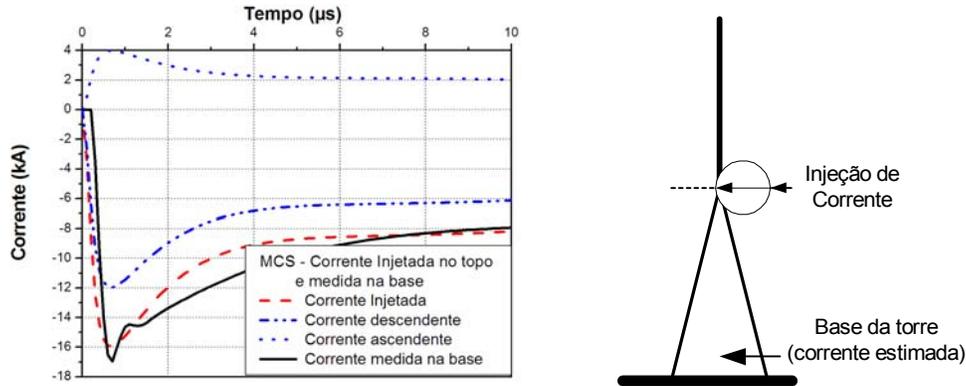


FIGURA 7.6 - Efeito das reflexões entre a base e topo da torre, na corrente injetada no topo da torre e estimada na base - Cenário 2.

A Figura 7.6 exhibe dois picos de corrente, sendo o segundo, menos acentuado que o primeiro pico.

Analisando descargas de retorno na estação MCS, Pinto et al. (2003) fizeram uma análise da polaridade e da multiplicidade de descargas atmosféricas em torre no Brasil (Morro do Cachimbo) e compararam os resultados com os dados obtidos na Suíça. As curvas de corrente de DR's medidas na base da torre MCS, exibiram dois picos de corrente.

A forma da curva idealizada na Figura 7.6, também mostra os dois picos de corrente, e uma forma côncava entre eles, muito característica neste tipo de curva. Um histograma que mostra a ocorrência dos picos de corrente nas curvas medidas na MCS é mostrado na Figura 7.7.

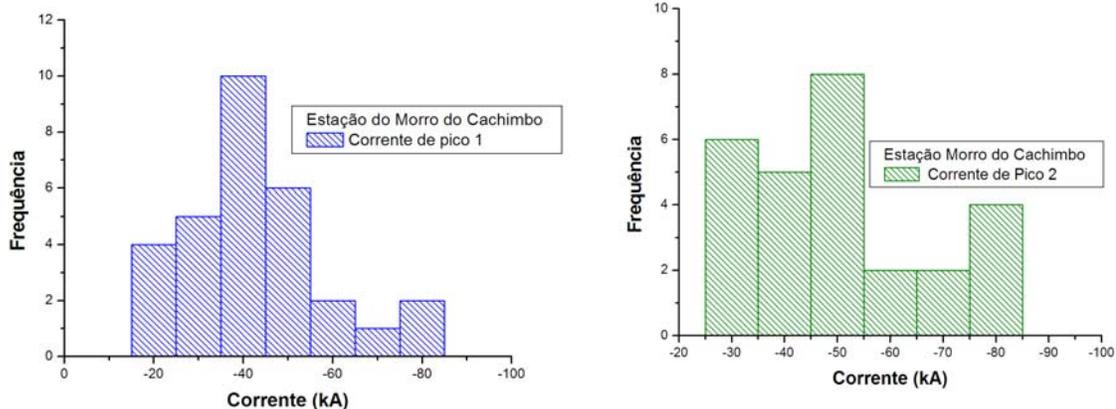


FIGURA 7.7 – Histogramas de distribuição de valores de pico das correntes de descarga de retorno de relâmpagos negativos descendentes medidos na MCS.

Algumas conclusões preliminares podem ser antecipadas:

a) a taxa de crescimento da corrente registrada na base é mais acentuada que a registrada no topo da torre (para a mesma curva de corrente descendente no corpo da torre, usada nos dois casos). Esta constatação está de acordo com Eriksson (1972), Melander (1984), Rakov (2001), Schroeder (2001), Guedes et al (2002).

b) para ondas rápidas, o valor de pico da corrente estimada na base é mais alto que no topo, para um mesmo pulso de corrente injetada na torre. A relação entre a corrente máxima na base e a corrente máxima no topo da torre é:

$$\frac{I_{base}}{I_{topo}} = \frac{-16,9}{-14,5} = 1,17$$

A corrente máxima estimada na base é 17% maior que aquela estimada no topo.

7.5 – Resultados Obtidos Após Injeção dos Pulsos no Topo do Canal sobre a Torre MCS – Cenário 3

Quando o pulso de corrente é injetado no topo do canal, a 300 m acima da torre MCS, considera-se que nenhuma parcela de corrente ascenderá ao canal, com direção ao centro de cargas na nuvem. Quando o pulso de corrente descendente chega ao topo da torre, duas componentes são identificadas: a primeira corresponde à onda refletida em direção ascendente no canal; a segunda corresponde à onda de corrente transmitida à torre. Considerando um plano de interface entre o canal e a torre, determina-se dois pontos contíguos, um acima do plano, que compreende o local onde a corrente será estimada na base do canal e outro ponto abaixo do plano, que compreende o local onde a corrente também será estimada no topo da torre.

A corrente estimada na base do canal (acima do plano) é o resultado de três reflexões da componente ascendente refletida para o canal. Considera-se neste caso, que não há contribuição de nenhuma outra parcela de onda.

A corrente estimada no topo da torre (abaixo do plano) assim como a corrente estimada na base da torre, são resultados da onda refletida três vezes na torre. As parcelas de onda transmitidas do topo para o canal e na base para o aterramento não serão consideradas.

O processo descrito vale para as curvas DS e DR1.

7.5.1 – Resultados Obtidos no Cálculo da Corrente DS na Torre MCS

A corrente estimada na base do canal (ponto acima do plano) e o esquema ilustrativo são mostrados na Figura 7.8.

Na Figura 7.8 tem-se: a) o pulso de corrente injetado no topo do canal (linha tracejada); b) o pulso na base do canal após transcorrido o tempo de tráfego no canal (linha traço-ponto); c) a parcela de corrente transmitida à torre (linha cheia); d) a corrente estimada após três reflexões (linha cheia). (A legenda se aplica às demais figuras desta seção).

O primeiro amortecimento na frente de onda de corrente na base do canal, demarca a forma da curva do pulso transmitido à torre, deslocado da origem de

um tempo igual ao tempo de tráfego no canal. Fu e Heidler et al. (2001), sugerem que este amorpico da corrente não contaminada que é transmit

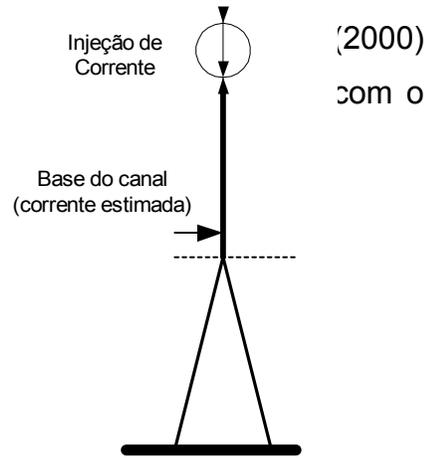
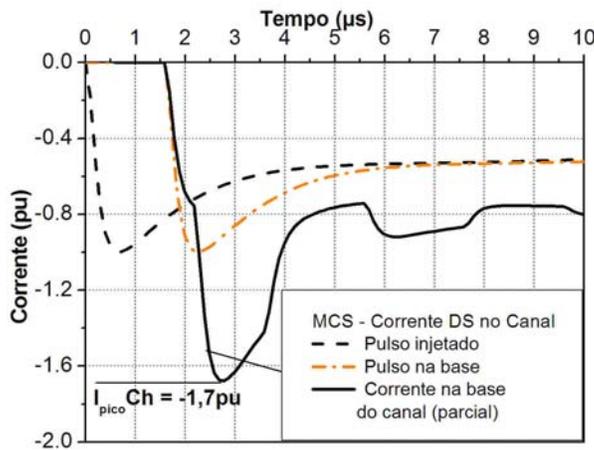


FIGURA 7.8 – Representação em seqüência das parcelas de corrente e onda calculadas na base do canal.

Considera-se que a descarga de retorno subsequente encontra o canal ainda ionizado, não existindo nesta situação, o processo de ligação e a junção de líderes. A simulação da corrente injetada no topo do canal de 300 m de comprimento configura o Cenário 3.

A corrente estimada no topo da torre (ponto abaixo do plano) e o esquema ilustrativo são mostrados na Figura 7.9.

Na Figura 7.9 tem-se: a) o pulso no topo da torre após transcorrido o tempo de tráfego no canal; c) a parcela de corrente transmitida à torre; d) a corrente estimada após três reflexões.

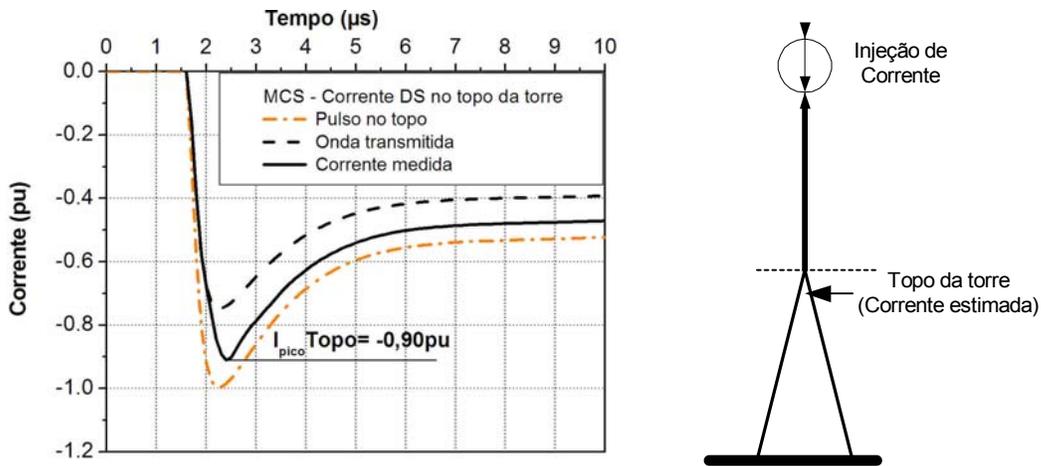


FIGURA 7.9 – Representação da parcela de corrente e onda refletida na torre calculada no topo da torre.

A corrente estimada na base da torre e o esquema ilustrativo são mostrados na Figura 7.10.

Na Figura 7.10 tem-se: a) o pulso no topo da torre depois de transcorrido o tempo de tráfego no canal; c) a parcela de corrente transmitida à torre; d) a corrente estimada após três reflexões.

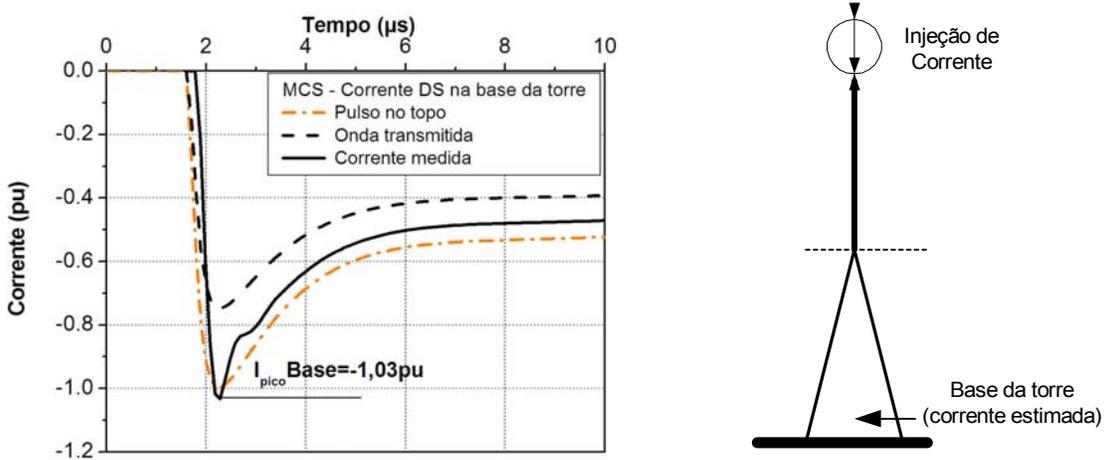


FIGURA 7.10 – Representação das parcelas de corrente e onda na torre, e corrente estimada na base da torre.

Considerando o pulso DS injetado no canal e a contribuição da parcela refletida

na torre, as amplitudes máximas das correntes são -1,03pu e -0,90pu, respectivamente na base e no topo da torre. A relação entre as correntes de descarga de retorno subsequentes estimadas na base e no topo da torre MCS é:

$$\frac{I_{base}}{I_{topo}} = \frac{1,03}{0,9} = 1,144$$

Significando que no Cenário 3, a corrente na base é cerca de 14,4% maior que a corrente no topo da torre, diferente da relação de 17% obtida na simulação do Cenário 2.

Esta relação é válida para ondas rápidas, que correspondem às descargas de retorno subsequentes.

7.5.2 – Resultados Obtidos no Cálculo da Corrente DR1 na Torre MCS

A corrente estimada na base do canal (ponto acima do plano) e o esquema ilustrativo são mostrados na Figura 7.11.

Na Figura 7.11 tem-se: a) o pulso de corrente injetado no topo do canal; b) o pulso na base do canal após transcorrido o tempo de tráfego no canal; c) a parcela de corrente transmitida à torre; d) a corrente estimada após três reflexões.

Neste caso em que as ondas possuem frentes mais lentas, não é possível visualizar o primeiro amortecimento na frente de onda de corrente, o que em outras palavras, significa que o processo transitório não é identificável em torres baixas quando atingidas por descargas com tempo de subida da frente de onda de corrente considerados lentos.

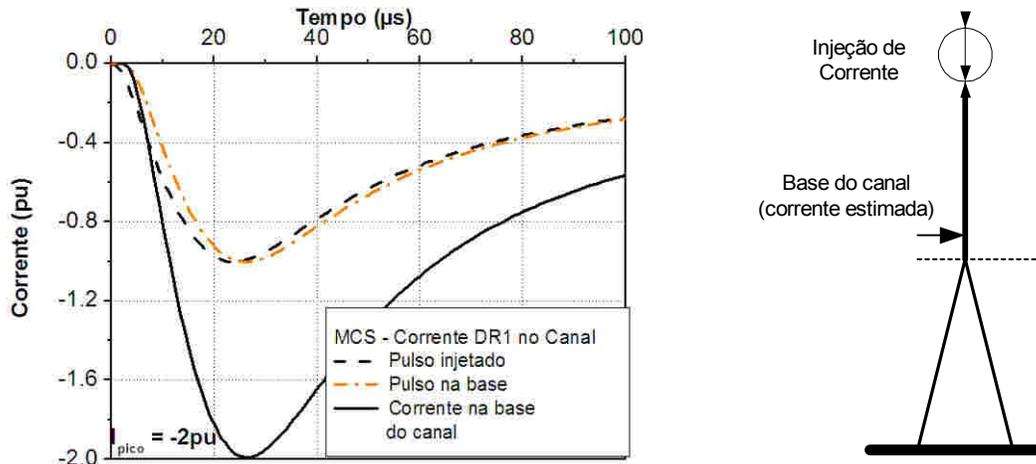


FIGURA 7.11 – Representação das parcelas de corrente DR1 no canal, calculadas na base do canal.

A corrente estimada no topo da torre (ponto abaixo do plano) e o esquema ilustrativo são mostrados na Figura 7.12.

Na Figura 7.12 tem-se: a) o pulso no topo da torre após transcorrido o tempo de tráfego no canal; b) a parcela de corrente transmitida à torre; c) a corrente estimada após três reflexões.

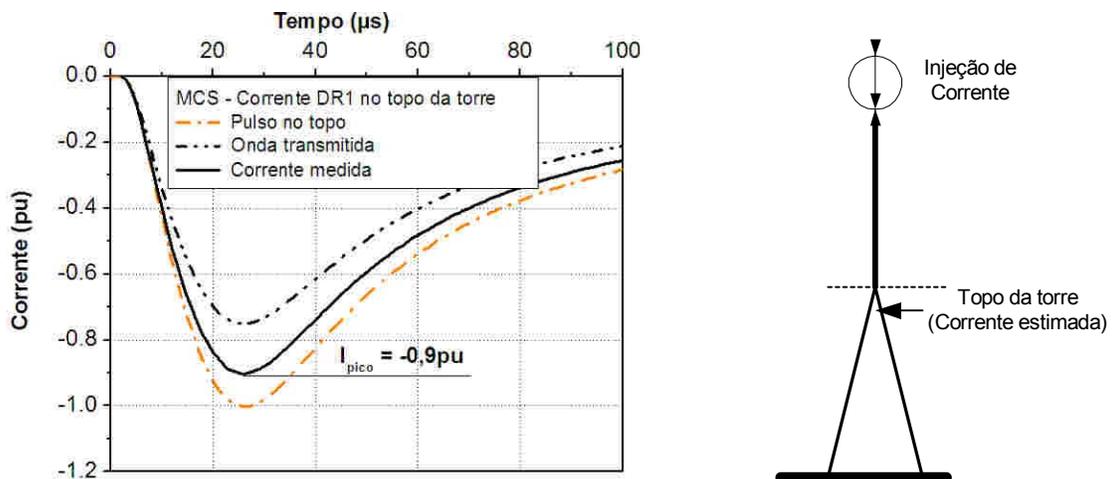


FIGURA 7.12 – Representação das parcelas de onda de corrente DR1 na torre corrente calculada no topo torre.

A corrente estimada na base da torre e o esquema ilustrativo são mostrados na Figura 7.13.

Na Figura 7.13 tem-se: a) o pulso no topo da torre após transcorrido o tempo de tráfego no canal; b) a parcela de corrente transmitida à torre; c) a corrente estimada após três reflexões.

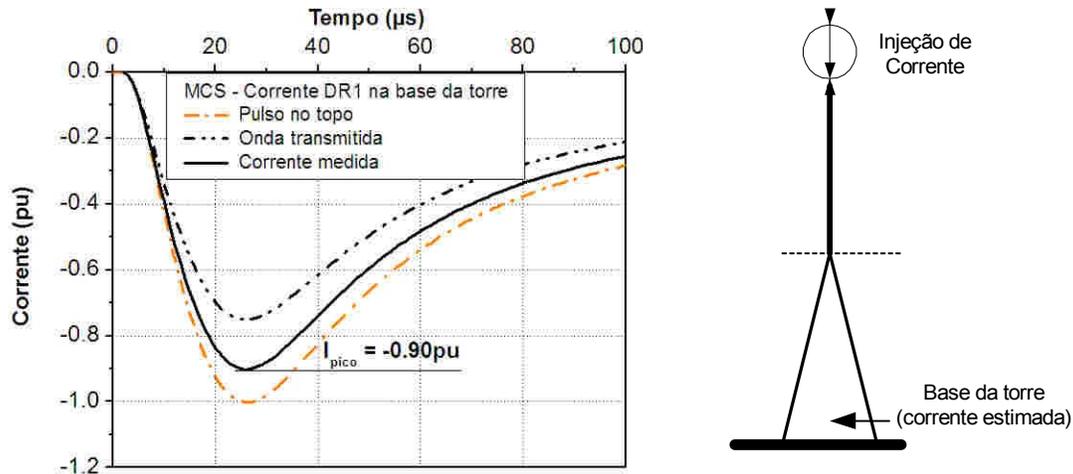


FIGURA 7.13 – Representação das parcelas de corrente DR1 e onda na torre e corrente estimada na base da torre.

Considerando o pulso DR1 injetado no canal e a contribuição da parcela refletida na torre, as amplitudes máximas das correntes são iguais, na base e no topo, a $-0,90pu$. A relação entre as correntes da primeira descarga de retorno, estimadas na base e no topo da torre MCS, é igual a 1. Isto significa que o valor do pico da corrente estimada na base é igual ao da corrente estimada no topo da torre.

Esta relação é válida para ondas lentas, que correspondem às primeiras descargas de retorno.

7.6 – Resultados Obtidos Após Injeção de Pulsos no Topo do Canal sobre a Torre MSS – Cenário 3

Como o processo que se estabelece na torre MSS com as correntes DS e DR2,

injetadas no canal é semelhante à estação MCS, detalhada no item 5.5, serão a seguir, mostrados os resultados obtidos.

7.6.1 – Resultados Obtidos no Cálculo da Corrente DS nas Torres MSS

A corrente DS estimada na base do canal (ponto acima do plano) e o esquema ilustrativo são mostrados na Figura 7.14.

Na Figura 7.14 tem-se: a) o pulso de corrente injetado no topo do canal; b) o pulso na base do canal após transcorrido o tempo de tráfego no canal; c) a parcela de corrente transmitida à torre; d) a corrente estimada após três reflexões.

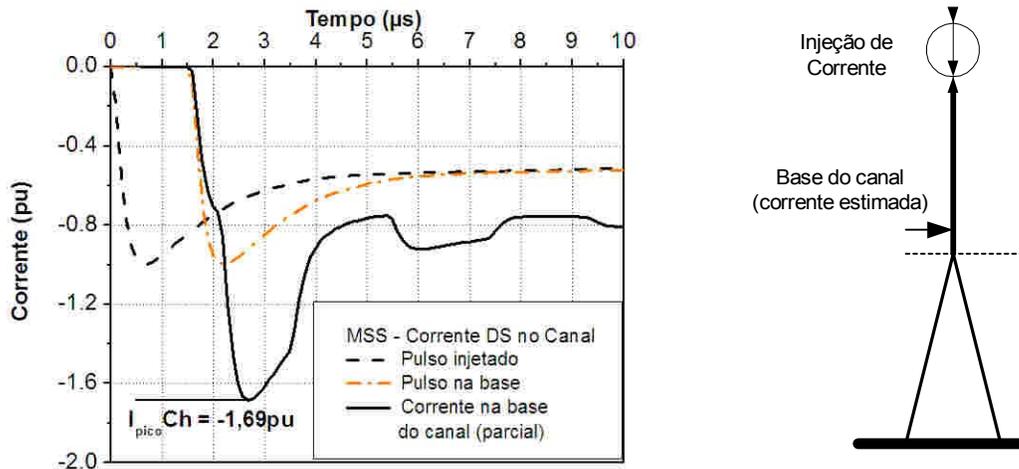


FIGURA 7.14 – Representação em seqüência, das parcelas de corrente e onda calculadas na base do canal.

A corrente estimada no topo da torre (ponto abaixo do plano) e o esquema ilustrativo são mostrados na Figura 7.15.

Na Figura 7.15 tem-se: a) o pulso no topo da torre depois de percorrer o canal; b) a parcela de corrente transmitida à torre; c) a corrente estimada após três reflexões

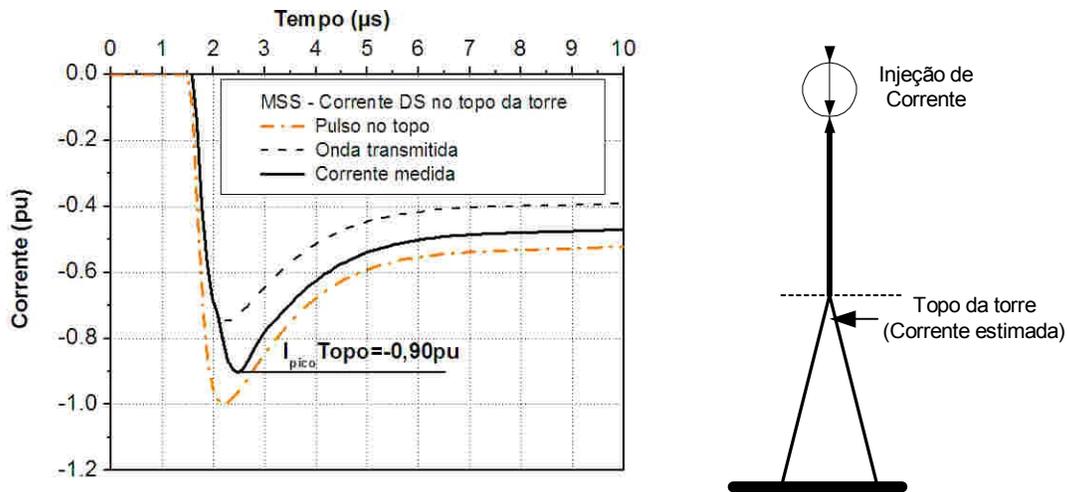


FIGURA 7.15 – Representação da parcela de corrente e onda refletida na torre, calculadas no topo da torre.

A corrente estimada na base da torre e o esquema ilustrativo são mostrados na Figura 7.16.

Na Figura 7.16 tem-se: a) o pulso no topo da torre após transcorrido o tempo de tráfego no canal; c) a parcela de corrente transmitida à torre; d) a corrente estimada após três reflexões.

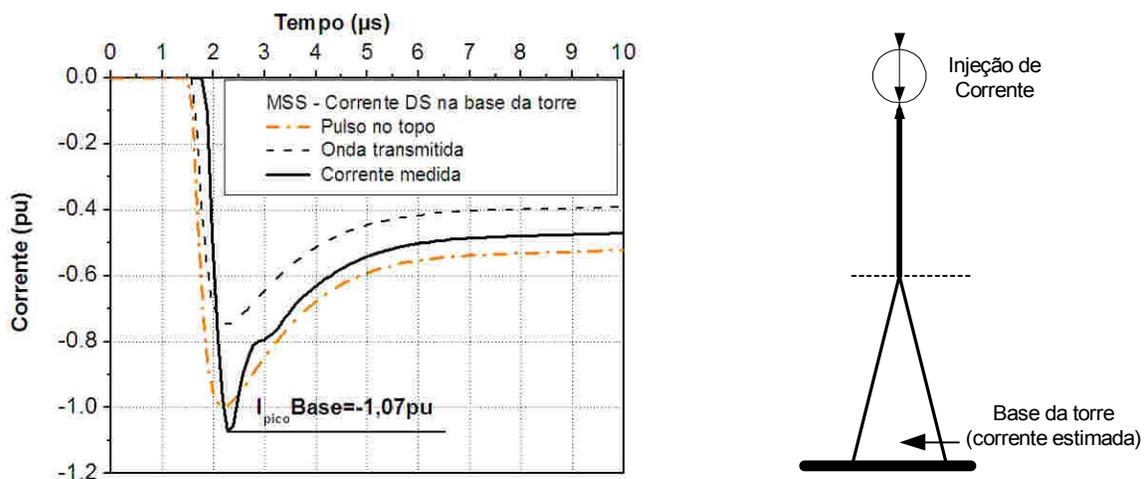


FIGURA 7.16 – Representação das parcelas de corrente e onda na torre e corrente estimada na base da torre.

Considerando o pulso DS injetado no canal e a contribuição da parcela refletida na torre, as amplitudes máximas das correntes são -1,07pu e -0,90pu, respectivamente, na base e no topo da torre. A relação entre as correntes de descarga de retorno subseqüentes estimadas na torre MSS é:

$$\frac{I_{base}}{I_{topo}} = \frac{1,07}{0,9} = 1,189$$

Significando que a corrente na base é cerca de 18,9% maior que a corrente no topo da torre.

Esta relação é válida para ondas rápidas, que correspondem às descargas de retorno subseqüentes.

7.6.2 – Resultados Obtidos no Cálculo da Corrente DR2 nas Torres MSS

A corrente estimada na base do canal (ponto acima do plano) e o esquema ilustrativo são mostrados na Figura 7.17.

Na Figura 5.17 tem-se: a) o pulso de corrente injetado no topo do canal; b) o pulso na base do canal após transcorrido o tempo de tráfego no canal; c) a parcela de corrente transmitida à torre; d) a corrente estimada após três reflexões.

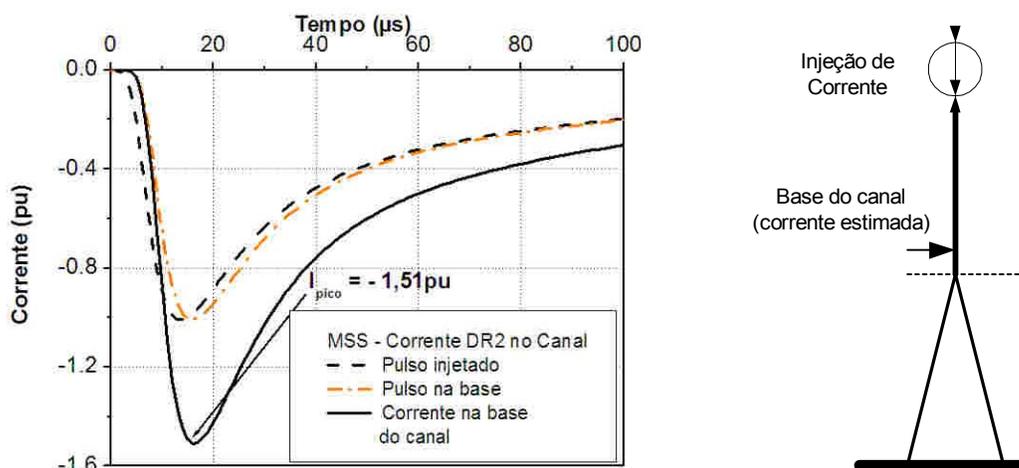


FIGURA 7.17 – Representação em seqüência das parcelas de corrente e onda no canal, calculadas na base do canal.

A corrente estimada no topo da torre (ponto abaixo do plano) e o esquema ilustrativo são mostrados na Figura 7.18.

Na Figura 7.18 tem-se: a) o pulso no topo da torre após transcorrido o tempo de tráfego no canal; b) a parcela de corrente transmitida à torre; c) a corrente estimada após três reflexões

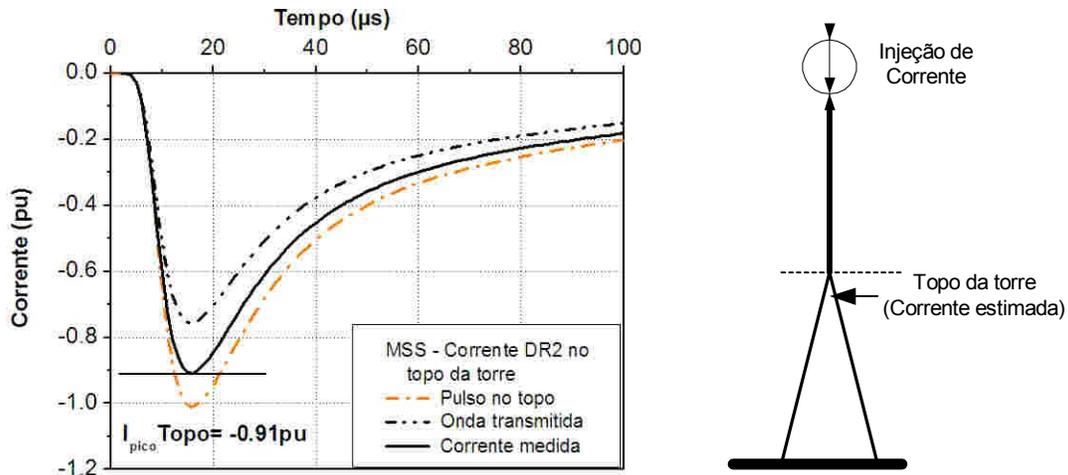


FIGURA 7.18 – Representação da parcela de corrente e onda refletida na torre e calculada no topo da torre.

A corrente estimada na base da torre e o esquema ilustrativo são mostrados na Figura 7.19.

Na Figura 7.19 tem-se: a) o pulso no topo da torre após transcorrido o tempo de tráfego no canal; b) a parcela de corrente transmitida à torre; c) a corrente estimada após três reflexões.

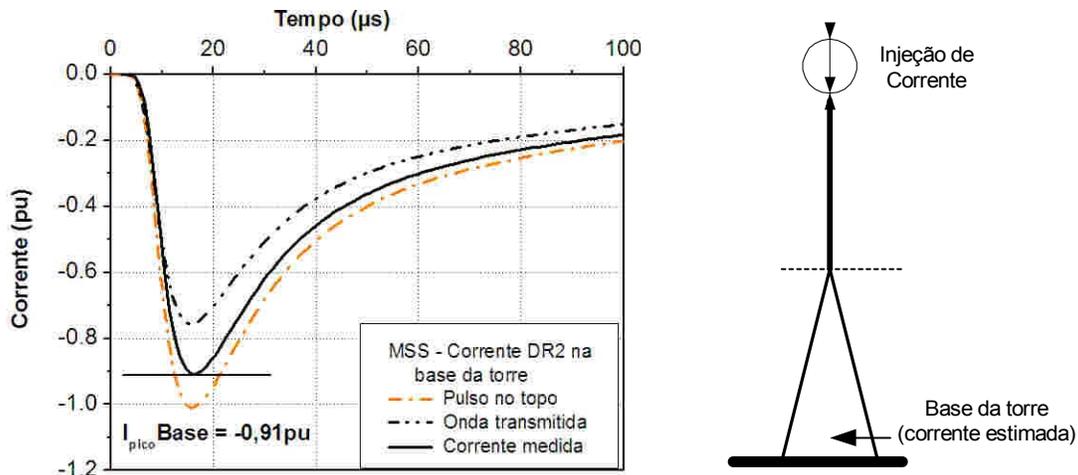


FIGURA 7.19 – Representação das parcelas de corrente e onda na torre e corrente estimada na base da torre.

Considerando o pulso DR2 injetado no canal e a contribuição da parcela refletida na torre, as amplitudes máximas das correntes são iguais, na base e no topo, a $-0,91pu$. A relação entre as correntes da primeira descarga de retorno, estimadas na base e no topo da torre MSS, é igual a 1. Isto significa que o valor de pico da corrente estimada na base é igual ao da corrente estimada no topo da torre.

Esta relação é válida para ondas lentas, que correspondem às primeiras descargas de retorno.

7.7 – Comentários

Dois Cenários foram considerados nas simulações. No Cenário 2, uma curva de corrente de descarga de retorno subsequente DS (curva rápida) foi injetada no topo da torre MCS. No cenário 3, a mesma curva DS e mais duas curvas lentas, (DR1 e DR2), que representam as primeiras descargas de retorno nas torres MCS e MSS, foram injetadas no topo do canal. Os resultados destas simulações são desmembrados para cada tipo de onda, rápida e lenta.

7.7.1 – Descargas Subseqüentes – Ondas Rápidas

Comparando as correntes estimadas na base e no topo, os dois casos

resultaram correntes na base maiores que as correntes no topo das torres.

No Cenário 2, a amplitude máxima da corrente estimada na base é cerca de 17% maior que a corrente estimada no topo da torre MCS. No Cenário 3, as amplitudes máximas das correntes estimadas nas bases das torres são cerca de 14,4% e 18,9% maiores que as correntes estimadas nos topos das torres MCS e MSS, respectivamente.

Com base nas simulações e nos dois Cenários, as curvas rápidas mostraram que se aplicadas a torres baixas, podem exibir comportamento transitório.

7.7.2 – Descargas de Retorno – Ondas Lentas

Comparando as correntes estimadas na base e no topo simuladas no Cenário 3, resulta não haver diferenças perceptíveis entre as correntes na base e no topo das torres MCS e MSS. Com base nestas simulações, as curvas lentas mostraram que, se aplicadas a torres baixas, como nas torres MCS e MSS, não é possível distinguir comportamento transitório nas estimações de correntes na base e no topo.

CAPÍTULO 8

MODELO MATEMÁTICO DE FONTES DE CORRENTES DISTRIBUÍDAS AO LONGO DO CANAL DE RELÂMPAGOS

8.1 – Objetivo

O objetivo deste capítulo é representar o canal de descarga do relâmpago, com base no conceito de fontes de correntes distribuídas ao longo do canal. Para conseguir este objetivo, as expressões matemáticas dos modelos de engenharia foram detalhadas no Capítulo 3. O canal e a torre são representados como uma linha de transmissão uniforme e sem perdas. A distribuição de corrente ao longo do canal para cada modelo é expressa em termos de corrente não contaminada, altura da torre e dos coeficientes de reflexão nas extremidades da torre.

No capítulo 6, uma rotina de cálculos foi descrita para a aplicação de dois algoritmos nos cálculos das correntes de descarga de retorno em torres. Na concepção original, os algoritmos representam o modelo Linha de Transmissão. Todavia, várias simplificações no mecanismo de descarga e no processo de reflexão de onda no canal e na torre tiveram que ser consideradas. Como aprimoramento, um trecho do canal de descarga, entre o ponto de junção e a torre foi considerado, para aproximar os resultados da realidade.

Diferentemente do modelo desenvolvido, o modelo de fontes distribuídas não requer a aplicação de divisor de corrente para considerar a corrente que flui pela torre, cuidado necessário nas simulações no Cenário 2. Ao contrário, o modelo possui um termo representado pelo coeficiente de transmissão no ponto de junção entre o canal e o topo da torre, válido apenas quando se trata de ondas de corrente se propagando no sentido descendente, como no Cenário 3. Como vantagem, o modelo permite o cálculo da corrente de descarga de relâmpagos ascendentes em qualquer ponto do canal ou torre, apenas com a modificação de poucos parâmetros.

A finalidade da aplicação deste modelo está na consideração das curvas de correntes das primeiras descargas de retorno e das descargas de retorno subseqüentes medidas na estação do Morro do Cachimbo, em simulações que permitam estimar as curvas de correntes na base e no topo da torre, e eventualmente, na base do canal ao nível do solo, simulando o canal sem a torre.

8.2 – Distribuição de Corrente ao Longo do Canal do Relâmpago

A distribuição espacial-temporal de corrente ao longo do canal do relâmpago, pode ser generalizada pela Equação (3.1) :

$$i(z', t) = u(t - z'/v_f) P(z') i(0, t - z'/v)$$

onde z' é a altura sobre o solo, $u(t - z'/v_f)$ é a função degrau e $P(z')$ uma função que considera a atenuação da corrente com a altura. Os valores para estas variáveis constam da Tabela (3.2) (vide Capítulo 3). Os modelos definem, originalmente, uma fonte de corrente fixa localizada no nível do solo e conectada à base do canal, definição válida para os modelos de engenharia MTL, MTLL, MTLE chamados de modelos com fonte fixa e para os modelos MBG, TCS e MDU, modelos com fonte móvel. Nestes últimos, a fonte é posicionada no ponto de junção dos líderes.

A expressão geral para as fontes distribuídas no canal foi proposta por Rachidi et al. (2002):

$$di_s(z', t) = \left[-\frac{\partial i(z', t)}{\partial z'} + \frac{1}{c} \frac{\partial i(z', t)}{\partial t} \right] dz' \quad (8.1)$$

onde c é a velocidade da luz, i_s a parcela diferencial de corrente fornecida pela fonte ideal de corrente no canal e, z' , a posição da fonte no canal.

8.3 – Processo de Descarga do Canal e a Corrente de Descarga de Retorno

Para descrever o processo de estabelecimento da corrente de descarga no canal, dois modelos podem ser considerados: modelo MTLE e o modelo MDU.

A primeira abordagem é feita pelo modelo MTLE. No modelo MTLE descrito por Rachidi e Nucci (1990), considera-se que a corrente corona é o resultado da contribuição radial no canal, direcionada ao interior deste e depois movimentando as cargas inicialmente armazenadas no envelope corona em torno do canal, no sentido descendente do líder. Este processo foi detalhado supondo as fontes de correntes distribuídas ao longo do canal cuja amplitude decresce exponencialmente com a altura do canal.

Cada fonte de corrente, posicionada em uma certa altura no canal, participa do processo de descarga injetando corrente no canal, no momento em que a frente de onda do pulso da descarga de retorno atinge a altitude considerada.

Adicionalmente, considera-se que as cargas corona fluem pelo canal, na direção do solo com a velocidade da luz, ao contrário da frente do pulso de corrente que flui com velocidade $v_f < c$.

A segunda abordagem é feita pelo modelo MDU. No modelo MDU, descrito por Diendorfer e Uman (1990), o pulso de corrente ascendente movimenta-se com velocidade de frente de onda constante, igual a $130 \text{ m}/\mu\text{s}$ e a carga armazenada no envelope corona, em qualquer altura “z”, é descarregada com uma constante de tempo τ_D , em direção ao solo (Equação 3.19).

Este processo visa neutralizar a descontinuidade no canal, uma vez que, a descarga é regulada pela constante de tempo τ_D , que impede que haja uma avalanche de cargas no centro do canal e conseqüentemente, invertendo a tendência de variação instantânea da corrente no canal, como é previsto nos modelos TCS e MBG (Diendorfer e Uman, 1990).

Rachidi e Nucci (1990) mostraram que o modelo MTLE pode ser definido em termos de fontes de corrente distribuídas ao longo do canal, estas fontes representando o efeito das cargas inicialmente armazenadas no envelope corona que envolve o canal do líder. Mais tarde, Cooray (2002) (citado por Rachidi et al. 2002) mostrou que não apenas o modelo MTLE, mas todos os demais modelos de engenharia, podem ser formulados com base em fontes de corrente distribuídas ao longo do canal.

8.4 - Fontes de Correntes Distribuídas ao Longo do Canal - Teoria

A interação de relâmpagos com estruturas tem atraído considerável atenção de muitos pesquisadores (exemplos, Beierl (1992), Montandon e Beyeler (1994), Janischewskyj et al. (1996), Guerrieri et al. (1998), Fuchs (1998), Shostack et al. (1996), Rakov, (2001), Schroeder (2001), Guedes et al. (2001) e Rachidi et al. (2002)). Por esta razão, os modelos inicialmente desenvolvidos considerando as descargas de retorno iniciadas no nível do solo, foram revistos com o objetivo de incluir a torre no momento da descarga atmosférica (exemplos, Diendorfer e Uman, 1990; Rachidi et al., 1992; Zundl; 1994; Guerrieri et al., 1994, 1996, 1998 e 2000; Montoyama et al., 1996; Rachidi et al., 1998, 2001; Janischewskyj et al., 1998, 1999).

Em alguns destes modelos é assumido que, o pulso de corrente $i_0(t)$, associado ao processo da descarga de retorno, é injetado no ponto de junção, localizado entre a estrutura e o canal do relâmpago, representando um relâmpago descendente.

A onda de corrente ascendente propaga-se ao longo do canal com a velocidade da descarga de retorno v_f , como especificado pelos modelos de corrente. Já a onda refletida, propaga-se pelo corpo da estrutura com a velocidade da luz. A torre e o canal são comparados a uma linha de transmissão uniforme e sem

perdas, caracterizada pelos coeficientes de reflexão constantes e diferentes de zero tanto no topo, quanto na base da estrutura.

Nesta seção, os modelos MBG, MTL, TCS, MTLL, MTLE e MDU, são generalizados para incluir a torre no conjunto canal – torre - aterramento, sendo por isto, a partir de então, assumido que, ao injetar corrente no canal, duas parcelas de corrente fluem pelo canal, uma no sentido descendente e outra no sentido ascendente, partindo ambas do topo da estrutura.

Para a análise, os modelos são divididos em dois grupos, que serão tratados de forma semelhante, mas que, por uma questão inerente às suas concepções, serão abordados por diferentes estratégias:

- a) o modelo TCS, assume por construção, que uma fonte de corrente se movimenta ao longo do canal, com direção ascendente, enquanto os modelos MBG e MDU, podem ser vistos como casos especiais deste, permitindo uma análise única nos três modelos.
- b) os modelos que foram classificados como modelos de fonte fixa de corrente, MTL, MTLL e MTLE, que consideram a corrente ascendente no canal do relâmpago, podem ser baseados em fontes de correntes distribuídas, representando a descarga de retorno no canal, permitindo uma formulação mais geral e mais direta do que a representação tradicionalmente usada que implica em uma concentração de fontes de corrente na base do canal.

A dedução matemática para inserir a estrutura da torre nos modelos de engenharia parte do princípio do deslocamento da fonte de corrente da base ($z = 0$), para uma altura z' sobre o solo, sendo $0 < z' < H$ onde H , é a altura da base da nuvem de tempestade.

Nesta consideração, o primeiro grupo de modelos leva vantagem porque estes modelos já assumem que a fonte de corrente está localizada no ponto de junção. Considerando a inclusão do tempo de retardo para compensar o deslocamento da onda desde o ponto de junção até o nível do solo, na forma $(t+z'/v)$, definiu-se a corrente de descarga de retorno no nível do solo ($z = 0$), onde “v” é a velocidade de deslocamento da onda pela estrutura (neste grupo de modelos, $v = c$, exceto no MBG onde $v = \infty$).

Por convenção, nestes modelos, a onda se desloca no sentido descendente, com a velocidade de deslocamento positiva no sentido contrário ao crescimento do eixo $0 < z < H$.

No segundo grupo de modelos (fonte fixa de corrente), a descarga de retorno é iniciada no nível do solo e se move na direção ascendente. A distribuição espacial – temporal da corrente ao longo do canal é definida pelas Equações (3.6) e (3.7). O tempo de retardo nestes casos é $(t-z'/v)$, onde z' é altura sobre o solo e “v” a velocidade de deslocamento ascendente do pulso de corrente. Aplicando a mesma convenção, o pulso se desloca no sentido ascendente, com a velocidade de deslocamento positiva, no sentido de crescimento do eixo $0 < z < H$.

Para fazer convergirem os modelos TCS e MTL (e suas modificações) a um mesmo referencial, as convenções de deslocamento da fonte de corrente (TCS) e do pulso de corrente (MTL) deveriam ser unificadas. Rachidi et al. (2002), consideraram esta necessidade para aplicar o conceito de distribuição de fonte de corrente ao longo do canal percorrido por uma corrente ascendente.

Contornando esta situação, uma expressão geral para a distribuição de corrente ao longo do canal relaciona a altura da frente de onda da descarga de retorno, produzida por uma onda de corrente ascendente, com a altura do canal e a

velocidade de deslocamento do pulso da corrente vista por um observador localizado a uma altura z do canal, pela relação:

$$H = H(z,t) = (t+z/c)/(1/v+1/c)$$

Se a fonte se movimentasse no sentido descendente, com uma velocidade muito alta, próxima do infinito, como no caso do modelo MBG, a expressão H seria reduzida a $H = vt$.

Uma visão do comportamento das parcelas de onda, e de corrente, ao longo do canal e torre, com as suas expressões analíticas e parcelas incidentes, refletidas e transmitidas são mostradas no diagrama esquemático da Figura 8.1.

As seguintes parcelas de corrente e de onda podem ser distinguidas:

Pulso de corrente no canal (i_v): $i_0 \left(h, t - \frac{(z-h)}{v^*} \right)$

Onda refletida no topo da torre para o canal (i_c): $i_0 \left(h, t - \frac{(z-h)}{c} \right)$

Onda transmitida ao corpo da torre (i_T): $i_0 \left(h, t - \frac{z}{c} - \frac{(2m-1)h}{c} \right)$

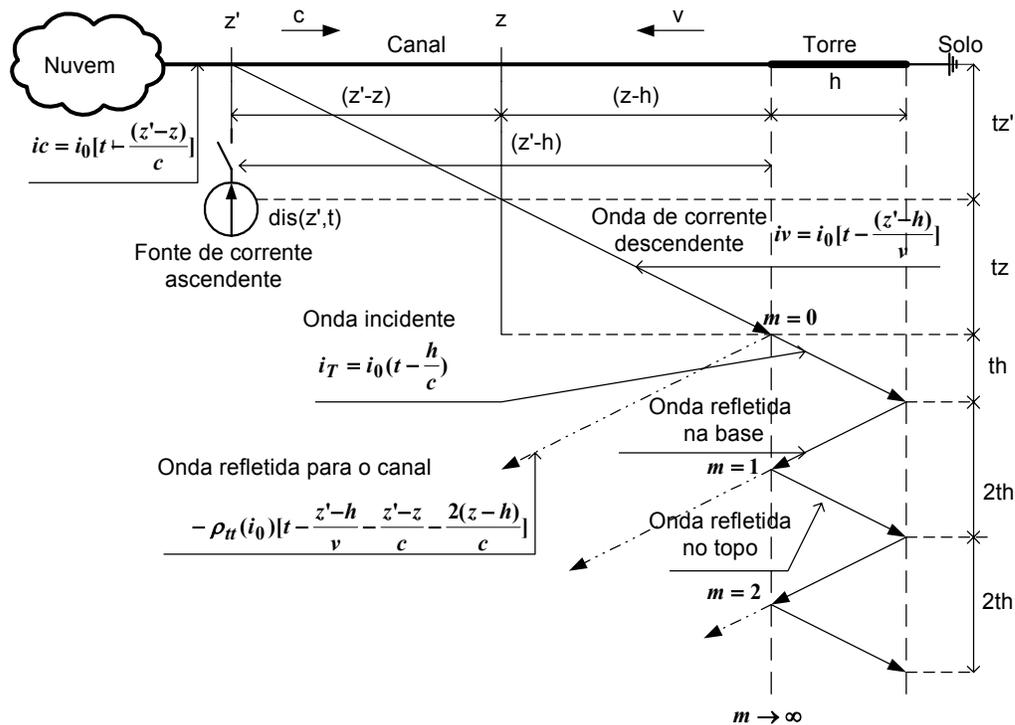


FIGURA 8.1 – Diagrama esquemático da representação do canal do relâmpago no modelo de engenharia de descarga de retorno de um relâmpago negativo ascendente, com a inclusão da torre e as reflexões de onda no topo e na base.

Onde:

z' é altura da fonte de corrente;

z a altura de posicionamento do observador;

h é altura da torre;

tz' é o tempo de tráfego da corrente da fonte até o topo da torre;

tz é o tempo de deslocamento do pulso e da onda vistos pelo observador;

th é tempo de tráfego da onda incidente na torre desde o topo até a base;

dis é parcela infinitesimal de corrente emitida pela fonte “s”;

iv é o pulso de corrente que se desloca com velocidade v_f ;

ic é a onda refletida no canal com a velocidade da luz c ;

ρ_{tt} é o coeficiente de reflexão no topo da torre.

m é o número de reflexões consideradas.

Rachidi et al. (2002) demonstraram que é possível aperfeiçoar o algoritmo desenvolvido por Guerrieri et al. (1998) (e por extensão o desenvolvido por Guedes et al. 2002), para corrente fluindo do solo para a nuvem e da onda transmitida no topo da torre para o interior do canal, bem como da onda de corrente refletida para o corpo da torre.

Este modelo, considerado mais completo que o desenvolvido no capítulo 6, tem a vantagem de não ser necessária a consideração do plano de interface para delimitar o ponto acima do plano onde a corrente na base do canal é estimada e nem o ponto abaixo do plano no topo da torre.

Assumindo o processo transitório das reflexões de onda no canal e na torre, mostrado no diagrama, um observador posicionado no canal, acima do topo da torre, $h < z < H$, vê a corrente **$i(z,t)$** , como resultante da soma de todas as contribuições de onda, pela seguinte expressão:

$$i(z,t) = [P(z-h)i_0\left(h, t - \frac{z-h}{v^*}\right) - \rho_{tt}i_0\left(h, t - \frac{z-h}{c}\right) + (1-\rho_{tt})(1+\rho_{tt}) \sum_{m=1}^{\infty} \rho_{tb}^m \rho_{tt}^{(m-1)} i_0\left(h, t - \frac{z}{c} - \frac{(2m-1)h}{c}\right)] u\left(t - \frac{z}{v}\right) \quad (8.2)$$

E para a distribuição de corrente, ao longo da torre, $0 < z < h$, o observador vê a corrente $i(z, t)$, como resultante da soma de todas as parcelas na torre, pela seguinte expressão:

$$i(z, t) = (1 - \rho_{tt}) \sum_{m=0}^{\infty} [\rho_{tb}^m \rho_{tt}^m i_0(h, t - \frac{h-z}{c} - \frac{2mh}{c}) + \rho_{tb}^{(m+1)} \rho_{tt}^m i_0(h, t - \frac{h+z}{c} - \frac{2mh}{c})] \quad (8.3)$$

Nas Expressões (8.2) e (8.3), tem-se:

ρ_{tt} é o coeficiente de reflexão no topo da torre;

ρ_{tb} é coeficiente de reflexão na base da torre;

m é o número de reflexões considerado;

z é altura no canal que o observador se posiciona;

h é a altura da torre;

v^* é a velocidade de deslocamento do pulso de corrente;

c é velocidade da luz.

Na Equação (8.3), a expressão $(1 - \rho_{tt})$ é o coeficiente de transmissão de onda no ponto de conexão entre o canal e o topo da torre.

Ou seja, $1 + \rho_{tt} = 1 - \frac{Z_{ch} - Z_T}{Z_T + Z_{ch}} = \frac{2Z_{ch}}{Z_T + Z_{ch}}$ é o coeficiente de transmissão para onda de corrente movimentando-se no sentido ascendente.

A Expressão (8.3) é aplicada no cálculo de correntes de descarga de retorno ascendente (corrente fluindo do solo para a nuvem).

Um caso especial da Expressão (8.3) para estimar a corrente na base da torre, no tempo $t = h/c$ que corresponde à chegada da onda na base ($m = 0$), ao nível do solo, ($z = 0$), considerando coeficiente de reflexão na base igual a 1 ($\rho_{tb} = 1$),

($Z_{gr} = 0$), e reduzindo a altura da estrutura a um valor desprezível ($h = 0$), fazendo o coeficiente de reflexão no topo da torre nulo ($\rho_{tt} = 0$), que corresponde à eliminação da torre e substituindo-a por um trecho do canal de igual comprimento com $Z_T = Z_{ch}$, condição já considerada, como casamento de impedâncias, a Expressão (8.3) resulta em:

$i(0,t) = 2i_0(h, t-h/c)$ e para $h = 0$, $i(0,t) = 2i_0(0,t)$ (Rachidi et al., 2002).

Onde $\rho_{tb} = \frac{Z_{ch} - Z_{gr}}{Z_{ch} + Z_{gr}}$ diferente de $\rho_{tb} = \frac{Z_T - Z_{gr}}{Z_T + Z_{gr}}$, significando que a torre foi “removida” do conjunto, pela consideração de $\rho_{tb} = 1$ e $h = 0$.

Para $h = 0$, $i_0(0,t) = 2i_0(t)$ é consistente com os resultados demonstrados por Beierl (1992), Rakov (2001) e por Rachidi et al. (2002) com as modificações introduzidas.

A Expressão (8.3) pode ser representada pelo circuito elétrico NORTON equivalente, similar Figura 6.2 (vide Capítulo 6).

Rakov (2001) usou o conceito da corrente de curto circuito I_{cc} , com a fonte de corrente substituída por uma fonte ideal de corrente com impedância interna igual a $Z_{ch} = \infty$ e $Z_{gr} = 0$ (condição de curto circuito) na análise dos transitórios na torre.

Apesar da diferença no tratamento da fonte de corrente, como esperado, a corrente de curto circuito $I_{cc} = 2I_0$, sendo I_0 a corrente sem distúrbios.

Esta particular situação indica que:

$$Z_{ch} = Z_T \text{ (casamento de impedâncias),}$$

que representa a condição para obter a corrente não contaminada no canal.

As Expressões (8.2) e (8.3) do modelo Rachidi et al. (2002) aplicam-se a todos os modelos de engenharia que são descritos pela Equação (3.1), embora o modelo MBG considere a velocidade “c” substituída por um valor infinito. A distribuição de corrente ao longo da torre, não depende da função de corrente de descarga de retorno.

Segundo a Equação (3.1), a distribuição de corrente depende do fator $P(z)$ no canal, que assume valores específicos definidos na Tabela (3.2).

Por outro lado, a função degrau $u(t-z/v)$ na Equação (3.1) é responsável pela eliminação da descontinuidade de impedâncias no topo da torre, no cálculo da corrente em qualquer local ao longo do canal.

As considerações acima não eliminam, no entanto, a necessidade de computar o acoplamento eletromagnético considerado por Schroeder (2001).

Da mesma forma que as Equações (8.2) e (8.3), as simplificações consideradas por Shostack et al. (1999) permitem estimar a corrente na torre modelada por uma linha de transmissão uniforme e sem perdas, com boa aproximação à corrente medida.

Rachidi et al. (2002) desenvolveu os algoritmos cujos resultados fornecem a distribuição de corrente ao longo do canal em termos da corrente sem distúrbios, da altura da torre e dos coeficientes de reflexão.

Portanto, pelo anteriormente exposto, os modelos MBG, MTL, TCS, MTL e MTLE são eficientes para contornarem a descontinuidade no topo da torre, com exceção do modelo TCS.

8.5 – Comentários.

O modelo de Rachidi et al. (2002) se apresenta como uma alternativa aos cálculos efetuados, permitindo que sejam simuladas as correntes referentes às primeiras descargas de retorno e às descargas de retorno subsequentes em

qualquer posição nas torres. Pela facilidade de manuseio do algoritmo, as parcelas de corrente podem ser identificadas a partir da curva de corrente modelada. A curva de corrente pode ser simulada na base e no topo da torre e na base do canal de descarga sem a torre, num exercício que pode ser executado apenas com variações de alguns parâmetros, tais como altura da torre e coeficientes de reflexão nas extremidades desta.

CAPÍTULO 9

APLICAÇÃO DO MODELO FONTES DISTRIBUÍDAS NO CÁLCULO DE CORRENTES EM TORRES

9.1 – Objetivo

O objetivo deste capítulo é a aplicação do modelo de fontes de correntes distribuídas no cálculo das correntes na base e no topo da torre do Morro do Cachimbo. Os relâmpagos negativos descendentes em MCS apresentaram nas primeiras descargas de retorno, correntes de pico média de 42500 A e nas descargas de retorno subseqüentes, correntes de pico média de aproximadamente 18000 A.

As curvas médias obtidas na base da torre MCS são analiticamente reproduzidas para simular as correntes que seriam medidas no topo da torre e os resultados são avaliados para confirmar se estas curvas estão sujeitas aos efeitos transitórios eletromagnéticos produzidos pela torre.

As curvas médias das primeiras descargas e das descargas de retorno subseqüentes de MCS foram obtidas a partir do ajuste das curvas de corrente da amostra no tempo inicial ($t = 0$) a partir de 1 kA na subida da frente de onda. O objetivo deste ajuste foi eliminar as correntes de longa duração que muitas vezes acontecem antes da formação da frente de onda que caracteriza as descargas de retorno dos relâmpagos negativos descendentes (Guedes, 2002). Estas curvas são consideradas ondas lentas por possuírem tempo de subida da frente de onda maior que o tempo de tráfego das ondas na torre MCS de 60 m de altura. Por esta característica, não se espera, nas simulações em questão, a manifestação perceptível no visual, dos efeitos transitórios da torre.

As curvas analíticas da Aplicação 1 (vide Capítulo 4) são aplicadas na torre MCS, para avaliar como elas se comportam nas simulações em torres baixas. Em outra verificação, as mesmas curvas são aplicadas na torre Peissenberg de 168 m de altura, para avaliar como elas se comportam nas simulações em torres elevadas.

Em todas as simulações que envolvem as curvas analíticas e as curvas da Aplicação 1 nas duas torres, será feita uma análise de desempenho do canal sem a torre, aplicando o artifício matemático de reduzir a altura da torre a zero, substituindo o trecho correspondente à torre, pelo canal. Neste caso o coeficiente de reflexão no topo da torre será considerado nulo. O coeficiente de reflexão na base será alternado entre a unidade ($\rho_{tb} = 1$) e seu representativo valor já adotado na torre MCS ($\rho_{tb} = 0,5$).

O capítulo começa com uma síntese dos resultados obtidos até então, comparando correntes estimadas nas torres MCS e MSS, numa relação direta entre correntes máximas na base e no topo, nos dois principais cenários constituídos e na simulação na torre Peissenberg, quando a altura desta variou até o nível do solo mais 5 metros, com coeficientes de reflexão estimados especificamente para a curva medida e com a curva da corrente não contaminada analiticamente reproduzida.

9.2 – Análise dos Valores Obtidos nas Simulações de Correntes nas Torres MCS e MSS

Na Tabela 9.1 são resumidas as relações entre as correntes estimadas na base e no topo das torres MCS e MSS, nas simulações nos Cenários 2 e 3 aplicando as curvas DS, DR1 e DR2.

TABELA 9.1 – Correntes Calculadas nas Torres MCS e MSS.

Descrição	DS		DR		Onda Transmitida à Torre (I_T)	
	MCS	MSS	MCS	MSS	DS	DR
Cenário 2 $\frac{I_{base}}{I_{topo}}$	1,17					
Base da torre (kA)	-16,9				-12	
Topo da torre (kA)	-14,5					
Cenário 3 $\frac{I_{base}}{I_{topo}}$	1,144	1,189	1,00	1,00	-0,75	-0,75
Base da torre (pu)	-1,03	-1,07	-0,90	-0,91		
Topo da torre (pu)	-0,90	-0,90	-0,90	-0,91		

Da Tabela 9.1 são extraídas as seguintes relações, estabelecidas das comparações entre os resultados encontrados nos Cenários 2 e 3:

Descargas de retorno subseqüentes

- No Cenário 2, simulado somente na torre MCS e com o pulso de corrente em valores absolutos, a relação entre as correntes máximas na base e no topo resultou em 1,17 significando que, a corrente na base é 17% maior.
- No Cenário 3, o mesmo pulso foi representado em valor normalizado à unidade para as duas estações MCS e MSS. As relações entre valores medidos na base e no topo indicaram na torre MCS 1,144 e na torre MSS 1,189 significando que a corrente na base é 14,4% e 18,9% maior que a corrente no topo nas torres MCS e MSS, respectivamente.
- Comparando a corrente medida na base com a corrente medida no topo das torres, ambas para a mesma onda rápida injetada no topo, a corrente estimada na base é maior que a corrente estimada no topo cerca de 14,4% a 18,9% nas torres MCS e MSS.
- Como as torres da estação MSS possuem altura de 70 m, estas apresentam uma pequena elevação no valor medido na base (-1,07 pu) se comparado com aquele medido na base da torre de 60 m da estação MCS (-1,03 pu). Este resultado já era esperado porque para o pulso idealizado, os efeitos transitórios afetam os valores medidos na base das torres, sendo mais intensos nas torres mais elevadas.

Descargas de retorno DR

- Os resultados obtidos nas simulações de correntes das primeiras descargas de retorno nas duas estações confirmam que, para ondas lentas e torres baixas, a influência dos transitórios não é suficiente para alterar os valores estimados na base e no topo, cuja relação nos dois casos, é igual a 1.
- Este resultado indica que, no contexto desta tese, as correntes medidas nas estações do Morro do Cachimbo e do Monte San Salvatore, que compõem estatísticas de mais de 15 anos em MCS e mais de 28 anos em

MSS não precisam ser revistos, mesmo sendo adquiridos a partir de posições dos sensores diferentes nas torres.

9.3 - Correntes Medidas na Estação do Morro do Cachimbo

9.3.1 - Modelagem das Curvas Médias DR e DS em MCS

A representação analítica das curvas de corrente das primeiras descargas de retorno e das descargas subseqüentes da torre MCS é feita a partir dos parâmetros retirados das próprias curvas médias da Tabela (9.2).

TABELA 9.2 – Parâmetros Característicos de Corrente Obtidos das Curvas Médias de Descarga de Retorno e Subseqüente da Estação do Morro do Cachimbo

. DESCRIÇÃO	UNIDADE	DESCARGA DE RETORNO	DESCARGA SUBSEQÜENTE
I_{0max}	KA	- 42,5	- 17,3
$(di_0/dt)_{Max}$	kA/ μ s	4,7	6,4
T_{01}	μ s	17	4
T_{02}	μ s	91	44

T_{01} = Tempo de frente de onda; T_{02} = Tempo de decaimento a 50% do valor de pico; I_{0max} = Corrente de pico; $(di_0/dt)_{max}$ = máxima taxa de crescimento da corrente.

As curvas médias são sobrepostas às curvas analíticas. Na Figura 9.1, as curvas das primeiras descargas de retorno média e analítica e na a Figura 9.2, a curva das descargas subseqüentes médias e analíticas na estação MCS.

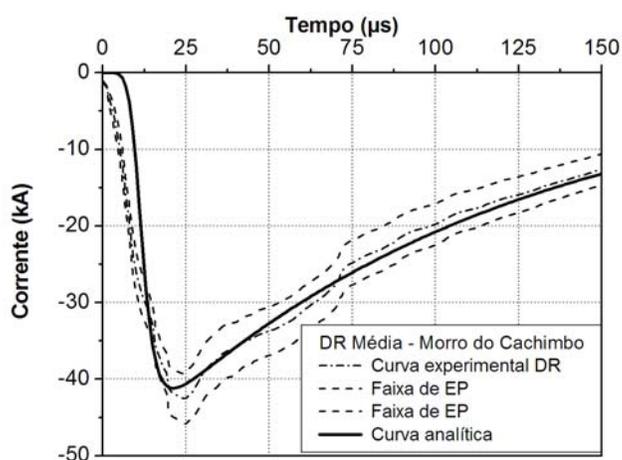


FIGURA 9.1 – Curva analítica da corrente média de descarga de retorno da estação do Morro do Cachimbo sobreposta à curva média experimental.

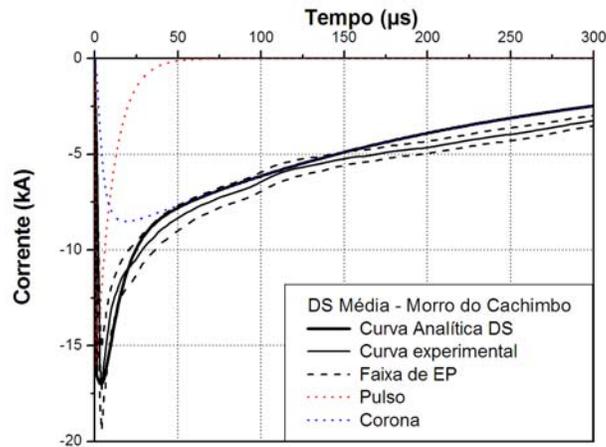


FIGURA 9.2 – Curva analítica da corrente média de descarga subsequente da estação do Morro do Cachimbo sobreposta à curva média experimental.

Na Tabela 9.3, são mostrados os parâmetros das curvas de correntes médias que são aplicáveis à modelagem analítica das descargas de retorno e subsequentes da estação MCS (Figuras 9.1 e 9.2), aplicados na Equação (4.8).

TABELA 9.3 – Parâmetros Aplicados na Equação (4.8) que Originaram as Correntes de Descarga de Retorno e Subsequente Estação do Morro do Cachimbo.

PARÂMETROS	UNIDADE	DESCARGA DE RETORNO	DESCARGA SUBSEQÜENTE
$I_{o,max}$	kA	- 42,5	-17,3
η	-	0,4704	0,894
τ_1	μs	25,9	1,5
τ_2	μs	91,3	100

9.3.2 – Simulação das Descargas Subsequentes em MCS

As descargas de retorno subsequentes são simuladas na torre MCS usando o modelo desenvolvido por Rachidi et al. (2002). A simulação da corrente no canal sem a torre é feita considerando o coeficiente de reflexão no solo igual a 1 e 0,5 e canal com a torre, com coeficiente de reflexão na base da torre

igual a 0,5. Neste caso as correntes são estimadas no topo e na base da torre apenas com solo real.

Os coeficientes de reflexão nas extremidades da torre são os mesmos já aplicados na torre MCS, ou seja, na base $\rho_{tb} = 0,5$ e no topo $\rho_{tt} = -0,5$.

Em síntese, quando a torre não estiver incluída no conjunto, são simulados dois coeficientes de reflexão no solo:

- a) considerando $Z_{gr} = 0$ e $\rho_{cb} = 1$;
- b) considerando $Z_{gr} > 0$ e $\rho_{cb} = 0,5$;

As curvas de corrente simuladas na base do canal, considera uma estrutura de altura desprezível ($h = 0$), coeficiente de reflexão no topo da torre será modificado para $\rho_{tt} = 0$, ou seja, há um casamento de impedância entre canal e torre, significando que a torre foi removida do conjunto canal-aterramento.

9.3.2.1 – Resultados da Simulação da DS em MCS

A Figura 9.3 mostra as curvas das descargas subseqüentes da estação MCS modeladas analiticamente e as correntes simuladas na base e no topo da torre MCS e na base do canal.

A simulação para a descarga subseqüente na torre MCS resultou a seguinte relação entre correntes estimadas na base e no topo da torre:

$$\frac{I_{base}}{I_{topo}} = \frac{-17}{-17} = 1$$

Na base do canal sem a torre, resultaram -19 kA para o solo com coeficiente de reflexão 1 e -14 kA para o solo coeficiente de reflexão 0,5.

É interessante notar que, se for considerado o coeficiente de reflexão como $\rho_{tb} = 0,5$ na base da torre MCS, a corrente na torre (topo ou base) é igual a -17 kA e a corrente na base do canal igual a -14 kA e o compromisso entre elas é 1,2142 significando que, a corrente na torre (no topo ou base) é cerca de 21,4% maior que a corrente estimada na base do canal do relâmpago diretamente acoplado ao solo.

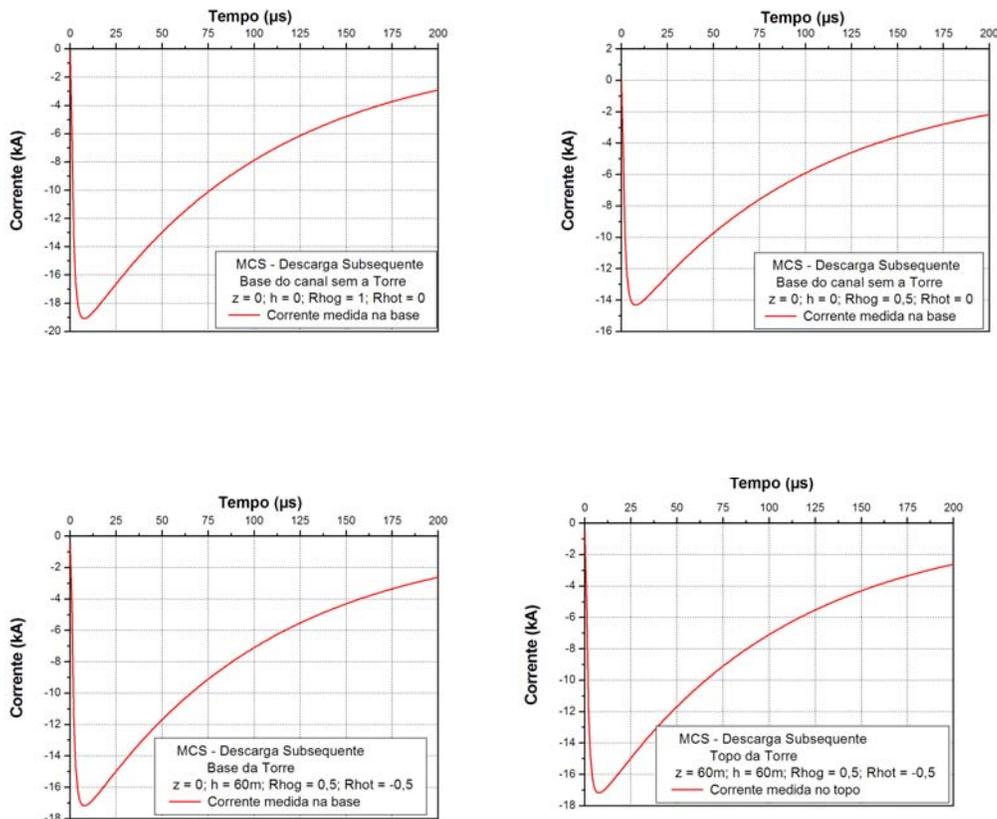


FIGURA 9.3 - Descargas Subsequentes – MCS - correntes simuladas na base e no topo da torre e na base do canal. ($Rhog = \rho_{cb}$ e $Rhot = \rho_{tt}$).

Os resultados da simulação em solo com coeficiente de reflexão 0,5 não confirmam os resultados de Melander (1984). Já, comparando a corrente que seria medida no topo da torre com aquela que seria medida na base do canal com coeficiente de reflexão 1, a diferença se aproxima da faixa de 10% encontrada por Melander.

No primeiro caso, a presença da torre pode aumentar substancialmente o valor inicial do pico da corrente, já no segundo caso, a comparação fica prejudicada porque os coeficientes de reflexão na base foram alterados.

O segundo caso foi simulado para testar a eficiência do modelo quando se faz o coeficiente de reflexão do solo igual a 1, simulando um solo com aterramento com eficiência total na reflexão da corrente.

Como o solo na região do Morro do Cachimbo possui alta resistividade, esta situação pode não acontecer na prática. Neste cenário não é possível afirmar

que os valores de pico da descarga atmosférica possam ionizar o solo, tornando-o condutor no momento da descarga, pelo menos na região da torre MCS.

9.3.3 – Simulação das Descargas de Retorno em MCS

Repetindo as mesmas condições da simulação das descargas subsequentes, as descargas de retorno são simuladas na torre MCS usando o modelo desenvolvido por Rachidi et al. (2002). A simulação da corrente no canal sem a torre, e com coeficiente de reflexão no solo igual a 1 e 0,5 e canal com a torre, com coeficiente de reflexão na base da torre igual a 0,5. Neste caso as correntes são estimadas no topo e na base da torre apenas com solo real.

Os coeficientes de reflexão nas extremidades da torre são os mesmos já aplicados na torre MCS, ou seja, na base $\rho_{tb} = 0,5$ e no topo $\rho_{tt} = -0,5$.

Em síntese, quando a torre não estiver incluída no conjunto, são simulados dois coeficientes de reflexão no solo:

- c) considerando $Z_{gr} = 0$ e $\rho_{cb} = 1$;
- d) considerando $Z_{gr} > 0$ e $\rho_{cb} = 0,5$;

As curvas de corrente simuladas na base do canal, considera uma estrutura de altura desprezível ($h = 0$), coeficiente de reflexão no topo da torre será modificado para $\rho_{tt} = 0$, ou seja, há um casamento de impedância entre canal e torre, significando que a torre foi removida do conjunto canal-aterramento.

9.3.3.1 – Resultados da Simulação da DR em MCS

A Figura 9.4 mostra as curvas das descargas de retorno da estação MCS modeladas analiticamente e as correntes simuladas na base e no topo da torre MCS e na base do canal.

A simulação para a descarga de retorno na torre MCS resultou, a seguinte relação entre correntes estimadas na base e no topo da torre:

$$\frac{I_{base}}{I_{topo}} = \frac{-42,5}{-42,5} = 1$$

Na base do canal sem a torre, resultaram -47 kA para o solo ideal e -35 kA para $\rho_{tb} = 0,5$.

É interessante notar que se for considerado o coeficiente de reflexão na base da torre MCS igual a $\rho_{tb} = 0,5$, a relação entre a corrente na torre (topo ou base) igual a $-42,5$ kA e a corrente na base do canal igual a -35 kA é de 1,343 significando que a corrente na torre (no topo ou base) é cerca de 34,3% maior que a corrente estimada na base do canal do relâmpago diretamente acoplado ao solo.

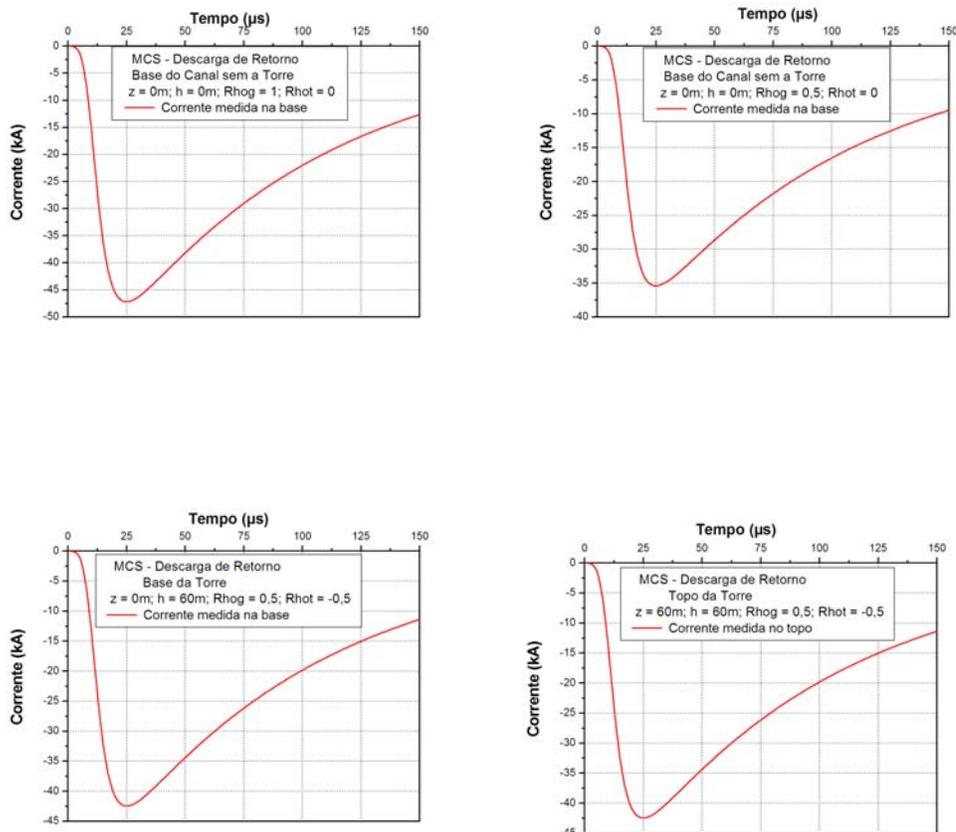


FIGURA 9.4 - Descargas de Retorno – MCS - correntes estimadas na base e no topo da torre e na base do canal. ($\rho_{th} = \rho_{tb}$ e $\rho_{tt} = \rho_{tt}$)

As descargas de retorno possuem características diferentes das descargas subseqüentes. A taxa de crescimento da frente de onda é mais lenta, o tempo de pico máximo e o tempo de decaimento a 50% do valor de pico são maiores.

Por outro lado, as descargas de retorno subseqüentes não tem ponto de junção, porque o canal se encontra pré ionizado. É de se esperar que, por

serem mais rápidas, as curvas representativas das descargas subseqüentes sejam influenciáveis pelos transitórios da torre.

Nas simulações efetuadas, as correntes estimadas na base e no topo da torre MCS, para primeira descarga e descarga de retorno subseqüentes, não apresentaram variações de amplitudes máximas, indicando que nestas curvas analíticas, o transitório da torre não influencia os valores estimados.

As simulações no canal sem a torre mostraram que quando o solo tem coeficiente de reflexão 1, a amplitude máxima da corrente medida na base do canal é ligeiramente superior às amplitudes estimadas na torre, 10,5% e 11,8%, respectivamente para as descargas de retorno e subseqüentes.

9.4 – Resultados da Simulação com a Curva da Aplicação 1

A simulação com as curvas da **Aplicação 1** tem a finalidade de comparar as respostas em torres de diferentes alturas e com os mesmos coeficientes de reflexão nas extremidades.

Os coeficientes de reflexão nas extremidades da torre MCS são iguais a, $\rho_{tb} = 0,5$ na base e $\rho_{tt} = -0,5$ no topo.

Optou-se por manter os coeficientes de reflexão nas extremidades da torre Peissenberg iguais aos de MCS, sendo na base $\rho_{tb} = 0,5$ e no topo $\rho_{tt} = -0,5$.

Quando a torre não estiver incluída no conjunto, são simulados dois coeficientes de reflexão no solo:

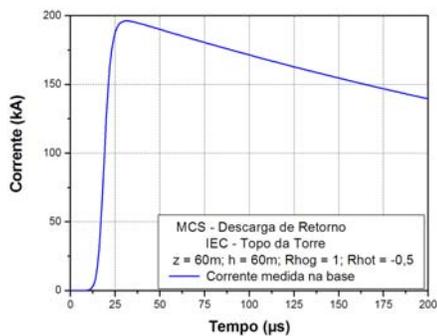
- e) considerando $Z_{gr} = 0$ e $\rho_{cb} = 1$;
- f) considerando $Z_{gr} > 0$ e $\rho_{cb} = 0,5$;

Na Figura 9.5 são mostrados os resultados da simulação na torre de MCS e na Figura 9.6 na torre Peissenberg.

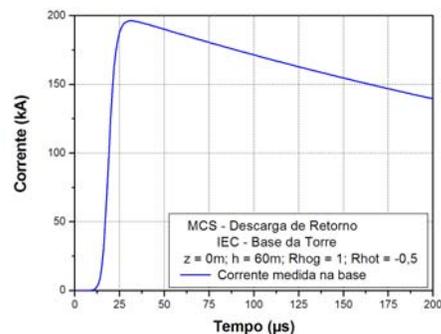
A curva da Aplicação 1 foi simulada assumindo a impedância do canal (Z_{ch}) como um número real e o solo com coeficiente de reflexão 1, desconsiderando tanto o relâmpago como uma fonte de corrente ideal quanto a presença de qualquer descarga conectante ascendente a partir da estrutura da torre.

Nesta simulação, tanto ρ_{tt} “ quanto ρ_{tb} “ são considerados constantes, ou seja, todos os processos não lineares resultantes da dependência de Z_{ch} ou de Z_{gr} da corrente, também são ignorados. Se o processo se inicia no tempo $t = 0$, a primeira reflexão de corrente acontecerá no tempo $t = \tau$, onde τ é o tempo de tráfego da onda na torre do topo à base.

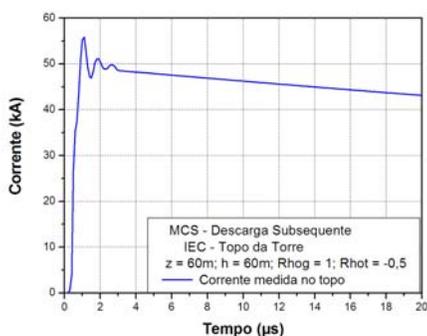
Assumindo que $Z_{gr} = 0$, e as demais condições acima descritas, as correntes no topo e na base da torre aproximam-se assintoticamente da corrente sem distúrbios, também verificado por Fuchs (1998) e Heidler et al. (2001) na identificação da corrente não contaminada, medida no topo da torre de Peissenberg. Esta tendência é verificada nas Figuras 8.2 e 8.3.



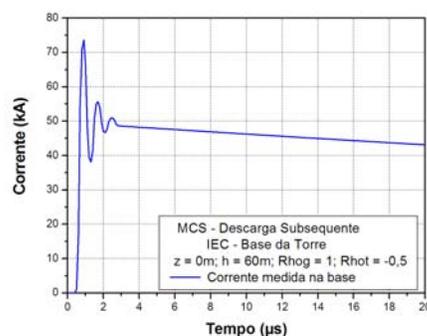
(a)



(b)

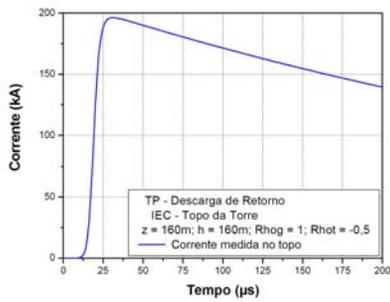


(c)

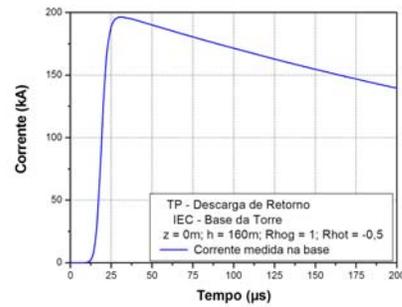


(d)

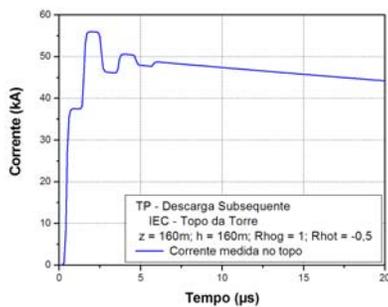
FIGURA 9.5 - Descargas de Retorno e Subseqüentes – MCS - correntes simuladas na base e no topo da torre. ($R_{hog} = \rho_{tb}$ e $R_{hot} = \rho_{tt}$)



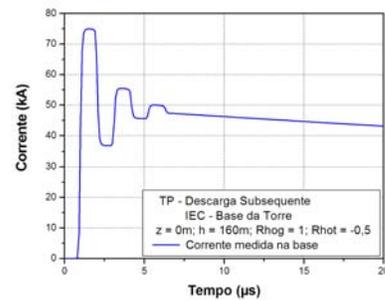
(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURA 9.6 - Descargas de Retorno e Subseqüentes – Torre Peissenberg - correntes simuladas na base e no topo da torre. ($R_{hog} = \rho_{tb}$ e $R_{hot} = \rho_{tt}$)

As correntes no topo e na base das torres MCS e Peissenberg mostram que, as estimativas de corrente para um mesmo evento, mas em torres diferentes, mantidos os mesmos coeficientes de reflexão, apresentam correntes de pico semelhantes nas duas torres (veja Tabela 9.6) com diferentes intervalos de tempo de tráfego (veja Figuras 9.5 e 9.6).

A inexistência da torre e o canal do relâmpago conectado diretamente ao solo, como simulado na estação MCS (Figuras 9.3 e 9.4), produz curvas de correntes que lembram a corrente sem distúrbios estimada no canal, no qual as impedâncias são eletricamente casadas (Z_{ch} e Z_T), desde que seja considerado solo ideal.

A Figura 9.7 mostra as formas de onda para a descarga de retorno e para a descarga subsequente utilizadas na **Aplicação 1** estimadas na base do canal. As curvas das Figuras 9.7 repetem as curvas das Figuras 4.7, DR e 4.8 DS (vide Capítulo 4), respectivamente.

O resultado desta simulação mostra portanto, que quando o solo é considerado ideal, e se a altura da torre for desprezível em comparação com o comprimento do canal, o modelo empregado recai em uma configuração que lembra o circuito equivalente de NORTON para $t < \tau$, em que a onda descendente vê apenas a impedância característica do canal.

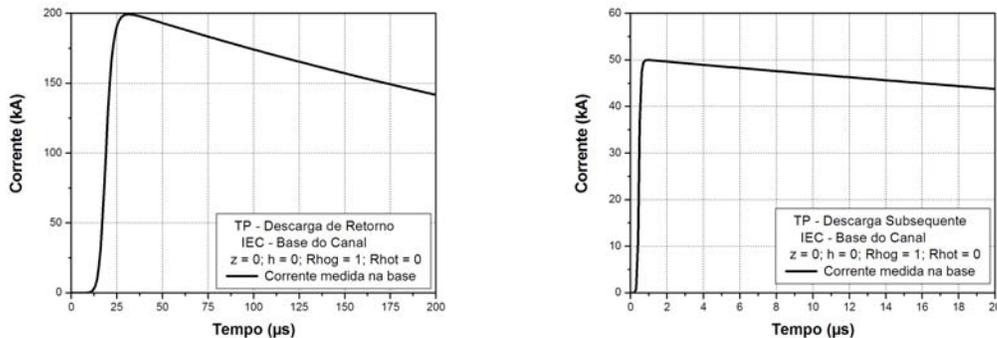


FIGURA 9.7 - Descargas de Retorno e Subseqüentes – correntes estimadas na base do canal. ($R_{hog} = \rho_{cb}$ e $R_{hot} = \rho_{tt}$)

As correntes de pico das descargas subsequentes estimadas no topo são iguais nas duas torres, MCS e Peissenberg (Figuras 9.5 e 9.6). Na base, a corrente de pico estimada na torre MCS é menor que a corrente de pico estimada na torre Peissenberg (72kA contra 75 kA). Já as curvas das descargas de retorno parecem ter a mesma forma e mesma amplitude, seja no topo ou na base, para as torres Peissenberg ou MCS.

No caso das ondas lentas, como são as curvas DR, torna-se impossível distinguir qualquer processo transitório da torre.

Os resultados das simulações podem ser sintetizados:

- a) curvas médias da estação MCS
- b) curvas analíticas nas estações MCS e Peissenberg,

e confirmam que o tempo da frente de onda conjugado com a altura da torre determinam o surgimento do efeito transitório na torre. De fato, ao ser atingida por um raio, a torre fica sujeita a transitórios eletromagnéticos, que são tão mais significativos quanto mais rápido for o tempo de frente da onda de corrente incidente.

Enquanto o tempo que a onda leva para trafegar do topo à base e voltar ao topo da torre MCS é de cerca de 400ns (duas vezes o tempo de tráfego), na torre Peissenberg este tempo é 1120ns, quase três vezes maior. A mesma onda de DS aplicada nas duas torres, produziu transitórios mais nítidos na torre Peissenberg, embora não tenha havido alteração nas amplitudes estimadas em ambas as torres.

Os resultados, com base nos tempos de frente de onda considerados nesta tese, podem indicar que tanto para as correntes médias de descarga de retorno, quanto para as descargas subseqüentes na estação MCS (Figuras 9.1 e 9.2), a forma de onda de corrente é dominada por freqüências de ondas com comprimento muito grande em relação ao comprimento da torre, nas quais a torre não exhibe comportamento transitório comportando essencialmente como blocos de elementos de circuitos suficientemente pequenos para não apresentarem em sua totalidade, nenhuma ação transitória. Realmente, quando o menor comprimento de onda na corrente de uma descarga de relâmpago é muito maior que o comprimento da torre, os transitórios da torre não alteram os valores estimados na base ou no topo.

9.5 – Resumo

A Tabela 9.4 resume os resultados obtidos nas simulações com curvas médias em MCS e curvas analíticas nas torres MCS e Peissenberg (MPS).

TABELA 9.4 – Resultados nas Torres MCS E MPS – Sumário.

ALTURA (m)		COM TORRE (kA)		SEM TORRE (kA)			
				COEF. REF. 0,5		COEF. REFLEXÃO 1	
Curvas Modeladas							
Z	H	DS	DR	DS	DR	DS	DR
0	0			-19	-47	-14,5	-35
0	60	-17	-42,5				
60	60	-17	-42,5				
$\frac{I_{base}}{I_{topo}}$ (MCS)		1	1				
Curvas Teóricas – Aplicação 1							
0	0			50	200		
0	60	72	200				
60	60	55	200				
$\frac{I_{base}}{I_{topo}}$ (MCS)		1,309	1				
0	168	75	200				
168	168	55	200				
$\frac{I_{base}}{I_{topo}}$ (TP)		1,363	1				

CAPÍTULO 10

CONCLUSÕES, COMENTÁRIOS E RECOMENDAÇÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS

10.1 – Introdução

Buscou-se nesta Tese, aplicar modelos de engenharia com o propósito de calcular as correntes das descargas de retorno de relâmpagos negativos no topo da torre do Morro do Cachimbo, a partir de alguns parâmetros das correntes médias obtidas na base da torre. A comparação entre os diversos resultados encontrados nas simulações objetivou estabelecer o grau de influência que o posicionamento dos sensores de correntes no topo e na base da torre exerceria sobre os dados obtidos em 13 anos de operação da estação do Morro do Cachimbo.

No Brasil, medições em torres são feitas até então, apenas na base e as médias (e medianas) da amplitude máxima das correntes são valores muito mais elevados que os valores correspondentes às medidas realizadas em estações de pesquisa localizadas em outras partes do mundo. Além disto, todos os tipos de relâmpagos medidos na torre do Morro do Cachimbo apresentam características, tais como, corrente de pico, tempo de pico, tempo de decaimento e derivada máxima da corrente, muito diferentes dos valores similares obtidos em outras torres objeto destas comparações.

As características estruturais específicas de cada torre não foram suficientes para justificar tais diferenças. Mas os métodos de medições, tipos de sensores e posição destes na torre (topo, base ou intermediária), vêm sendo considerados responsáveis pelas possíveis discrepâncias entre as médias obtidas. Berger (1967) fez medições no topo das torres no Monte San Salvatore (Suíça). Na torre do Morro do Cachimbo é possível fazer medições de corrente na base e, nas torres de Montreal (CN) no Canadá, e de Peissenberg (MPS) na Alemanha, é permitido o registro simultâneo de um evento na base e no topo da torre.

As atuais limitações de recursos logísticos da estação do Morro do Cachimbo é que motivaram a realização desta pesquisa, cujas conclusões operacionais

são de importância significativa para a compreensão do fenômeno dos relâmpagos em torres baixas, na medida que esclarecem o comportamento transitório, neste tipo de estruturas quando atingidas por descargas atmosféricas.

10.2 – Desempenho dos Algoritmos Empregados nos Cálculos

Os modelos de engenharia reproduzem a corrente de descarga de retorno no canal através de uma função capaz de representar a forma de onda da corrente que pode ser diretamente ou indiretamente medida. No canal do relâmpago a corrente de descarga varia no espaço e no tempo. Esta característica do canal transforma-o menos em um condutor convencional e mais em um condutor especial, que pode ser chamado de condutor-gerador representado na modelagem como uma fonte de corrente.

A variação de corrente no canal pode ser atribuída à parcela de carga que é adicionada ao fluxo de cargas, a cada seção do canal. Esta constatação identifica uma típica presença de elementos não lineares ao longo do canal descritos pela consideração de fontes de correntes distribuídas ao longo do canal. Os algoritmos consideraram além dos coeficientes de reflexão nas extremidades da torre, a altura da torre, a posição do observador, a velocidade de deslocamento do pulso e a velocidade de propagação da onda, todos parâmetros variáveis no espaço e/ ou tempo.

Os dois grupos de algoritmos empregados mostraram resultados harmônicos, embora cada uma das expressões seja resultado de abordagens matemáticas diferenciadas para modelar fisicamente a corrente de descarga de retorno no canal.

A aplicação do primeiro grupo de algoritmos - Guerrieri et al. (1998) e Guedes et al.(2002) - exigiu a concepção de três diferentes cenários para caracterizar a forma de injeção do pulso de corrente na torre ou canal, com o objetivo de calcular a corrente que seria medida no topo ou na base da torre. Uma forma de analisar a importância da técnica desenvolvida para este grupo de algoritmos pode ser construída com base em um raciocínio cartesiano. Neste, uma visão horizontal permeia os três cenários de forma equivalente no que

se refere à aplicação das equações. Já numa visão vertical, cada um dos cenários se configura com uma característica intrínseca, muito própria, considerando a distribuição de corrente no canal e torre. Esta técnica resgatou a aplicabilidade das expressões que até então, por não serem aplicadas criteriosamente, não produziam os resultados esperados.

O segundo grupo de algoritmos, modelo de fontes distribuídas no canal, dispensa a aplicação dos cenários concebidos no primeiro grupo, substituindo os cenários por uma visão geral do meio “canal – torre – aterramento” a partir da observação da corrente de descarga de retorno no canal ou torre independentemente da posição de injeção de corrente.

Nos dois grupos os resultados são igualmente satisfatórios. No APÊNDICE A são mostrados os resultados da comparação entre os algoritmos Guerrieri et al. e Guedes et al. (primeiro grupo) com o algoritmo de Rachidi et al. (segundo grupo), para um mesmo pulso de corrente injetado numa torre de 500 m de altura.

10.3 – Principais Resultados Obtidos

Antes que os resultados sejam explicitados, é necessário enfatizar que a aplicação de ferramentas de cálculos e técnicas desenvolvidas na busca de resultados satisfatórios constitui um dos primeiros resultados desta Tese. Pode-se, inclusive, afirmar que foi construída uma técnica de cálculo de correntes de descargas atmosféricas em torres com base em expressões matemáticas de fácil manipulação, que podem ser desenvolvidas a partir de qualquer plataforma de cálculo computacional.

10.3.1 – Modelagem de Corrente

Com a aplicação da função de corrente de Heidler e em caráter original nesta Tese, as correntes médias na torre MCS foram reproduzidas analiticamente. Este procedimento tornou possível a aplicação dos algoritmos nos cálculos das correntes em torres, com resultados que permitem responder às questões colocadas no início desta Tese.

10.3.2 – Estrutura da Torre e Posição de Montagem dos Sensores

A posição dos sensores de corrente na torre do Morro do Cachimbo, e por extensão em torres com alturas semelhantes, não interfere nos resultados de medições se feitas na base ou no topo, desde que as correntes das primeiras descargas de retorno de relâmpagos descendentes sejam tais que possam ser comparadas a ondas lentas. No caso de correntes de descargas subsequentes, ondas rápidas, cálculos de correntes na torre MCS mostraram-se mais susceptíveis aos efeitos transitórios da torre.

10.3.3 – Descargas de Retorno Subsequentes e Primeiras Descargas de Retorno

As correntes das descargas subsequentes apresentaram dois diferentes comportamentos nos dois casos simulados.

- No primeiro caso em análise, que constitui a aplicação dos Cenários 2 e 3, um pulso de corrente com taxa de variação da corrente da ordem de $100 \text{ kA}/\mu\text{s}$ foi injetado diretamente no topo da torre de MCS (Cenário 2) e no topo do canal de 300 m de comprimento nas duas estações (Cenário 3). Constatou-se em seguida, que as correntes estimadas na base são aproximadamente 17% (Cenário 2) e 14% e 19% (Cenário 3) maiores que as correntes medidas no topo das torres MCS e MSS.
- No segundo caso, a corrente média de descarga subsequente da estação Morro do Cachimbo com máxima taxa de variação da corrente da ordem de $6,4 \text{ kA}/\mu\text{s}$ foi simulada no topo e na base da torre MCS. Neste caso, não foi identificada diferença entre as correntes medidas na base e no topo na estação do Morro do Cachimbo. A princípio tal comportamento se justifica na comparação do tempo de subida da frente de onda da curva média da ordem de $1,5 \mu\text{s}$ com o tempo de ida e voltas da onda na torre de 400 ns. Por sua característica mais lenta ($6,4 \text{ kA}/\mu\text{s}$ contra $100 \text{ kA}/\mu\text{s}$ para a taxa de variação da derivada máxima da curva teórica), a curva experimental mostrou não ser

influenciada pelo comportamento transitório da torre, repetindo os mesmos valores nas medições na base e no topo.

- ❖ As correntes das primeiras descargas de retorno apresentaram comportamentos semelhantes nos três casos simulados, que são: duas curvas de descarga de retorno idealizadas com corrente máxima / taxa de variação de correntes da ordem de 35 kA/ 5 kA/ μ s (DR1) e 25 kA/ 7 kA/ μ s (DR2) e a curva média das primeiras descargas de retorno de relâmpagos negativos descendentes da estação do Morro do Cachimbo.
 - No primeiro caso em análise, o pulso DR1 foi injetado no topo do canal de 300 m de comprimento na torre da estação Morro do Cachimbo. Constatou-se em seguida, valores estimados idênticos nas correntes na base e no topo da torre com 60 m de altura.
 - No segundo caso em análise, o pulso DR2 foi injetado no topo do canal de 300 m de comprimento na torre da estação do Monte San Salvatore. Constatou-se em seguida, valores estimados idênticos nas correntes na base e no topo da torre com 70 m de altura.
 - No terceiro caso, a corrente média das primeiras descargas de retorno da estação do Morro do Cachimbo foi simulada no topo e na base da torre, não sendo identificada diferença entre as correntes estimadas na base e no topo. A princípio tal comportamento se justifica pelo tempo de subida da curva experimental da ordem de 20 μ s, considerada onda lenta.

10.3.4 – Simulações na Base do Canal sem a Torre e no Topo e Base da Torre no Canal.

- ❖ Com a remoção da torre MCS do conjunto canal-torre-solo, a corrente estimada no nível do solo com coeficiente de reflexão no solo igual a 1 é 19kA (DS) e 47 kA (DR), e com coeficiente de reflexão no solo igual a 0,5, é 14,5 kA (DS) e 34,5 kA (DR). Nestas condições, portanto, a corrente na base do canal, é cerca de 31% e 34,3% maior para DS e DR, respectivamente.

- ❖ Comparação entre as correntes estimadas na torre (base e topo) 17 kA (DS) e 42,5 kA (DR) e a corrente estimada na base do canal (sem torre) 14,5 kA (DS) e 35 kA (DR), com coeficiente de reflexão no solo igual a 0,5, indicam que a corrente estimada na torre é maior que a corrente estimada no nível do solo, removida a torre. Este fato mostra que a presença da torre produz um certo aumento na amplitude da corrente, se considerado o aterramento com coeficiente de reflexão igual a 0,5.
- ❖ No entanto na torre, a corrente medida no topo é igual à corrente medida na base, considerando coeficiente de reflexão 0,5 na base e igual -0,5 no topo da torre, tanto para DS quanto para DR.
- ❖ Simulações adicionais foram feitas (Apêndice B) para vários pares de coeficientes de reflexão no topo da torre (considerando várias relações entre as impedâncias do canal e da torre) e na base da torre (considerando vários tipos de solo). Os resultados mostraram concordância com os pares de coeficientes escolhidos, cujos cálculos estão detalhados (0,5 na base e -0,5 no topo).

10.3.5 – Quanto à Forma e Frequência de Onda de Corrente como Indicadores de Efeitos Transitórios

- ❖ Os resultados das simulações de correntes de descarga de retorno e subsequente na estação do Morro do Cachimbo mostraram que se a forma de onda é dominada por frequências de ondas com comprimentos de onda muito maiores que a altura da torre, a torre não exhibe comportamento transitório, ou seja, ela se comporta essencialmente como blocos de circuitos pequenos o suficiente para que não apresente em sua totalidade, nenhuma ação transitória. Em outras palavras, para que a torre do Morro do Cachimbo com altura de 60 m apresente efeitos transitórios, a frequência fundamental da corrente de descarga deve ser da ordem de 500 kHz, correspondendo a um período de 2 μ s.

10.4 – Recomendações para próximos trabalhos

A estação do Morro do Cachimbo terá suas instalações aperfeiçoadas e remodeladas com a substituição de alguns componentes hoje em operação e

instalação de novos medidores e sensores. Provavelmente, novos sensores serão instalados para permitir medições simultâneas de corrente em função do tempo na base e no topo. Nesta fase, também poderão ser instalados dispositivos que permitam que sejam feitas medições da taxa de variação temporal de corrente tanto na base quanto no topo. Com todos estes novos recursos, os dados registrados na estação poderão ser tratados de uma maneira mais detalhada e novos resultados poderão surgir. Assim, recomenda-se que em futuros trabalhos as medições obtidas no topo e na base sejam objeto de estudos com base nos resultados aqui registrados. Que sejam aplicados os mesmos modelos desenvolvidos neste trabalho para confirmar e validar os resultados assim como para ampliar sua aplicabilidade em outros tipos de relâmpagos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anderson, R.B.; Eriksson .A.J. Lightning Parameters for Engineering Applications. **Electra**, n. 69, p. 65-102, Mar. 1980.

Beasley, W.H.; Uman, Jordan, M.A. D.M., Ganesh, C. Positive Cloud-to-Cloud Lightning Return Strokes. **Journal of Geophysics**, v. 88, n. C13, p. 8475-8482, Oct. 1983.

Berger K. Novel Observations on Lightning Discharges: Results of Research on Monte San Salvatore. **Journal of the Franklin Institute**, v. 283, p. 478-525, 1967.

Berger, K. Anderson, R.B. Kroninger, H. Parameters of Lightning Flashes. **Electra**, n. 41, p. 23-37, July, 1975.

Berger, K. The Earth flash. In: R. Golde ed. **Lightning: physics of lightning** New York: Academic Press, v. 1, Chapter 5, p. 119-190. 1975.

Braginskii, S. I. "Theory of development of a spark channel. **Sov. Phys. JETP**, v 34, p 1068 – 1074, 1958.

Bruce, C.E.R. ; Golde, R.H. The Lightning Discharge. **Journal of IEE (G.B.)**, v. 88, Part II, n. 6, p. 487-505, Dec. 1941.

Borovsky, J. E. An electrodynamic description of lightning return strokes and dart leaders: guided wave propagation along conducting cylindrical channels. **Journal of Geophysical Research**, v. 100, n. D2, p. 2697-2726, Feb. 1995.

Beierl, O., "Front shape parameters of negative subsequent strokes measured at the Peissenberg tower. In: ICLP International Conference on Lightning

Protection, 21. Sept. 21-25, 1992, Berlin Germany. **Proceedings**. Berlin: ICLP-Edit., 1992.

Baun, C. E.; Baker L. Return stroke transmission line model
Electromagnetics, v 7, p. 205-228, 1987.

CEMIG, Centrais Energéticas de Minas Gerais; Centro de Tecnologia e Normalização (Relatório Interno) – “Estação de Pesquisas de Descarga Atmosféricas – Projeto Cachimbo”, Belo Horizonte, Dezembro de 1985.

Cianos, N.; Pierce E. T. **A ground-lightning environment for engineering usage**. Menlo, Park CA: Stanford Research Institute, 1972. Tech. Report 1

Cooray, V. On the concepts used in return stroke models applied in engineering practice. **IEEE Trans. Electromagnet**, 2002. in press

Chang, H.C.; Inan, U.S. Lightning-induced electron precipitation from the magnetosphere. **Journal of Geophysical Research**, v. 90, n. A2, p. 1531-1541, Feb. 1985.

Diendorfer, G.; Uman, M. A. An improved return stroke model with specified channel-base current. **Journal of Geophysical Research**, v. 95, p. 13621-13644, 1990.

Eriksson, A. J. **The lightning ground flash: an engineering study**. Pretoria. 400 p. Doutorado (Engenharia) - South Africa: University of Natal, Dez. 1978.

Fuchs, F. On the transient behavior of the telecommunication tower at the mountain Hoher Peissenberg. In: International Conf. On Lightning Protection, 24. Birmingham, U. K., 1998 **Proceedings**. Birmingham: ICLP-Edit., v. 1, p 36-41, 1998.

Garbagnati, E.; Lo Piparo, G. B. Lightning parameters- results of years of systematic investigation Italy. In: International Conference on Lightning and Static Electricity, Oxford England, 1982. **Proceedings**. Oxford: Etz, 1982.

Garbagnati, E., Lo Piparo, G. B. Stazione sperimentale per il rilievo delle caratteristiche dei fulmini. **L'Elettrotecnica**, v. 57, n. 7, 1970.

Gardner, R. L., Baker, L.; Baun C. E.; Andersh, D. J. Comparison of lightning with public domain HEMP waveforms on the surface of an aircraft In: EMC Symposium, 6 Zurich, 1985. **Proceedings**. Zurich: EMC-SYMPOSIUM, p 175-180, 1985.

Glendenhuys, H.J.; Stringfellow, M.F.; Meal, D.V. Measured lightning discharge duty of distribution surge arresters. In: IEE Conference on Lightning and Power Systems, London, U.K., 1984. **Proceedings**. London: IEE Edit., Paper no. 4-II, 1984.

Guedes, D. G. **Análise de curvas de correntes de relâmpago em torres**". São José dos Campos, SP, 123p (INPE-8758-TDI/799). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001

Guedes, D. G.; O. Pinto Jr., Saba, M. M. F. Lightning strokes in towers – a comparative analysis of return stroke current in Mount San Salvatore (Switzerland) and *Morro do Cachimbo*. In: International Symposium on Lightning Protection, 6., Nov 19-23, 2001, Santos. **Proceedings**. São Paulo: TecArt Editora Ltda, 2001.

Guedes, D. G. Pinto Jr., O. Visacro, S F. A theoretical estimation of the lightning current on the bottom of a instrumented tower from the measured value on the top. In: International Conference on Grounding and Earthing,

Nov. 4-7, Rio de Janeiro, 2002. **Proceedings**. Belo Horizonte: Lastro Editora Ltda, Conf. Proced. Ground'2002.

Guerrieri, S. Heidler, F., Nucci, C. A ; Rachidi, F. ; Rubnstein, M. 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: International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Sept. 17-20, 1996. **Proceedings**. Rome: EMC Edit., 1996

Guerrieri, S.; Nucci, C. A.; Rachidi, F.; Rubinstein, M. On the influence of elevated strike objects on the lightning return stroke current and the distant electric field. In: International Rome EMC'94, Rome, 1994. **Proceedings**. Rome: EMC-SYMPOSIUM, 1994.

. Guerrieri, S.; Nucci, C. A.; Rachidi, F. ; Rubnstein, M. On the Influence of Elevated Strike Objects on Directly Measured and Indirectly Estimated Lightning Currents. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 13, n 4, Oct., 1998.

Guerrieri, S.; Krider, E. P. ; Nucci, C. A. Effects of traveling-waves of current on the initial response of a tall Franklin rod. International In: Conference on Lightning Protection, 25., Rhodes, Greece, 2000. **Proceedings**. Rhodes: EMC-SYMPOSIUM, 2000.

Hagenghuth, J. H. ; Anderson, G. Lightning to the Empire State Building – **AIEEE** (pt. 3); p. 641-649, 1952.

Heidler, F. Lightning electromagnetic impulse – THORIE UND MESSUNGEN VORGELEGTE DISSERTATION pp323- Edit. Universitat Der Bundeswesh, Munchen, gefordert 1985.

Heidler, F. Traveling current source model for LEMP calculation, In: International Zurich Symp. Eletromagnetic Compatibility, 6, Mar., Zurich, 1985. Switzerland. **Proceedings**. Zurich: EMC-SYMPOSIUM 1985 p 157-162.

Heidler, F.; T. Zundl, "Influence of tall towers on the return stroke current", Presented at the International Aerospace and Ground Conference on Lightning and Static Electricity, Williamsburg, Virginia Sept. 26-28, 1995.

Heidler, F.; Hopf, C. Measurement results of the electric fields in cloud-to-ground lightning in nearby Munich, Germany," – **IEEE Transactions on Electromagnetic Fields Compatibility**, v.40, n 4, Nov. 1998.

Heidler, F.; Cvetic, J. M., Stanic B. V. Calculation of lightning current parameters. **IEEE Transactions on Power Delivery**. v 4 n 2- 1999.

Heidler F.; Wiessinger, J.; Zischank, W. Statistics of lightning current parameters and related nearby magnetic fields measured at the Peissenberg tower. In: International conference on lightning protection (ICLP), 25., 18-22 September 2000, Rhodes – Greece. **Proceedings**. Rhodes: High Voltage Laboratory – University of Patras Edit., 2000.

Heidler, F.; Wiessinger, J.; Zischank, W. Lightning currents measured at a telecommunication tower from 1992 to 1998 In: International Zurich Symposium and Technical Exhibition on EMC, 14. Feb. 20-22, 2001, Zurich. **Proceedings**. Zurich: EMC-SYMPOSIUM, 2001.

Hill, R. D. Channel heating in return stroke lightning. **Journal of Geophysical Research**, v. 76, p. 637-645, 1971

Hubert, P. A new model of lightning subsequent stroke-Confrontation with triggered lightning observations. In: International Aerospace and Ground

Conference on Lightning and Static Electricity (ICOLSE), 10, 1985, Paris.
Proceedings. Les Ulis- France: Editions de Physique, 1985.

Idone, V.P., Orville, R.E. Lightning return stroke velocities in the thunderstorm research international program (TRIP). **Journal of Geophysical Research**, v. 87, n. C7, p. 4903-4916, June, 1982.

Idone, V.P.; Orville, R.E.; Hubert, P.; Barret, L. ; Eybert-Berard, A., Correlated observations of three triggered lightning flashes, **Journal of Geophysical Research**, v. 89, n. D1, p. 1385-1394, Feb.,1984.

IEC 61312-1, Protection against Lightning Electromagnetic Impulse. Part 1: General Principles, International Standard, 1995.

Janischewskyj, W.; Shostak, V.; Hussein A. M. ; Chisholm, W. Estimation of lightning localization system accuracy using CN tower lightning data. In: International Conference on Lightning Protection, 23., , Sept. 23-27, 1996, Florence, Italy . **Proceedings.** Florence: ICLP Edit., 1996, p 215-223.

Janischewskyj, W.; Shostak, V. ; Hussein, A. M. Comparison of lightning electromagnetic field characteristics of first and subsequent return strokes to a tall tower: 1 magnetic field. In: Int. Conf. on Lightning Protection, 24., 1998, Birmingham, U. K.. **Proceedings.** Birmingham: ICLP, Edit., 1998, p. 245-251.

Janischewskyj, W.; Shostak, V.; Hussein, A. M. Lightning electric field characteristics of first and subsequent return strokes to a tall tower. In: International Symp. on High Voltage Engineering, 11., London **Proceedings.** London: IEEE 1999, p. 270-274.

Jones, R. D. On the use of tailored return stroke current representation to simplify the analysis of lightning effect on systems. **IEEE Trans. on EMC**, p 95-96, 1997.

Kravtchenko, V. I. **Lightning protection of radio electronic devices (in Russian)**. Moscow: Radio and Communications Publication, 1991. 264p.

Krider, P., Weidman, E.D. The submicrosecond structure lightning radiation field. In: International Aerospace Ground conference on Lightning and Static Electricity, June, 1983, Worth, Texas. **Proceedings IAGLSE 1983 Worth**.

Kroninge, H. **Further analysis on Prof. Berger's San Salvatore lightning current data**. Pretoria South Africa, 1974 .S.I.R Special Report ELEK 53.

Lacerda, M. **Análise e modelagem de curvas de corrente de relâmpagos negativos descendentes entre 1985 e 1994, na estação de pesquisa do Morro do Cachimbo - MG**. jun. 1998. 214 p. (INPE-7238-TDI/691). Tese (Doutorado em Geofísica) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Jose dos Campos. 1998.

Lin, Y. T.; Uman, M. A. Tiller, J. A., Brantley, R. D., Beasley, W. H., Krider, E. P. e Weidman, C. D. Characterization of lightning return stroke electric and magnetic fields from simultaneous two-station measurements. **Journal of Geophysical Research**, v. 84, p. 6307-6314, 1979.

Leise, J.A.; Taylor, W.L. A Transmission Line Model with General Velocities for Lightning. **Journal of Geophysical Research**, v. 82, n. 3, p. 391-396, Jan. 1977.

Leteinturier, C., Weidman, C.; J. Current and electric field derivatives in lightning return strokes. **Journal of Geophysical Research** V.95, p.8181-828, 1990.

Little, P.F. Transmission Line Representation of a Lightning Return Stroke. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 11, p. 1893-1910, 1978.

Le Vine, D. M. ; Meneghini, R. Simulation of radiation from lightning return strokes- The effects of tortuosity. **Ratio Science** v. 13 p 801-809, 1978.

McEachron, K.B. Multiple Lightning Strokes – II. **Electrical Engineering**, p. 510-512, 1938.

McEachron, K.B. Lightning to the Empire State Building. **Journal of the Franklin Institute**, v. 227, p. 149-217, 1939.

McEachron, K.B. Wave Shapes of Successive Lightning Current peaks. **Electrical World**, p. 56, Febr. 1940.

McEachron, K.B. Lightning to the Empire State Building. **AIEE Transactions**, v. 60, p. 885-889, Sept. 1941.

Master, M.J.; Uman, M.A. , Lin, Y.T. ; Standler, R.B., Calculations of Lightning Return Stroke Electric and Magnetic Fields above Ground. **Journal of Geophysical Research**, v. 86, p. 12127-12132, 1981.

Mazur, V., Ruhnke, H.; Laroche, P. The relationship of leader and return strike processes in cloud-to-ground lightning. **Geophysic Letters**. v. 22, p. 2613-2616, 1995.

Mazur, V.; Ruhnke L.H. Model of electric charges in thunderstorms and associated lightning. **Journal of Geophysical Research**, v.103, n. D18, p.23299-23308, Set. 1998.

Mazur, V.; Ruhnke L.H. Computer Simulation of Downward Negative Stepped Leader **Journal of Geophysical Research**, v.105, n.D17, p.22361-22369, Set. 2000.

Melander, B. G. Effects of tower characteristics on lightning arc measurements. In: International Conference on Lightning and Static Electricity, 1984, Orlando, FL. **Proceedings**. Orlando: ICLSE Edit. 1984, p 34/1-34/12.

Montandon, E.; Beyeler, B. The lightning measuring equipment on the Swiss PTT Telecommunications Tower at St. Chrischona, Switzerland. In: International Conference on Lightning Protection, Budapest. **Proceedings**. Budapest, Hungary: Tech. Univ. of Budapest, 1994.

Montoyama, H. W.; Janischewsskyj, A.; Hussen, M.; Rusan, R.; Chisholm W. A.; Chang, J-S. Electromagnetic field radiation model for lightning strokes to tall structures. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v.11, p.1624-1632, 1996.

National Electrical Engineering Research Institute (NEERI). **CEMIG lightning research station system operation manual: Electric Power**. Pretoria, South Africa: NEERI 1985.

Nucci, C. ; AMazzetti, C.; Rachidi, F.; Ianoz, M. On lightning return stroke models for LEMP calculations. In: Conference. Lightning Protection, 19., Apr. 1988. Graz, Austria. **Proceedings**. Graz: ICLP Edit. 1988

Nucci, C. A. ; . Rachidi, F. Experimental validation of a modification to the Transmission Line Model for LEMP calculations. In: International Symposium and Technical Exhibition on Electromagnetic Compatibility, 8, Zentrum, Zurich. 1989. **Proceedings** Zentrum Zurich: T. Dvorak, p 389-394, ETH-1989.

Nucci, C. A.; Diendorfer, G., Uman, M.A., Rachidi, F., Ianoz, M.; Mazzetti, C. Lightning return stroke current models with specified channel-base current:

review and comparison. **Journal of Geophysical Research**, v. 95, n. D12, p. 20.395-20.408, Nov. 1990.

Pierce, E. T. Triggered lightning and some unsuspected lightning hazards. **Naval Res. Rev.** v. 25: p.14-28. 1972

Price, G.H. ; Pierce E.T. The Modeling of Channel Current in the Lightning Return Stroke. **Radio Science**, v. 12, p. 381-3388, 1977.

Pierce, E.T. ; Cianos, N. **A Ground-lightning environment for engineering usage.** *Stanford: Research Institute, 1972. Report*, Technical Report 1.

Price, G. H.; Pierce, E.T. The modeling of channel current in the lightning return stroke. **Radio Science**, v. 12, n. 3, p. 381-388, May, 1977.

Pinto Jr. O.; Guedes, D. G.; Saba, M. M. F.; Pinto, I. R. C. A ; . Lacerda, M. About the direction of motion, polarity and multiplicity of lightning flashes hitting towers: a comparative analysis of data gathered in Brazil and Switzerland. **Annales Geophysicae**, v.21, p.1-5, European Geosciences Union, 2003.

Rakov V. A; Dulzon, A. A. Calculated electromagnetic field of lightning return stroke. **Tekh. Eletrod.** n 1 p 87 – 89, 1987.

Rakov V. A. Lightning electromagnetic fields: Modeling and measurements. In. International Zurich Symposium Electromagnetic Compat.; 12, 1997, Zurich, Switzerland. **Proceedings.** Zurich, Switzerland: ISEC 1997. p 59-64.

Rakov, V. A.; Uman, M. A.; Rambo, K. J.; Fernandez, M. I.; Fisher, R. J.; Schnetzer, G. H.; Thottappilli, R. I; Ebert Berard, A.; Berlandez, J. P.; Lalande, P.; Bonamy, A.; Laroche, P. ; Bondiou, A. New insights into

lightning processes gained from triggered lightning experiments in Florida and Alabama. **J. Geophysical Research**, v. 103, n. 14, p 117-130, 1998.

Rakov, V.A. Comparison of Positive and Negative Lightning. In: International Lightning Detection Conference, Nov, 1998. Tucson. **Proceedings**. Tucson: University of Florida. 1998.

Rakov, V. A. Transient response of tall object to lightning. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 43 n. 4 Nov., 2001.

Rakov, V. A. **Lightning and tall structures** – Department of Electrical and Computer Engineering. University of Florida 2002. Comunicação pessoal.

Rakov, V. A. **A review of interaction of lightning with tall objects** 2003. Comunicação pessoal

Rachidi, F. ; Nucci, C. A. On the Master, Uman, Lin, Standler and the modified transmission line lightning return stroke current models. **Journal of Geophysical Research**, v. 95, n. D12, p20389-2-394, Nov, 20, 1990.

Rachidi, F.; Ianoz, M.; Nucci, C. A.; Mazzetti, C. Modified transmission line model for LEMP calculations: Effect of return stroke velocity decreasing and elevated strike object on close fields. In: International Conference on Atmospheric Electricity, 9., June, 1982, St. Petersburg. **Proceedings**. St. Petersburg: A. I. Voeikov Main Geophys. Obs., 1992.

Rachidi, F.; Janischewskyj, W.; Hussein, A. M.; Nucci, C. A.; Guerrieri, S. ; Chang, J. S. Electromagnetic fields radiated by lightning return strokes to high tower. In: International conference on Lightning Protection, 24 Birmingham. **Proceedings**. Birmingham, U.K: Staffordshire Univ., 1998.

Rachidi, F.; Janischewskyj, W.; Hussein, A. M.; Nucci, C. A.; Guerrieri, S.; Kordi, B. ; J. Chang, S. Current and electromagnetic field associated with

lightning return strokes to tall towers. **IEEE Trans. Electromag. Compat.** v. 43, p. 356-367, 2001.

Rachidi, F.; Rakov, V. A.; Nucci, C. A. ; Bermudez, J. Effect of vertically extended strike object on the distribution of current along the lightning channel. **Journal of Geophysical Research**, v.. 107, n D23, p4699-4704, Dec 2002.

Raicic, D. Beeinflussung einer darstellungweise der atmosfharischen entlandung auf den maximalen spannungswerten in den einzelnen punkten der einfacheren blitzschutzinstallationen. In: Internationale Blistzschutzkonferenz, 12. Bericht Portoroz, 1973.

Schonland, B.F.J. The Diameter of the Lightning Channel. **Philosophical Magazine**, v. 37, p. 503-508, 1937.

Schonland, B.F.J. Progressive Lightning IV - The Discharge Mechanism. **Proceedings of the Royal Society**, Series A, v. 164, p. 132-150, 1938.

Schroeder, M. A. O. **Modelo eletromagnético para descontaminação de ondas de correntes de descargas atmosféricas**. Tese de doutorado (Sistemas de Energia). Belo Horizonte, MG. UFMG 2001.

Schroeder, M. A.; Amilton, S.J e Visacro, S. F. The Brazilian experience on measurement of lightning parameters by means of instrumented towers. Nov. 4-7, Rio de Janeiro, 2002. **Proceedings**. Belo Horizonte: Lastro Editora Ltda, Conf. Proced. Ground'2002

Shostak, V.; Janischewskyj, W; Hussein, A. M.; Shang, J. S.; Kordi, B – Return stroke current modeling of lightning striking a tall tower accounting for reflections within the growing channel and for upward-connecting discharges.

International Conference on Atmosphere Electric, 11. June 1999 Hamilton, Ontario. **Proceeding**. Hamilton, Ontario: ICAE, 1999 p. 123-126.

Strawe, D. F. Non-linear modeling of lightning return stroke. In: Fed. Aviat. Administration/Florida Inst. Techno. Workshop Grounding Lightning Technology. Mar, 1979. Melbourne, FL. **Proceedings**. Melbourne: 1979. p 9-15. Rep. FAA-RD-79-6

Thottappillil, R.; Rakov, V. A.; Uman, M. A. Distribution of charge along the lightning channel: Relation to remote electric and magnetic fields and to return stroke models. **Journal of Geophysical Research**, v. 102, p. 6887-7006, 1997.

Thottappillil, R.; Uman, M. A. Lightning return stroke model with height-variable discharge time constant. **Journal of Geophysical Research**, v. 99, p. 22,773-22,780, 1994.

Triginelle, A. D. W.; Carvalho, A. M.; Diniz, J. H.; Cherchiglia, L. C. L., Principais parâmetros aplicáveis a estudos de engenharia, **Eletricidade Moderna**, p. 118-129, abr. 1995

Uman, M. A.; McLain, D. K. Magnetic field of the return stroke. **Journal of Geophysical Research**, v.. 74, p. 6899-6910, 1969.

Uman M.A. D.K. McLain. Lightning Return Stroke Current from Magnetic and Radiation Field Measurement. **Journal of Geophysical Research**, v.75, p. 5143-5147, 1970.

Uman M. A.; D. K. McLain ; E. P. Krider. The electromagnetic radiation from a finite antenna. **Amer. J. Phys.** n 43, p 33-38, 1975.

Uman M. A.; Master, M. J.; Krider, E. P. A comparison of lightning electromagnetic fields with the nuclear electromagnetic pulse in the frequency range 10^4 - 10^7 Hz. **IEEE Trans. Electromag. Compact. EMC-** v. 24, p. 410-416, 1982.

Uman M. A. **The lightning discharge**. Orlando: Academic Press, 1987. 377p. v. 39 (Internacional Geophysics Series).

Visacro F S. **Aterramentos elétricos – Conceitos Básicos**. Técnicas de Medição e Instrumentação, Filosofias de Aterramento. 2 ed. Belo Horizonte: Editora Alphagraphics, 1998.

Weidman, C. D. ; Krider, E.P. Submicrosecond Risetimes in Lightning Return-Stroke Fields. **Geophysical Research Letters**, v. 7, n. 11, p. 955-958, Nov.1980.

Willett, J.C.; Bailey, J.C. ; Idone V.P.; Eybert-Berard A. ; Barret, L. Submicrosecond intercomparison of radiation fields and currents in triggered lightning return strokes based on the transmission-line model. **Journal of Geophysical Research**, v. 94, n. D11, p. 13275-13286, Sept., 1989.

Zundl, T. First results of coordinated lightning current and LEMP measurements at the Peissenberg tower. In: International Conference Lightning Protection, 22., 1994, Budapest, Hungary. **Proceedings**. Budapest: ICLP Edit., 1994. paper R Ic -09.

APÊNDICE A

COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS DOS ALGORITMOS GUERRIERI ET AL. E GUEDES ET AL. COM RACHIDI ET AL

Os resultados dos modelos Guerrieri et al., Guedes et al. e Rachidi et al. são comparados a partir da função de corrente **APLICAÇÃO 1**. Exemplos de descargas de retorno e descargas subseqüentes calculadas para reproduzirem medidas no topo e na base de torres usando os modelos das Equações (3.12), (3.13) e (4.4) são mostrados nas figuras seguintes. O modelo Guerrieri et al. calcula a corrente no topo da torre pela Equação (3.12) e o modelo Guedes et al. calcula a corrente na base da torre pela Equação (3.13). Para que os modelos Guerrieri/Guedes possam produzir resultados consistentes, foi aplicada a técnica do divisor de corrente no topo da torre, considerando o conjunto canal-torre-solo como elementos de um circuito elétrico NORTON equivalente. O modelo Rachidi et al. da Equação (4.4) dispensa a aplicação do divisor de corrente.

1 – Calculo da onda de corrente medida no topo da torre de acordo com **APLICAÇÃO 1** e equação (3.12).

1.1 - Entrada de dados

<pre>t=0:.1:20; n=...; tau11=...; tau21=...; I01=; tau12=...; tau22=...; I02=.....; m=0; T=500/300; I=Ittopo(t,n,tau11,tau21,I01 ,tau12,tau22,I02,m,T); Imt=I M=5;</pre>	<pre>Rotb=.....; Rott=.....; Alfa=1+Rott; for m=1:M Imt = Imt+alfa*Rotb^m*Rott^(m-1)* Ittopo (t,n,tau11,tau21,I01,tau12,tau22,I02,m,T); End Figure(1); Plot(t,I,'b',t,Imt,'r'); Legend ('I –Corrente transmitida no topo', 'Imt – Corrente medida no topo M 5'); Title('Corrente medida no topo da torre z = 500 m'); Print -dbitmap -r150 DS; Clear all;</pre>
--	---

1.2 – Funções Auxiliares

1.2.1 – Corrente injetada no topo da torre

function I = Ittopo(t,n,tau11,tau21,I01,tau12,tau22,I02,m,T)

Calcula a forma de onda da corrente da descarga de retorno de um relâmpago em torre considerando a soma de duas formas de onda, sendo uma da corrente de breakdown (I01) e outra da corrente corona (I02). Essa operação é feita por etapas ou seja, calcula uma componente da corrente de cada vez. A forma de onda final (I) é apresentada em um gráfico $I=f(t)$. Nessa função a corrente foi injetada no topo e medida no topo da torre.

Entrada de dados como segue:

Intervalo de tempo: t

Fator de concavidade: n

Constante de tempo de subida da corrente de breakdown :tau11

Constante de tempo de decaimento da corrente de breakdown: tau21

Corrente de pico de breakdown: I01

Constante de tempo de subida da corrente corona:tau12

Constante de tempo de decaimento da corrente corona: tau22

Corrente corona de pico: I02

Quantidade de reflexões para definir a corrente injetada: m=0

Tempo de retardo htorre/c: T

Chama a função Ittopo acima;

grafique t, Ittopo

Z é o termo divisor de corrente: $ZT / Zch = (1 + Rhot) / (1 - Rhot)$

$eta1 = \exp(-((tau11/tau21) * (n * tau21/tau11)^(1/n)))$;

$Z = Zch / (Zch + ZT)$

$I1 = ((Z * I01 / eta1) * (((t - 2 * m * T) / tau11).^n ./ (1 + ((t - 2 * m * T) / tau11).^n)) * \exp(-(t - 2 * m * T) / tau21)) * \text{stepfun}(t, 2 * m * T)$;

$eta2 = \exp(-((tau12/tau22) * (n * tau22/tau12)^(1/n)))$;

$I2 = ((Z * I02 / eta2) * (((t - 2 * m * T) / tau12).^n ./ (1 + ((t - 2 * m * T) / tau12).^n)) * \exp(-(t - 2 * m * T) / tau22)) * \text{stepfun}(t, 2 * m * T)$;

$I = I1 + I2$;

2 - Cálculo da onda de corrente medida na base da torre de acordo com **APLICAÇÃO 1** e equação (3.13)

2.1 - Entrada de dados

T=0:1:20; n=....; tau11=....; tau21=....; I01= ; tau12=....;	tau22=.....; I02=.....; m=0; T=500/300; I=Ifonte(t,n,tau11,tau21,I01,tau12,tau22,I02,m,T);
---	--

ONDA REFLETIDA AO LONGO DO CORPO DA TORRE ENTRE O TOPO E A BASE DA TORRE

Imc=0; M=5; Rocb=....; Roct=.....; beta=1+Rocb; for m=0:M Imc=Imc+beta*Rocb^m*Roct^m*Ibas e(t,n,tau11,tau21,I01,tau12,tau22,I02, m,T); End	figure(1); plot(t,I,'b',t,Imc,'r'); legend('I - Corrente injetada no topo','Im - Corrente medida na base da torre'); grid; title('Corrente medida na base da torre z=0m'); xlabel('tempo (microseg)'); ylabel('Corrente (kA)'); print -dbitmap -r150 ImbDS clear all;
---	--

2.2 – Funções Auxiliares

2.2.1 – Corrente injetada no topo da torre – Ifonte

function I = Ifonte(t,n,tau11,tau21,I01,tau12,tau22,I02,m,T)

Calcula a forma de onda da corrente da descarga de retorno de um relâmpago em torre considerando a soma de duas formas de onda, sendo uma da corrente de breakdown com constante de tempo de subida muito pequena e corrente de pico maior mas com constante de tempo de decaimento menor produzindo um decaimento súbito. A outra, corrente corona, possui uma constante de tempo de subida menos abrupta e corrente

de pico menor mas com constante de tempo de decaimento maior sendo por isto mais suave.

Essa operação e feita por etapas ou seja, calcula uma componente da corrente de cada vez. A forma de onda de onda final e apresentada em um gráfico $I=f(t)$.

```
eta1=exp(-((tau11/tau21)*(n*tau21/tau11)^(1/n)));
I1=((I01/eta1) * (((t-m*T)/tau11).^n ./ (1 + ((t-m*T)/tau11).^n) .* exp(-(t-
m*T)/tau21))) .* stepfun(t,m*T);
eta2=exp(-((tau12/tau22)*(n*tau22/tau12)^(1/n)));
I2=((I02/eta2) * (((t-m*T)/tau12).^n ./ (1 + ((t-m*T)/tau12).^n) .* exp(-(t-
m*T)/tau22))) .* stepfun(t,m*T);
I=I1+I2;
```

2.2.2 – Corrente medida na base da torre – I_{base}

function I = Itbase(t,n,tau11,tau21,I01,tau12,tau22,I02,m,T)

Calcula a forma de onda da corrente da descarga de retorno de um relâmpago em torre considerando a soma de duas formas de onda, sendo uma da corrente de breakdown (I1) e outra da corrente corona (I2).

Essa operação e feita por etapas ou seja, calcula uma componente da corrente de cada vez. A forma da onda final e apresentada em um gráfico $I=f(t)$.

Nessa função a corrente foi injetada no topo e medida na base da torre.

Entrada de dados como segue:

Intervalo de tempo:t

Fator de concavidade: n

Constante de tempo de subida da corrente de breakdown :tau11

Constante de tempo de decaimento da corrente de breakdown: tau21

Corrente de pico de breakdown: I01

Constante de tempo de subida da corrente corona:tau12

Constante de tempo de decaimento da corrente corona: tau22

Corrente corona de pico: I02

Quantidade de reflexões para definir a corrente injetada: m=0

Tempo de retardo htorre/c: T

Chama a função Itbase acima;

grafique t, Itbase;

Z é o termo divisor de corrente: $ZT / Zch = (1 + Rhot) / (1 - Rhot)$

$\eta_1 = \exp(-((\tau_{11} / \tau_{21}) * (n * \tau_{21} / \tau_{11})^{1/n}))$;

$Z = Zch / (Zch + ZT)$

$I_1 = ((Z * I_{01} / \eta_1) * (((t - (2 * m + 1) * T) / \tau_{11})^n / (1 + ((t - (2 * m + 1) * T) / \tau_{11})^n)) * \exp(-(t - (2 * m + 1) * T) / \tau_{21})) * \text{stepfun}(t, (2 * m + 1) * T)$;

$\eta_2 = \exp(-((\tau_{12} / \tau_{22}) * (n * \tau_{22} / \tau_{12})^{1/n}))$;

$I_2 = ((I_{02} / \eta_2) * (((t - (2 * m + 1) * T) / \tau_{12})^n / (1 + ((t - (2 * m + 1) * T) / \tau_{12})^n)) * \exp(-(t - (2 * m + 1) * T) / \tau_{22})) * \text{stepfun}(t, (2 * m + 1) * T)$;

$I = I_1 + I_2$;

3 - Cálculo da onda de corrente medida na base da torre de acordo com **APLICAÇÃO 1** e equação (4.4)

3.1 - Entrada de dados

<pre> t=0:1:200; n=....; tau11=...; tau21=...; I0b=...; tau12=....; tau22=....; I0c=....; z = 500; h = 500; v = 130; c = 300; Rog=....; Rot=; Ima=0; M=5; for m=0:5 Ima=Ima+(Rog^m*Rot^m)*Irefbase(t,n ,tau11,tau21,I0b,tau12,tau22,I0c,z,h,v, c,m); End </pre>	<pre> Im1=(1-Rot)*Ima; Imb=0; for m=0:5 Imb=Imb+(Rog^(m+1)* Rot^m)* Irefbase(t,n,tau11,tau21,I0b,tau12,tau2 2,I0c,z,h,v,c,m); end Im2=(1-Rot)*Imb; Izt=Im1+Im2; figure(1); plot(t,Izt,'b'); title('Corrente calculada na base da torre Rog=1 Rot=-0,5 z=0 h=500'); grid; xlabel('Tempo (microsec)'); ylabel('Corrente (kA)'); legend('Izt'); print -dbitmap -r150 Izttop500 clear all; </pre>
---	---

3.2 – Funções Auxiliares

3.2.1 – Parcela de corrente refletida no topo da torre: Ireftopo

function IP = Ireftopo(t,n,tau11,tau21,I0b,tau12,tau22,I0c,z,h,v,c,m)

Calcula a forma de onda da corrente da descarga de retorno de um relâmpago em torre considerando o modelo Rachidi et al revisado.

Essa operação e feita considerando duas possibilidades: a) $h < z < H$; b) $0 < z < h$

Nessa função a corrente foi injetada no topo e medida no canal acima da torre.

Entrada de dados como segue:

Intervalo de tempo: t

Fator de concavidade: n

Constante de tempo de subida da corrente : tau1

Constante de tempo de decaimento da corrente : tau2

Corrente de pico : I0

Quantidade de reflexões para definir a corrente injetada: m=0

Tempo de retardo do pulso da DR (z-h)/v

Tempo de retardo da onda da DR (z-h)/c

Tempo de trafico da onda h/c: T

Chama a função Itorp acima;

grafique t, Itopo

CORRENTE DE BREAKDOWN

$\text{eta1} = \exp(-((\text{tau11}/\text{tau21}) * (\text{n} * \text{tau21}/\text{tau11})^{(1/\text{n})}))$;

$\text{lpb} = ((\text{I0b}/\text{eta1}) * (((\text{t} - ((\text{h} + \text{z})/\text{c}) - (2 * \text{m} * \text{h}/\text{c}))/\text{tau11})^{.n} ./ (1 + ((\text{t} - ((\text{h} + \text{z})/\text{c}) - (2 * \text{m} * \text{h}/\text{c}))/\text{tau11})^{.n} .* \exp(-(\text{t} - ((\text{h} + \text{z})/\text{c}) - (2 * \text{m} * \text{h}/\text{c}))/\text{tau21}))) * \text{stepfun}(\text{t}, (2 * \text{m} * \text{h}/\text{c}))$;

CORRENTE CORONA

$\text{eta2} = \exp(-((\text{tau12}/\text{tau22}) * (\text{n} * \text{tau22}/\text{tau12})^{(1/\text{n})}))$;

$\text{lpc} = ((\text{I0c}/\text{eta2}) * (((\text{t} - ((\text{h} + \text{z})/\text{c}) - (2 * \text{m} * \text{h}/\text{c}))/\text{tau12})^{.n} ./ (1 + ((\text{t} - ((\text{h} + \text{z})/\text{c}) - (2 * \text{m} * \text{h}/\text{c}))/\text{tau12})^{.n} .* \exp(-(\text{t} - ((\text{h} + \text{z})/\text{c}) - (2 * \text{m} * \text{h}/\text{c}))/\text{tau22}))) * \text{stepfun}(\text{t}, (2 * \text{m} * \text{h}/\text{c}))$;

CORRENTE TOTAL

$\text{IP} = \text{lpb} + \text{lpc}$;

3.2.2 – Parcela de corrente refletida na base da torre: Irefbase

function IL = Irefbase(t,n,tau11,tau21,I0b,tau12,tau22,I0c,z,h,v,c,m)

Calcula a forma de onda da corrente da descarga de retorno de um relâmpago em torre considerando o modelo Rachidi et al revisado.

Essa operação é feita considerando duas possibilidades: a) $h < z < H$; b) $0 < z < h$

Nessa função a corrente foi injetada no topo e medida no canal acima da torre.

Entrada de dados como segue:

Intervalo de tempo: t

Fator de concavidade: n

Constante de tempo de subida da corrente :tau1

Constante de tempo de decaimento da corrente : tau2

Corrente de pico : I0

Quantidade de reflexões para definir a corrente injetada: m=0

Tempo de retardo do pulso da DR(z-h)/v: Tv

Tempo de retardo da onda da DR (z-h)/c: Tc

Tempo de tráfico da onda h/c: T

Chama a função ltopoc acima;

grafique t, ltopo

CORRENTE DE BREAKDOWN

$\eta_1 = \exp(-((\tau_{11}/\tau_{21}) * (n * \tau_{21}/\tau_{11})^{(1/n)}))$;

$l_{lb} = ((I_0 b / \eta_1) * (((t - ((h-z)/c) - (2 * m * h/c)) / \tau_{11})^n / (1 + ((t - ((h-z)/c) - (2 * m * h/c)) / \tau_{11})^n) * \exp(-(t - ((h-z)/c) - (2 * m * h/c)) / \tau_{21}))$;

stepfun(t, (2 * m * h/c));

CORRENTE CORONA

$\eta_2 = \exp(-((\tau_{12}/\tau_{22}) * (n * \tau_{22}/\tau_{12})^{(1/n)}))$;

$l_{lc} = ((I_0 c / \eta_2) * (((t - ((h-z)/c) - (2 * m * h/c)) / \tau_{12})^n / (1 + ((t - ((h-z)/c) - (2 * m * h/c)) / \tau_{12})^n) * \exp(-(t - ((h-z)/c) - (2 * m * h/c)) / \tau_{22}))$;

CORRENTE TOTAL

$IL = l_{lb} + l_{lc}$;

4 – Formas de onda idealizadas como descargas subsequentes medidas (i) na base (z=0), (ii) no topo (z=h) de uma torre de 70 m de altura, onde o solo é considerado bom condutor ($Z_g = 0$) e as impedâncias da torre e do canal são relacionadas por $Z_{ch} = 3ZT$.

a) – Medições efetuadas na base da torre de 70 m:

Modelo Guedes et al. - Corrente medida na base da torre $z=0$, $h=70\text{m}$ $Z_g=0$ e $Z_{ch}=3Z_T$

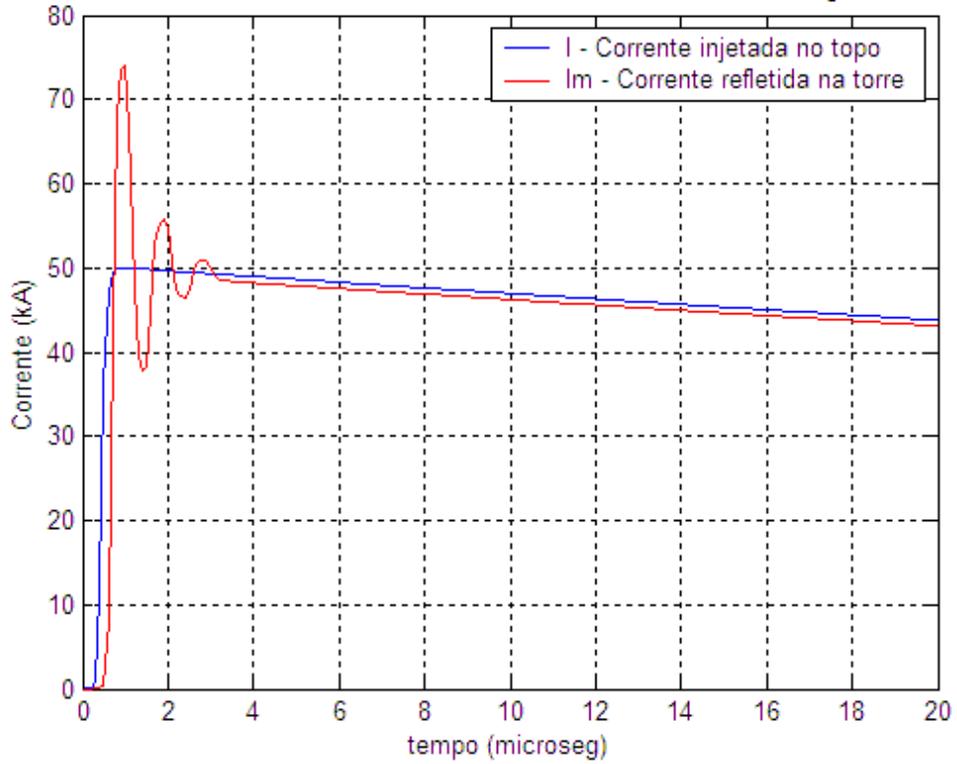


FIGURA A1 – Corrente medida na base de uma torre de 70 m de altura calculada pelo modelo Guedes et al.

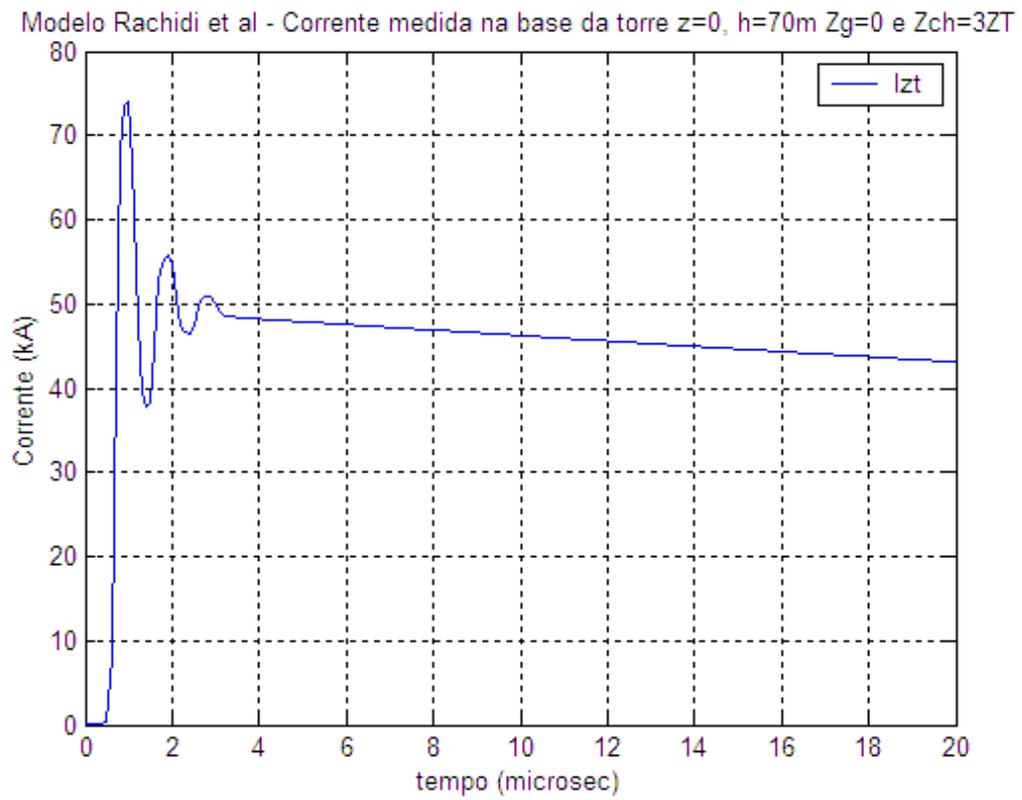


FIGURA A2 – Corrente medida na base de uma torre de 70 m de altura calculada pelo modelo Rachidi et al.

b) – Medições efetuadas no topo da torre de 70 m

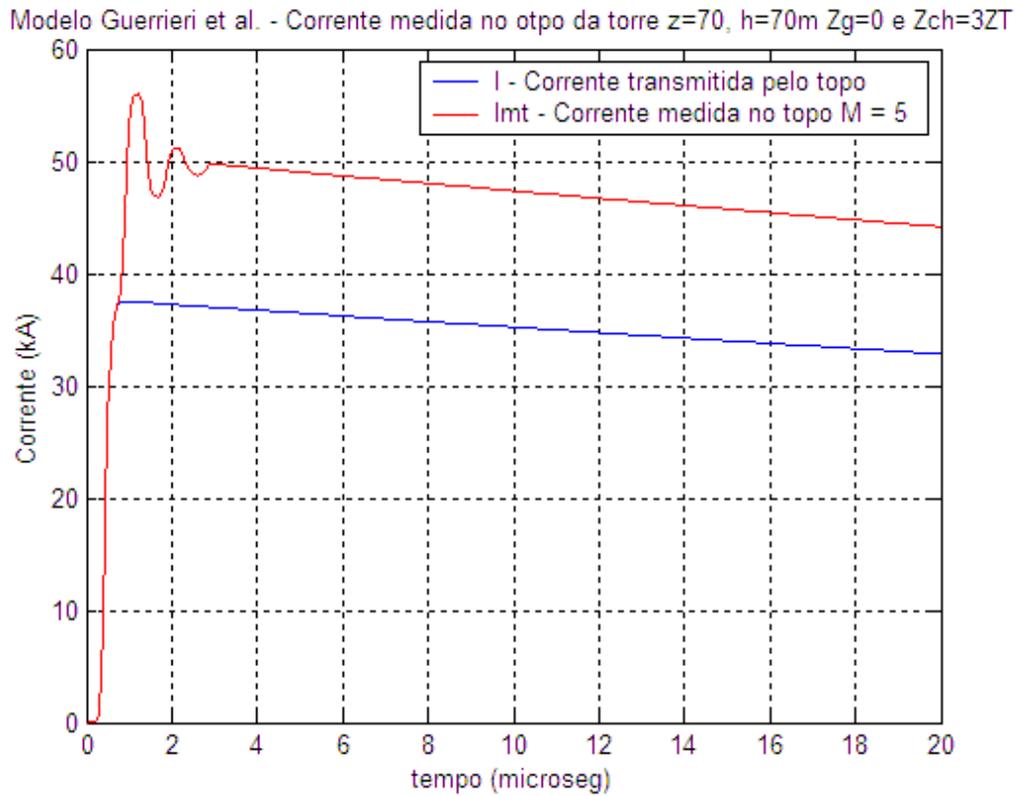


FIGURA A3 – Corrente medida no topo de uma torre de 70 m de altura calculada pelo modelo Guerrieri et al.

Modelo Rachidi et al - Corrente medida no topo da torre $z=70$, $h=70\text{m}$ $Z_g=0$ e $Z_{ch}=3Z_T$

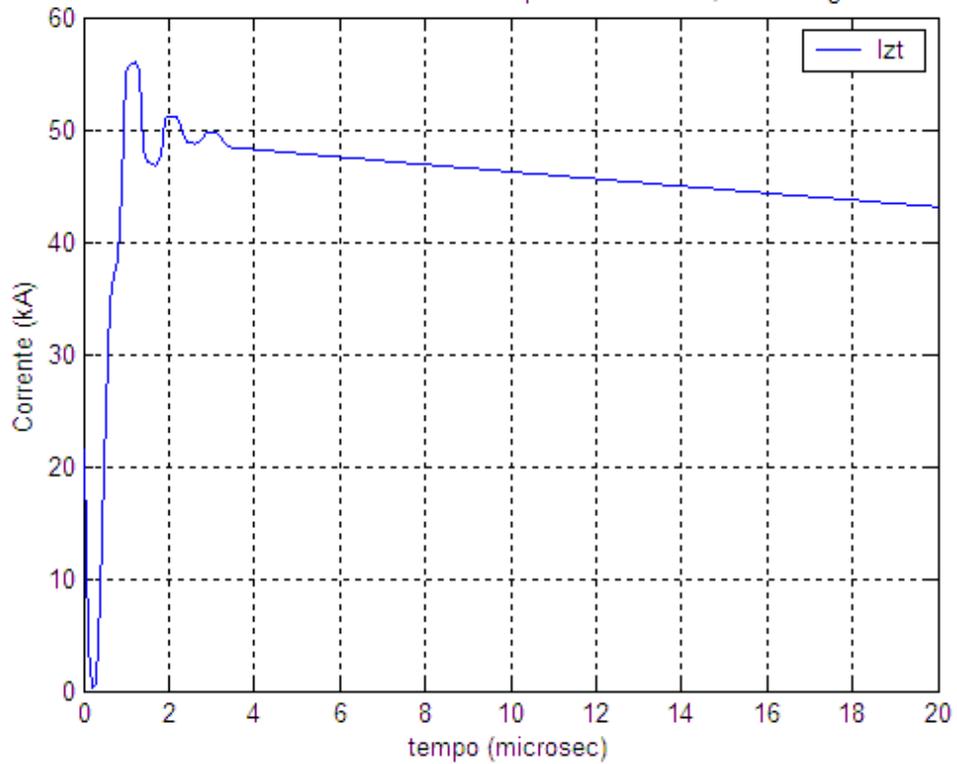


FIGURA A4 – Corrente medida no topo de uma torre de 70 m de altura calculada pelo modelo Rachidi et al.

5 – Formas de onda idealizada como descargas de retorno medidas (i) na base ($z=0$), (ii) no topo ($z=h$) de uma torre de 500 m de altura onde o solo é considerado bom condutor ($Z_g = 0$) e as impedâncias da torre e do canal são relacionadas por $Z_{ch} = 3ZT$.

a) – Medições efetuadas na base da torre de 500 m:

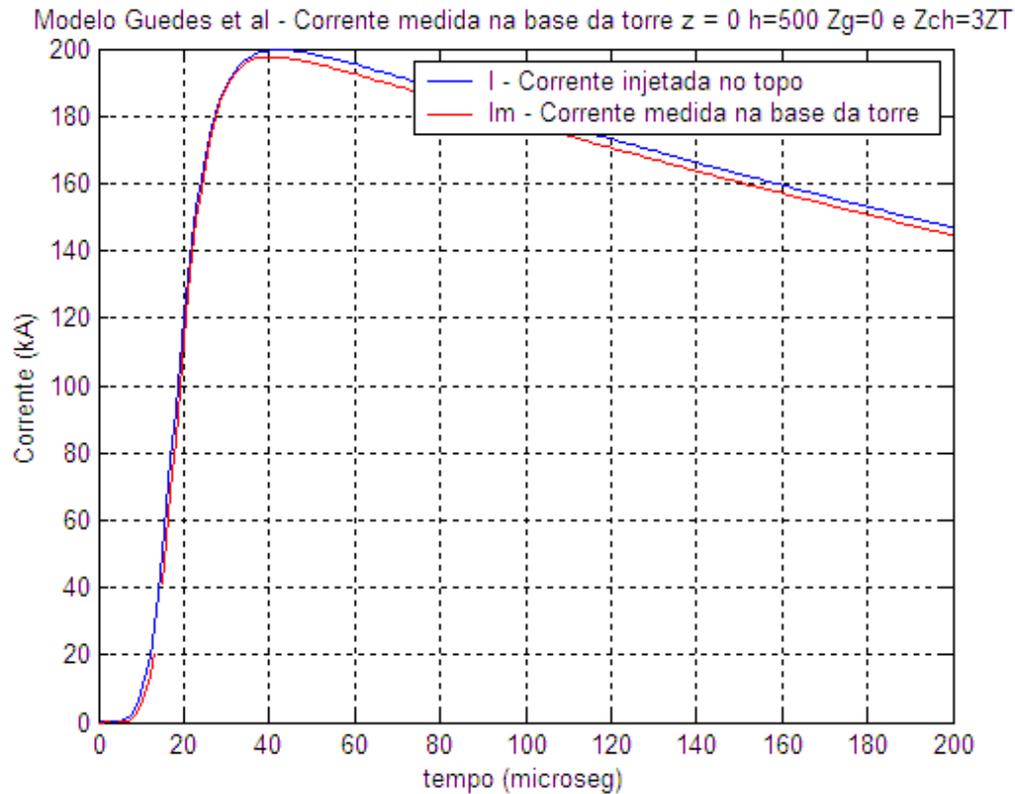


FIGURA A5 – Corrente medida na base de uma torre de 500 m de altura calculada pelo modelo Guedes et al.

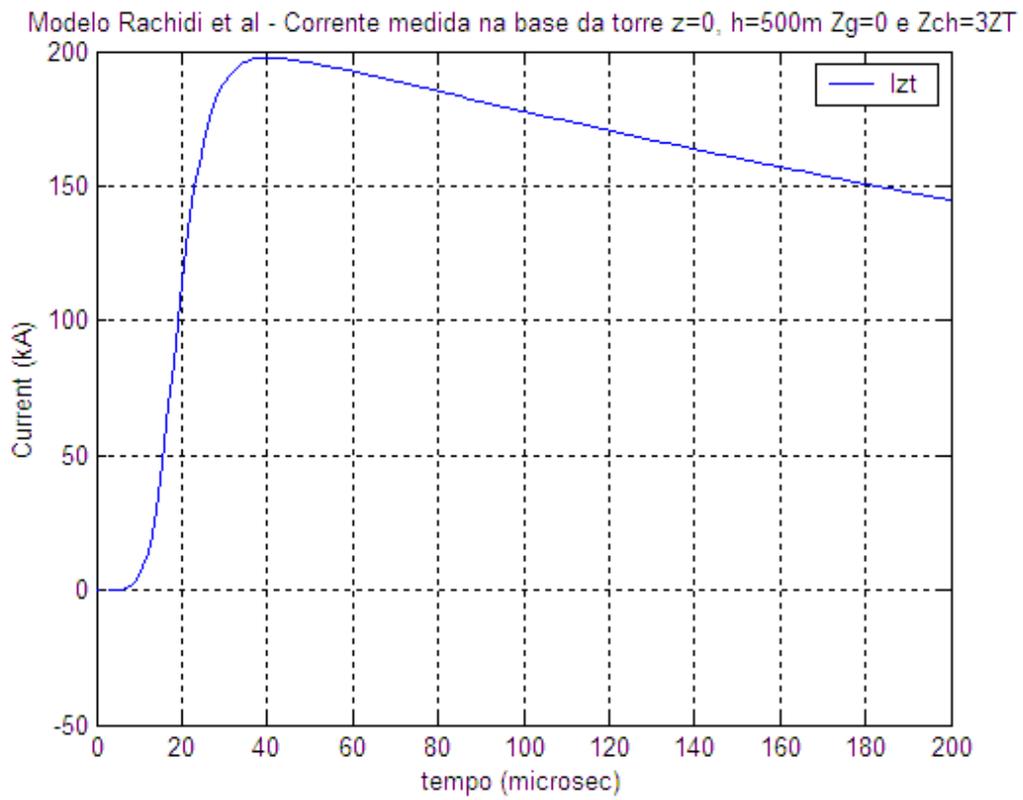


FIGURA A6 – Corrente medida na base de uma torre de 500 m de altura calculada pelo modelo Rachidi et al.

b) – Medições efetuadas no topo da torre de 500 m

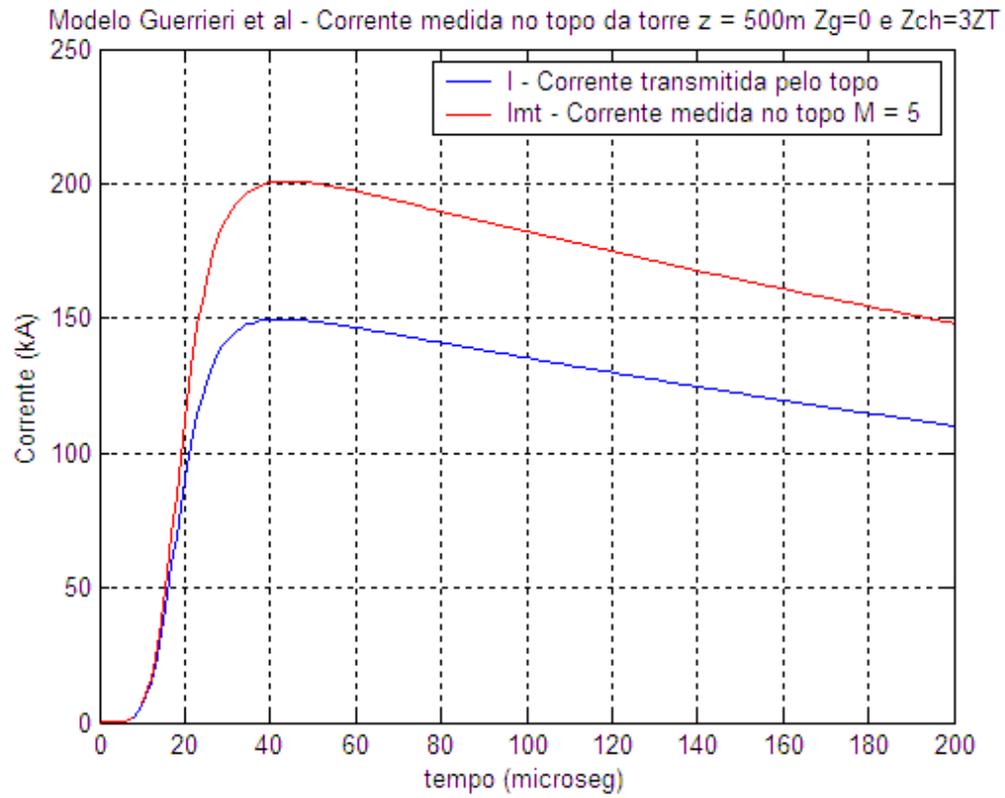


FIGURA A7 – Corrente medida no topo de uma torre de 500 m de altura calculada pelo modelo Guerrieri et al.

Modelo Rachidi et al - Corrente medida no topo da torre $z=500$, $h=500\text{m}$ $Z_g=0$ e $Z_{ch}=3Z_T$

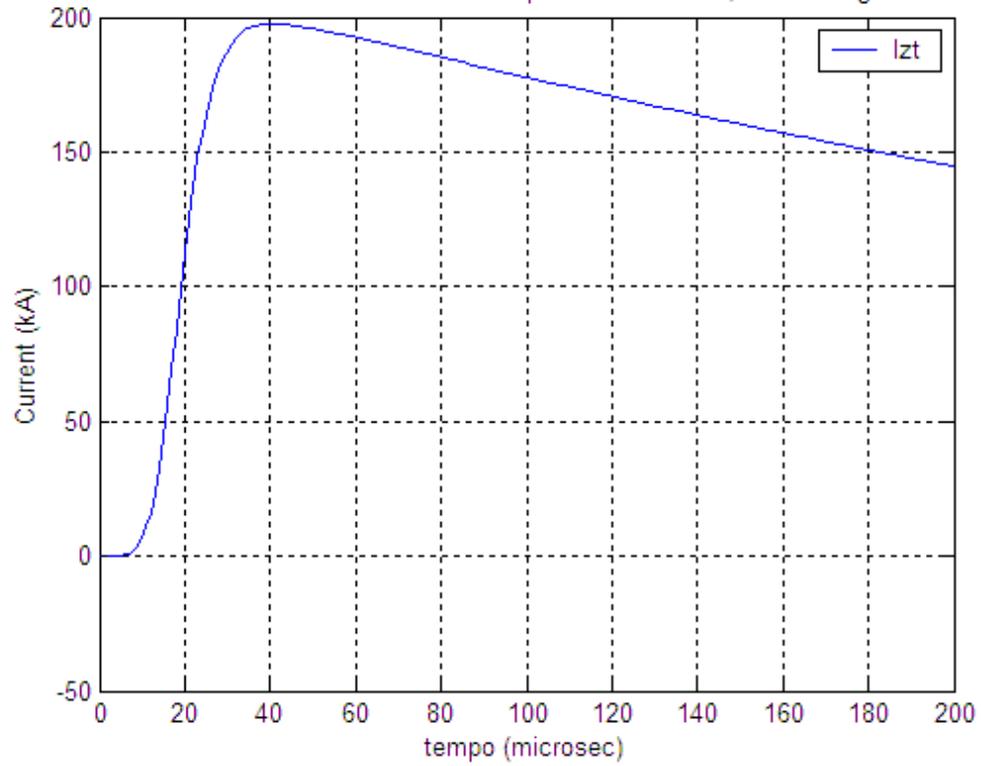


FIGURA A8 – Corrente medida no topo de uma torre de 500 m de altura calculada pelo modelo Rachidi et al.

APÊNDICE B

CÁLCULO DA CORRENTE DR1 MEDIDA NA BASE DO CANAL E NA BASE E TOPO DA TORRE DO MORRO DO CACHIMBO, COM MODIFICAÇÃO DOS COEFICIENTES DE REFLEXÃO NO TOPO E NA BASE DA TORRE

A TABELA B1 mostra as combinações de coeficientes de reflexão selecionados para o topo e a base do canal e para a base e topo da torre da estação do Morro do Cachimbo, bem como os valores de correntes estimadas na base do canal, no topo e na base da torre e a relação entre as correntes medidas na base e no topo da torre.

TABELA B.1 – Coeficientes de Reflexão no Canal e na Torre e as Correntes Medidas na Base do Canal e na Base e Topo da Torre.

CASO	ρ_{ct}	ρ_{cb}	ρ_{tt}	ρ_{tb}	I_{bcanal}	I_{tTorre}	I_{mTopo}	I_{mBase}	$\frac{I_{mBase}}{I_{mTopo}}$
2	-1	0.3	-0.3	0.5	35	23	30	30	1
3	-1	0.7	-0.7	0.5	34	30	33	33	1
4	-1	0.5	-0.5	0.9	35	27	34	34	1
5	-1	0.3	-0.3	0.9	35	23	34	34	1
6	-1	0.7	-0.7	0.9	33	30	35	32,5	0,93
7	-1	0.5	-0.5	1	35	27	35	34,5	0,99
8	-1	1	0	-	35	-	-	-	-
9	-1	0,5	0	-	35	-	-	-	-

Os casos de 2 a 7 são resultados da combinação de vários possíveis coeficientes de reflexão no topo e base da torre. Nos casos 8 e 9, as correntes idealizadas na base do canal representam a corrente sem distúrbios. No caso 8, o coeficiente de reflexão na base do canal é igual a 1, significando solo ideal com $Z_g = 0$ e no caso 9, o coeficiente de reflexão na base do canal é igual a 0,5 significando solo real com $Z_g > 0$. Em todos os casos o número de reflexões é igual a 5.

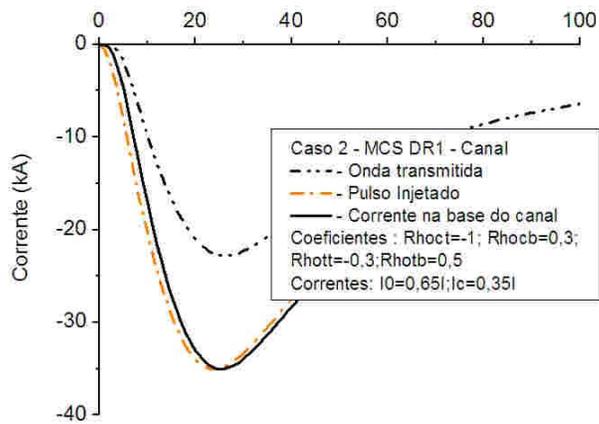


FIGURA: B1 – Caso 2 - Corrente injetada no topo do canal e medida na base do canal.

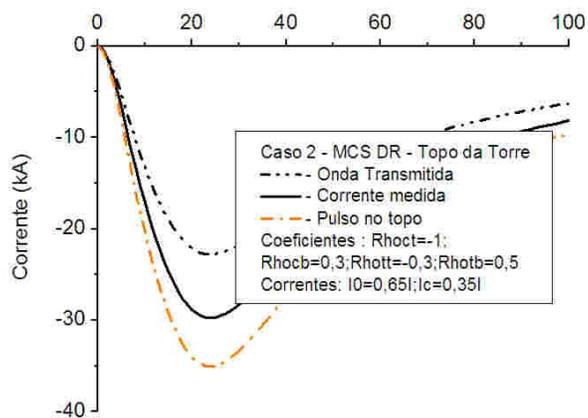


FIGURA: B2 – Caso 2 - Corrente transmitida à torre e medida no topo da torre após 5 reflexões.

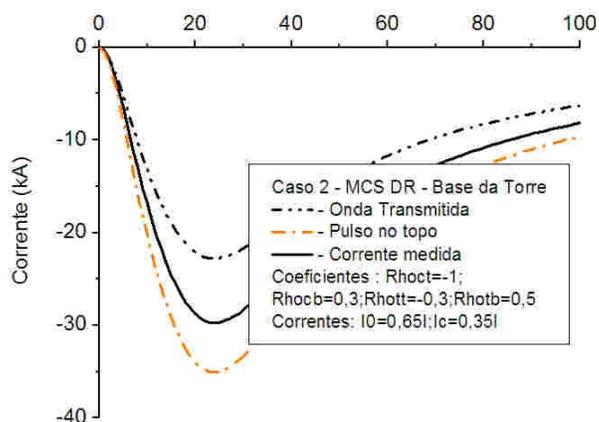


FIGURA: B3 – Caso 2 - Corrente transmitida à torre e medida na base da torre após 5 reflexões.

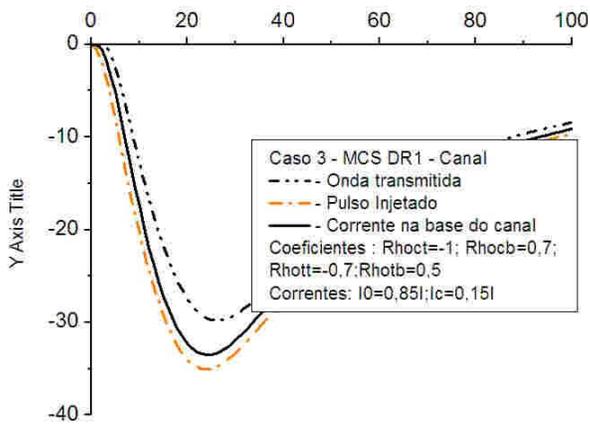


FIGURA: B4 – Caso 3 - Corrente injetada no topo do canal e medida na base do canal.

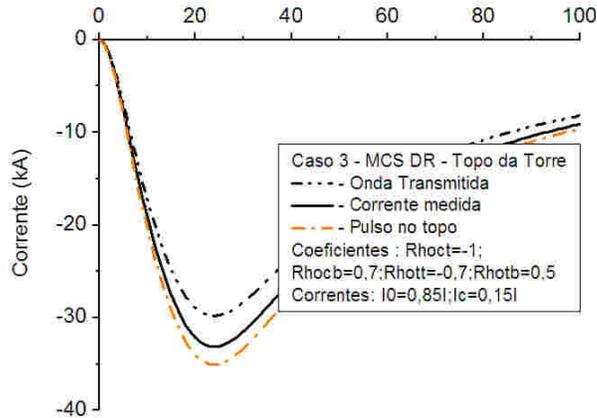


FIGURA: B5 – Caso 3 - Corrente transmitida à torre e medida no topo da torre após 5 reflexões.

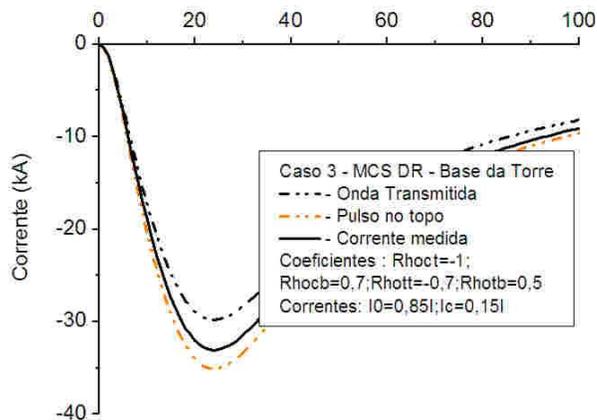


FIGURA: B6 – Caso 3 - Corrente transmitida à torre e medida na base da torre após 5 reflexões.

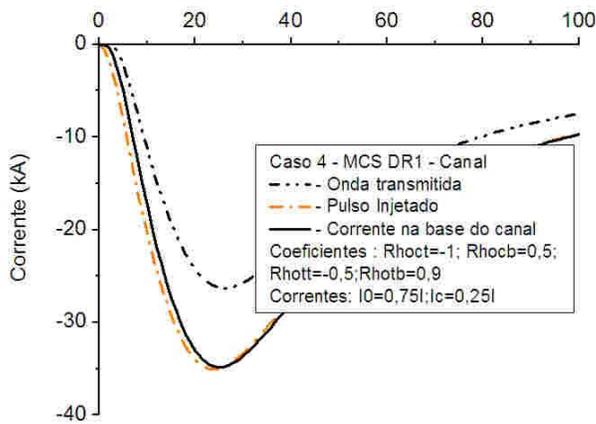


FIGURA: B7 – Caso4 - Corrente injetada no topo do canal e medida na base do canal.

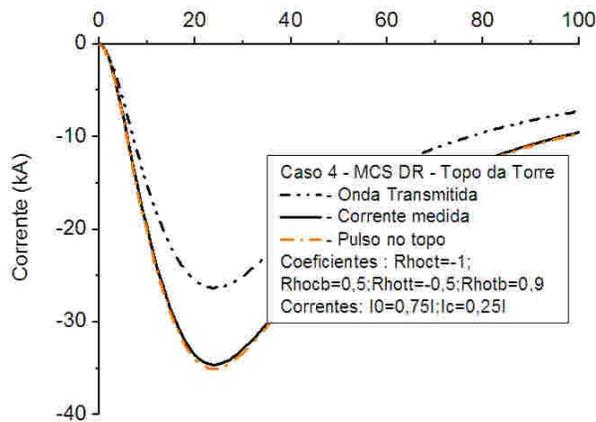


FIGURA: B8 – Caso 4 - Corrente transmitida à torre e medida no topo da torre após 5 reflexões.

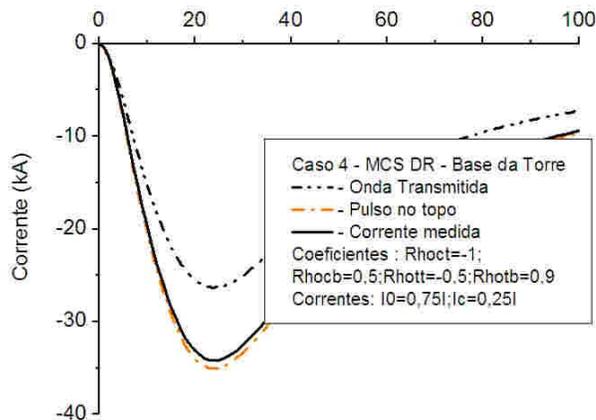


FIGURA: B9 – Caso 4 - Corrente transmitida à torre e medida na base da torre após 5 reflexões.

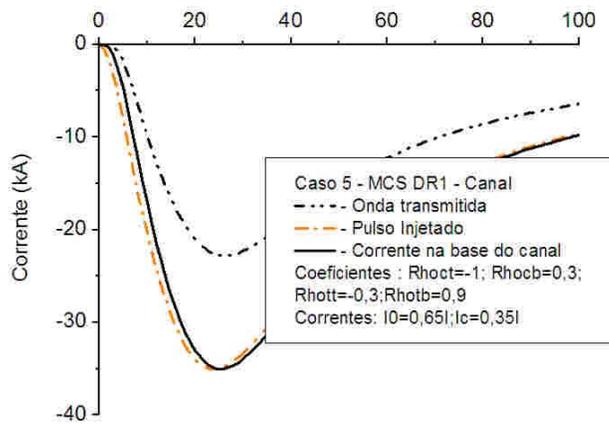


FIGURA: B10 – Caso 5 - Corrente injetada no topo do canal e medida na base do canal.

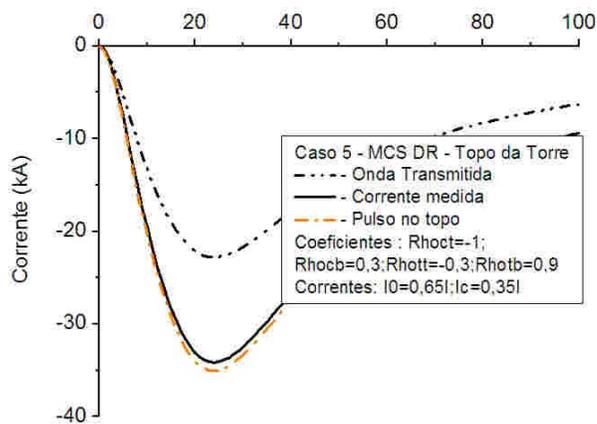


FIGURA: B 11 – Caso 5 - Corrente transmitida à torre e medida no topo da torre após 5 reflexões.

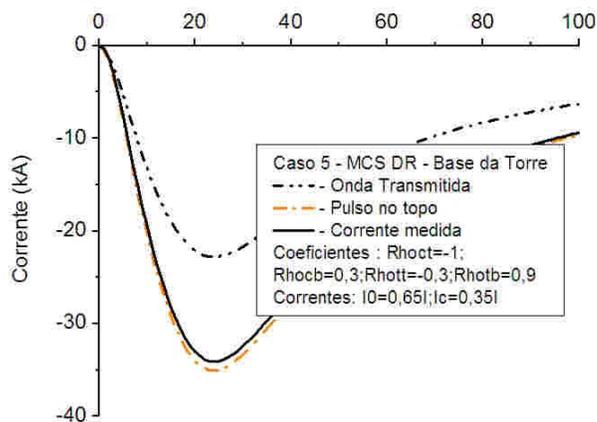


FIGURA: B12 – Caso 5 - Corrente transmitida à torre e medida na base da torre após 5 reflexões.

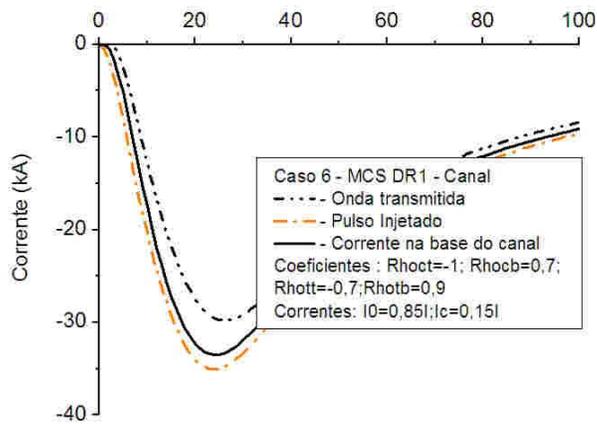


FIGURA: B13 – Caso 6 - Corrente injetada no topo do canal e medida na base do canal.

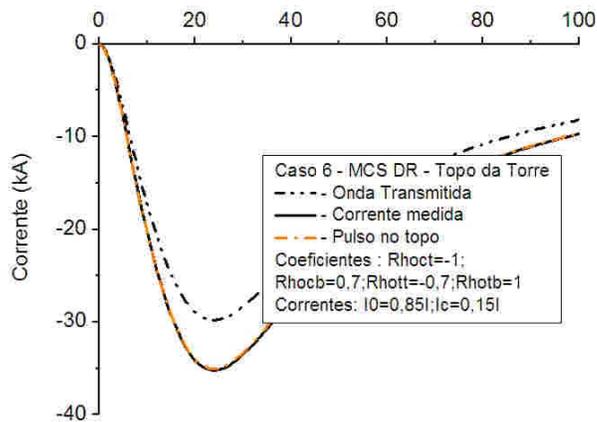


FIGURA: B14 – Caso 6 - Corrente transmitida à torre e medida no topo da torre após 5 reflexões.

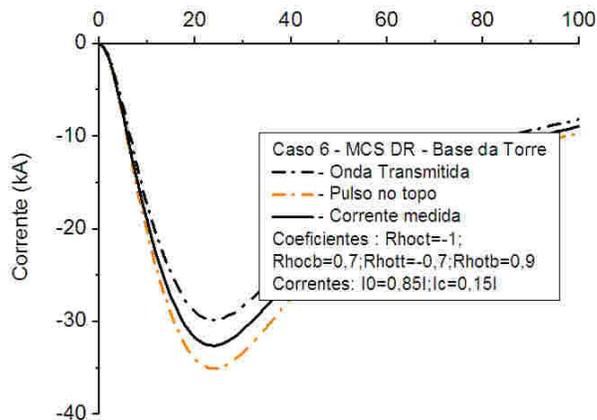


FIGURA: B15 – Caso 6 - Corrente transmitida à torre e medida na base da torre após 5 reflexões.

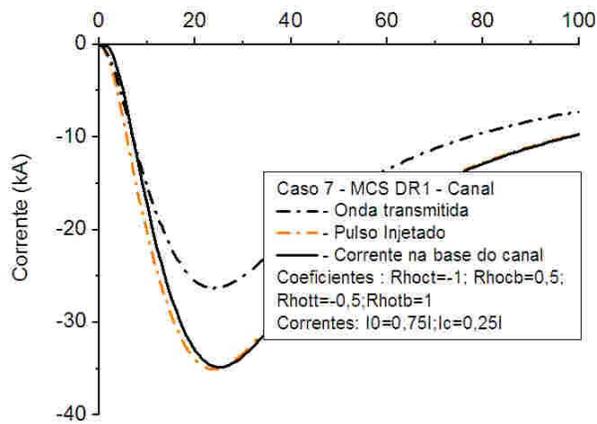


FIGURA: B16 – Caso 7 - Corrente injetada no topo do canal e medida na base do canal.

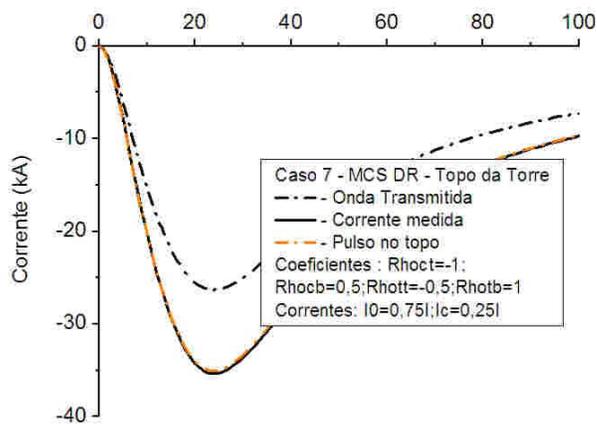


FIGURA: B17 – Caso 7 - Corrente transmitida à torre e medida no topo da torre após 5 reflexões.

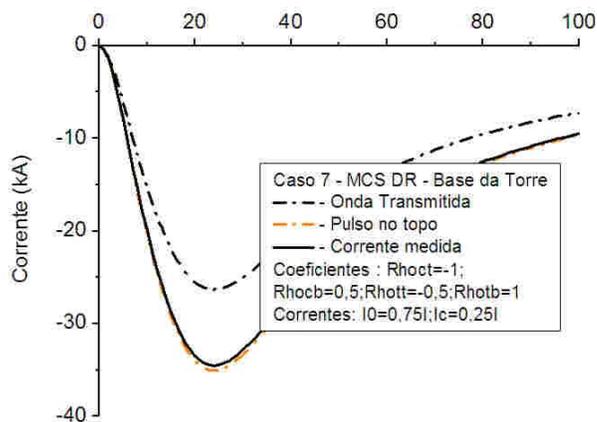


FIGURA: B18 – Caso 7 - Corrente transmitida à torre e medida na base da torre após 5 reflexões.

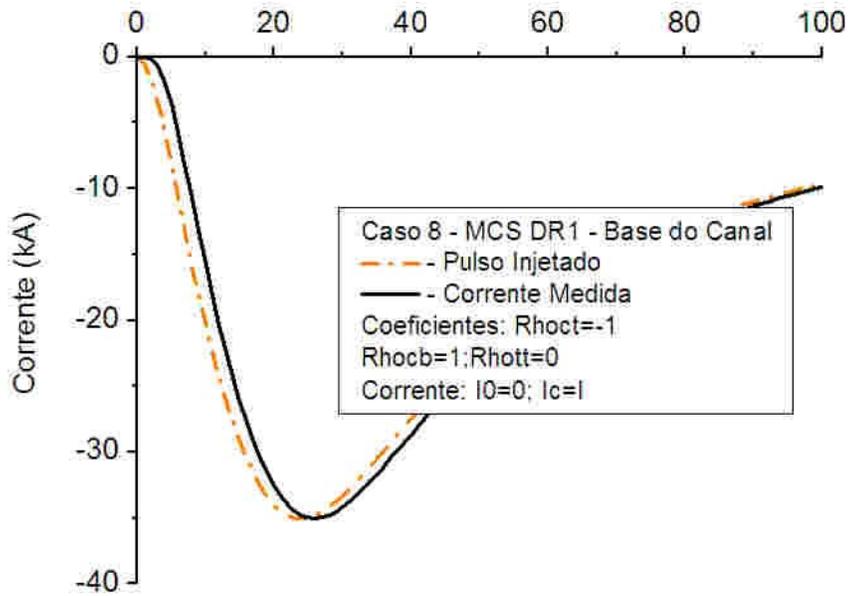


FIGURA: B19 – Caso 8 - Corrente injetada no topo do canal e medida na base no solo ideal sem a torre após 5 reflexões.

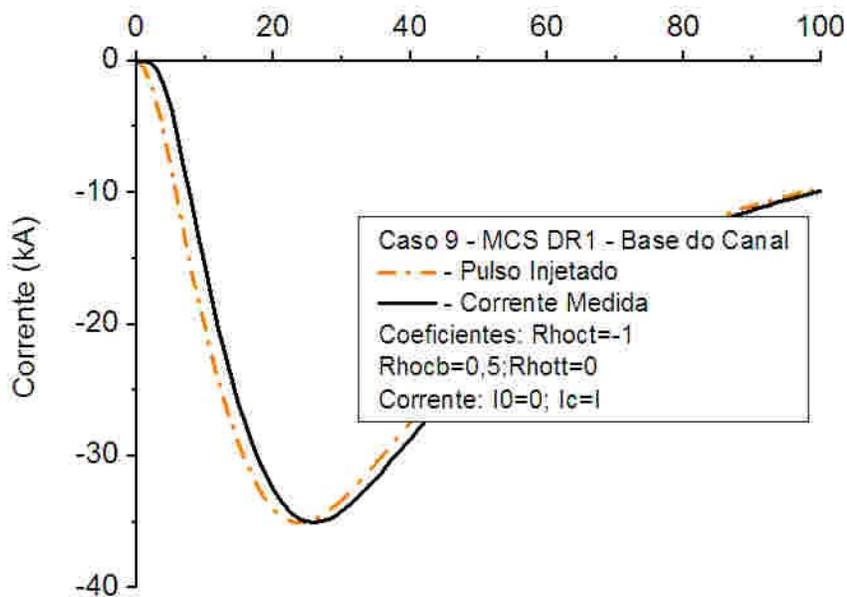


FIGURA: B20 – Caso 9 - Corrente injetada no topo do canal e medida na base no solo real sem a torre após 5 reflexões.