

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PROGRAMA INTERUNIDADES DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA

MILTOM SHIGIHARA

**Avaliação de correntes de descargas atmosféricas através de  
medições diretas em estruturas altas**

São Paulo

2005

MILTOM SHIGIHARA

**Avaliação de correntes de descargas atmosféricas através de  
medições diretas em estruturas altas**

Dissertação apresentada ao Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo (Instituto de Física, Faculdade de Economia, Administração e Ciências Contábeis, Escola Politécnica, Instituto de Eletrotécnica e Energia) para obtenção do título de Mestre em Energia.

Orientador:

Prof. Dr. Alexandre Piantini

São Paulo

2005

**AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.**

### **FICHA CATALOGRÁFICA**

Shigihara, Milton

Avaliação de correntes de descargas atmosféricas através de medições diretas em estruturas altas. Milton Shigihara. São Paulo, 2005.

152 p.

Dissertação (Mestrado) – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia (IF,FEA,EP,IEE) da Universidade de São Paulo, 2005.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Piantini

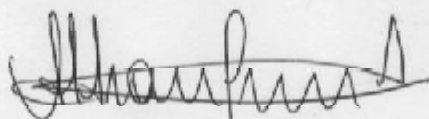
1.Descargas Atmosféricas 2.Corrente “Contaminada” 3.Modelos de Descargas de Retorno 4. Estruturas Elevadas I.Título

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
PROGRAMA INTERUNIDADES DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA  
EP – FEA – IEE - IF

MILTOM SHIGIHARA

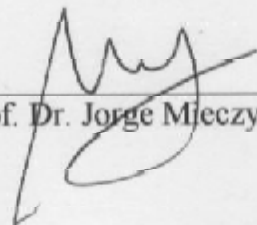
*“Avaliação de correntes de descargas atmosféricas através de  
medições diretas em estruturas altas”*

Dissertação defendida e aprovada em 05/09/2005 pela Comissão Julgadora:



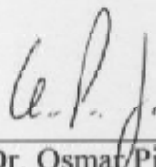
---

Prof. Dr. Alexandre Piantini – IEE/USP  
Orientador e Presidente da Comissão Julgadora



---

Prof. Dr. Jorge Mieczyslaw Janiszewski – EP/USP



---

Prof. Dr. Osmar Pinto Junior - INPE

A Deus,  
a minha família,  
à Cintia,  
ao meu tio Motohiro Kawakami.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao orientador e incentivador desse trabalho Prof. Dr. Alexandre Piantini. Houve momentos que estava muito confuso com o andamento do tema a ser desenvolvido no Mestrado, agradeço pelas idéias e sugestões, sem as quais esse trabalho não seria possível.

Agradeço aos colegas de trabalho do Laboratório de Altas Correntes (LAC/IEE/USP) e do Grupo de Alta Tensão e Descargas Atmosféricas (GATDA/USP), ambos pertencentes à Universidade de São Paulo, pelas sugestões que contribuíram de alguma forma para o enriquecimento desse trabalho.

Agradeço aos ingressantes da turma 2001 do programa de Pós-Graduação do PIPGE pela amizade.

Agradeço às bibliotecárias do Instituto de Eletrotécnica e Energia que sempre foram muito atenciosas e ágeis em tudo.

Agradeço às secretárias do PIPGE/USP que sempre cuidam para o bom andamento de cada aluno ingressante no curso de pós-graduação.

Agradeço aos professores do PIPGE/USP pela dedicação ao ensino e à pesquisa.

Agradeço aos professores que fizeram parte da minha educação ao longo dos anos, em especial à Prof<sup>a</sup>. Adele Dina Bertini pela dedicação ao ensino.

Agradeço aos meus amigos que sempre estiveram presentes apesar da minha ausência em muitas ocasiões.

Agradeço ao meu tio Motohiro Kawakami, pois esse trabalho é fruto do incentivo que ele me deu, pois muito do que sou hoje eu devo a ele.

Agradeço a minha família, em especial a minha mãe, pois mesmo viúva de três crianças, ela se esforçou muito para criar e dar educação a cada um. Esse trabalho, em sua grande parte, é fruto da dedicação dela.

Agradeço a minha querida Cintia Tiemi Yaginuma que me apoiou e compreendeu durante o desenvolvimento deste trabalho, mesmo sabendo que eu estaria ausente em algumas ocasiões e que não estaria fisicamente próximo a ela.

“Todo trabalho árduo traz proveito, ...”

(Provérbios 14:23)

## RESUMO

SHIGIHARA, M. **Avaliação de correntes de descargas atmosféricas através de medições diretas em estruturas altas**. 2005. 152 p. Dissertação de Mestrado – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia. Universidade de São Paulo.

As características das correntes das descargas atmosféricas têm fundamental importância na coordenação de isolamento e nos projetos de equipamentos de sistemas de transmissão e de distribuição de energia. As curvas de distribuição de frequência cumulativa da CIGRE relativas aos principais parâmetros da primeira e das descargas subsequentes, frequentemente utilizadas para avaliar o desempenho das linhas de transmissão e distribuição, se referem a dados obtidos através da medição de correntes de descargas negativas em estruturas elevadas. Entretanto, as correntes medidas nesses objetos podem apresentar distorções associadas às diferenças de impedâncias entre o canal, o objeto e o aterramento. Em outras palavras, a corrente em tais objetos pode variar substancialmente em função do ponto escolhido para medição, bem como apresentar diferenças significativas em relação à corrente no canal da descarga. Essas correntes são denominadas “contaminadas”. As curvas da CIGRE relativas às amplitudes, tempos de frente e taxas de crescimento das correntes se referem às correntes “contaminadas”, uma vez que as reflexões que ocorrem no topo e na base de objetos elevados não foram levadas em consideração no processo de construção dessas curvas. Assim, o tratamento desses dados necessita ser revisto. Por outro lado, o termo “corrente descontaminada” se refere à corrente que fluiria através do canal da descarga caso os coeficientes de reflexão no topo e na base do objeto fossem iguais a zero. Neste trabalho, por meio de uma ferramenta computacional desenvolvida, diversos aspectos relacionados aos processos de “contaminação” e “descontaminação” de correntes são discutidos, com especial atenção no que se refere às influências dos vários parâmetros do sistema “canal-objeto-aterramento” no comportamento espaço-temporal da corrente. É também apresentada uma discussão acerca das características de uma corrente de descarga medida na base de uma torre de 62,5 m de altura localizada no Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo.

Palavras-chave: descargas atmosféricas, corrente “contaminada”, modelos de descargas de retorno, estruturas elevadas.



## ABSTRACT

SHIGIHARA, M. **Lightning current discharge evaluation through direct measure in tall towers**. 2005. 152 f. Master Dissertation – Post Graduation Program in Energy. University of São Paulo.

The characteristics of lightning currents have a fundamental importance on insulation coordination and on the design of transmission and distribution lines equipment. The CIGRE cumulative frequency distribution curves relative to the main parameters of the first and subsequent downward flashes, which are very frequently used for the evaluation of the lightning performance of transmission and distribution lines, refers to data obtained from negative current measurements from tall instrumented structures. However, currents measured on elevated objects may present distortions associated with differences on the impedances of the lightning channel, the strike object and the grounding system. In other words, the current in such objects may, in some circumstances, depend significantly on the measuring point and differ substantially from the current that flows along the lightning channel. These currents are called "contaminated". The curves regarding current magnitudes, front times and rates of rise presented in CIGRE refer to these "contaminated" currents, since the reflections that occur at the base and at the top of elevated strike objects were not taken into account in the processing of the data that led to those curves. The data should, thus, be reviewed. On the other hand, the term "decontaminated" current stands for the current that flows through the lightning channel assuming reflection coefficients at the bottom and at the top of the strike object equal to zero, i.e., the same impedances for the lightning channel, the elevated object and the grounding system. In this work a computer code was developed and several aspects related to the "contamination" and "decontamination" processes are discussed, with emphasis upon the influences of the various parameters of the system "lightning channel - strike object - grounding" on the stroke current. A discussion of the characteristics of a stroke current measured at the bottom of a 62,5 m high mast located at the Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo is also presented.

Keywords: lightning, "contaminated" current, return stroke models, elevated objects.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1.	Curva CBEMA (adaptada de IEEE Std 446 (1995)) .....	2
Figura 1.2.	Curva ITI (adaptada de ONS (2001)) .....	3
Figura 1.3.	Ilustração de uma descarga que incide diretamente no solo .....	11
Figura 1.4.	Curva de distribuição de frequência cumulativa de amplitudes de correntes das descargas de retorno (adaptada de Cigre (1980)) .....	12
Figura 2.1.	Figura ilustrativa dos diversos tipos de descargas atmosféricas existentes na natureza .....	14
Figura 2.2.	Forma de onda típica de corrente da primeira descarga de retorno negativa .....	27
Figura 2.3.	Corrente versus altura $z'$ acima do nível do solo para um instante arbitrário $t = t_I$ para os modelos TL e TCS. Perceber que tanto a corrente em $z'=0$ como $v_f$ são iguais em ambos modelos (adaptada de Rakov (2003)) .....	35
Figura 2.4.	Fonte de corrente distribuída ao longo do canal (adaptada de Rachidi et al (2002)) .....	36
Figura 3.1.	Definição das correntes: (a) “pura”, (b) “contaminada” e (c) “descontaminada” .....	40
Figura 3.2.	Geometria do problema (adaptada de Guerrieri et al (1998)) .....	41
Figura 3.3.	Incidência da descarga em um objeto elevado. A corrente total $i(z',t)$ é obtida pela integração de $d_{i1}$ e $d_{i2}$ com limites apropriados e somando as suas contribuições de correntes (adaptada de Rachidi et al (2002)): a) $z^* > z' > h_t$ (apenas a onda incidente inicialmente é mostrada, $d_{i1}$ também inclui as reflexões no topo e na base do objeto); b) $h_t < z^* < z'$ (apenas a reflexão no topo do objeto é mostrada) .....	43
Figura 3.4.	Modelo de circuito representando a fonte ( $i(h_t,t)$ ), a impedância do canal ( $Z_{ch}$ ), a impedância da torre ( $Z_t$ ) e a resistência do solo ( $R_g$ ) .....	44
Figura 3.5.	Modelo elétrico de equivalente Thevenin .....	45
Figura 3.6.	Representações utilizadas por Guerrieri et al (1998) e por Rachidi et al (2002) .....	46
Figura 3.7.	Curvas de corrente obtidas por Bermudez et al (2003) no topo de uma torre 248 m de altura ( $h_t = 248$ m) e com $r_t = -0,5$ e $r_g = 1$ .....	47
Figura 3.8.	Curvas de corrente obtidas por Bermudez et al (2003) no ponto $z' = 124$ m de uma torre de 248 m de altura ( $h_t = 248$ m) e com $r_t = -0,5$ e $r_g = 1$ .....	48
Figura 4.1.	Representação de uma corrente típica de descarga subsequente através da soma de duas funções de Heidler, considerando os parâmetros indicados na Tabela 4.1 .....	50

Figura 4.2.	Corrente utilizada nas simulações (valores dos parâmetros indicados na Tabela 4.2) .....	51
Figura 4.3.	Comparação ilustrativa entre a corrente obtida pelo programa CONTAMINATORRE e aqueles referentes à Figura 3.8 (BERMUDEZ et al, 2003) para as seguintes condições: $h_t = 248$ m; $h_s = 124$ m; $r_t = -0,5$ e $r_g = 1$ .....	52
Figura 4.4.	Circuito de simulação (Pspice) .....	54
Figura 4.5.	Comparação entre as correntes obtidas através dos programas Pspice e CONTAMINATORRE para o caso indicado na Figura 4.3 ( $h_s = 124$ m, $h_t = 248$ m, $r_t = -0,5$ , $r_g = 1$ ) .....	55
Figura 4.6.	Corrente medida na torre de Peissenberg em Janeiro 1998 (adaptada de Bermudez et al (2003)) .....	56
Figura 4.7.	Correntes “contaminadas” avaliadas na base da estrutura considerando estruturas com diferentes alturas ( $h_s = 0$ m, $Z_{ch} = 1$ k $\Omega$ , $Z_t = 275$ $\Omega$ e $R_g = 5$ $\Omega$ ) .....	57
Figura 4.8.	Correntes em diferentes posições da estrutura para uma torre ( $h_t = 10$ m, $h_{base} = 0$ m, $h_{centro} = 5$ m, $h_{topo} = 10$ m, $Z_{ch} = 1$ k $\Omega$ , $Z_t = 275$ $\Omega$ e $R_g = 5$ $\Omega$ ) .....	59
Figura 4.9.	Correntes em diferentes posições da estrutura para uma torre ( $h_t = 62,5$ m, $h_{base} = 0$ m, $h_{centro} = 31,25$ m, $h_{topo} = 62,5$ m, $Z_{ch} = 1$ k $\Omega$ , $Z_t = 275$ $\Omega$ e $R_g = 5$ $\Omega$ ) .....	59
Figura 4.10.	Correntes em diferentes posições da estrutura para uma torre ( $h_t = 500$ m, $h_{base} = 0$ m, $h_{centro} = 250$ m, $h_{topo} = 500$ m, $Z_{ch} = 1$ k $\Omega$ , $Z_t = 275$ $\Omega$ e $R_g = 5$ $\Omega$ ) .....	60
Figura 4.11.	Correntes “puras” em função da impedância do canal ( $Z_{ch1} = 500$ $\Omega$ , $Z_{ch2} = 1$ k $\Omega$ , $Z_{ch3} = 2,5$ k $\Omega$ e $R_g = 5$ $\Omega$ ) .....	61
Figura 4.12.	Correntes “contaminadas” na base da torre em função da impedância do canal ( $h_t = 62,5$ m com $h_s = 0$ m, $Z_{ch1} = 500$ $\Omega$ , $Z_{ch2} = 1$ k $\Omega$ , $Z_{ch3} = 2,5$ k $\Omega$ , $Z_t = 275$ $\Omega$ e $R_g = 5$ $\Omega$ ) .....	62
Figura 4.13.	Correntes “pura” e “contaminada” para $Z_{ch} = 500$ $\Omega$ ( $h_t = 62,5$ m com $h_s = 0$ m, $Z_t = 275$ $\Omega$ e $R_g = 5$ $\Omega$ ) .....	63
Figura 4.14.	Correntes “pura” e “contaminada” para $Z_{ch} = 1$ k $\Omega$ ( $h_t = 62,5$ m com $h_s = 0$ m, $Z_t = 275$ $\Omega$ e $R_g = 5$ $\Omega$ ) .....	63
Figura 4.15.	Correntes “pura” e “contaminada” para $Z_{ch} = 2,5$ k $\Omega$ ( $h_t = 62,5$ m com $h_s = 0$ m, $Z_t = 275$ $\Omega$ e $R_g = 5$ $\Omega$ ) .....	64
Figura 4.16.	Corrente “pura” e correntes “contaminadas” em função da impedância da torre ( $h_t = 62,5$ m, $h_s = 0$ m, $Z_{ch} = 500$ $\Omega$ , $Z_{t1} = 138$ $\Omega$ , $Z_{t2} = 275$ $\Omega$ e $Z_{t3} = 550$ $\Omega$ e $R_g = 5$ $\Omega$ ) .....	65
Figura 4.17.	Corrente “pura” e correntes “contaminadas” em função da impedância da torre ( $h_t = 62,5$ m, $h_s = 0$ m, $Z_{ch} = 1$ k $\Omega$ , $Z_{t1} = 138$ $\Omega$ , $Z_{t2} = 275$ $\Omega$ e $Z_{t3} = 550$ $\Omega$ e $R_g = 5$ $\Omega$ ) .....	65

Figura 4.18.	Correntes “contaminadas” em função da variação da resistência de terra ( $h_t = 62,5$ m, $h_s = 0$ m, $Z_{ch} = 1$ k $\Omega$ , $Z_t = 138$ $\Omega$ , $R_{g1} = 5$ $\Omega$ , $R_{g2} = 50$ $\Omega$ , $R_{g3} = 100$ $\Omega$ e $R_{g4} = 1$ k $\Omega$ ) .....	66
Figura 4.19.	Correntes “contaminadas” em função da variação da resistência de terra ( $h_t = 62,5$ m, $h_s = 0$ m, $Z_{ch} = 1$ k $\Omega$ , $Z_t = 275$ $\Omega$ , $R_{g1} = 5$ $\Omega$ , $R_{g2} = 50$ $\Omega$ , $R_{g3} = 100$ $\Omega$ e $R_{g4} = 1$ k $\Omega$ ) .....	67
Figura 4.20.	Correntes “puras” para diferentes valores de $R_g$ ( $Z_{ch} = 1$ k $\Omega$ , $R_{g1} = 5$ $\Omega$ , $R_{g2} = 50$ $\Omega$ , $R_{g3} = 100$ $\Omega$ e $R_{g4} = 1$ k $\Omega$ ) .....	68
Figura 4.21.	Correntes “pura” e “contaminada” para $Z_t = 138$ $\Omega$ e $R_g = 5$ $\Omega$ ( $h_t = 62,5$ m, $h_s = 0$ m, $Z_{ch} = 1$ k $\Omega$ ) .....	69
Figura 4.22.	Correntes “pura” e “contaminada” para $Z_t = 138$ $\Omega$ e $R_g = 50$ $\Omega$ ( $h_t = 62,5$ m, $h_s = 0$ m, $Z_{ch} = 1$ k $\Omega$ ) .....	69
Figura 4.23.	Correntes “pura” e “contaminada” para $Z_t = 138$ $\Omega$ e $R_g = 100$ $\Omega$ ( $h_t = 62,5$ m, $h_s = 0$ m, $Z_{ch} = 1$ k $\Omega$ ) .....	70
Figura 4.24.	Correntes “pura” e “contaminada” para $Z_t = 138$ $\Omega$ e $R_g = 1$ k $\Omega$ ( $h_t = 62,5$ m, $h_s = 0$ m, $Z_{ch} = 1$ k $\Omega$ ) .....	70
Figura 4.25.	Correntes “pura” e “contaminada” para $Z_t = 275$ $\Omega$ e $R_g = 5$ $\Omega$ ( $h_t = 62,5$ m, $h_s = 0$ m, $Z_{ch} = 1$ k $\Omega$ ) .....	71
Figura 4.26.	Correntes “pura” e “contaminada” para $Z_t = 275$ $\Omega$ e $R_g = 50$ $\Omega$ ( $h_t = 62,5$ m, $h_s = 0$ m, $Z_{ch} = 1$ k $\Omega$ ) .....	71
Figura 4.27.	Correntes “pura” e “contaminada” para $Z_t = 275$ $\Omega$ e $R_g = 100$ $\Omega$ ( $h_t = 62,5$ m, $h_s = 0$ m, $Z_{ch} = 1$ k $\Omega$ ) .....	72
Figura 4.28.	Correntes “pura” e “contaminada” para $Z_t = 275$ $\Omega$ e $R_g = 1$ k $\Omega$ ( $h_t = 62,5$ m, $h_s = 0$ m, $Z_{ch} = 1$ k $\Omega$ ) .....	72
Figura 4.29.	Correntes “descontaminadas” com diferentes tempos de frentes .....	73
Figura 4.30.	Correntes “puras” ( $Z_{ch} = 1$ k $\Omega$ , $Z_t = 275$ $\Omega$ e $R_g = 5$ $\Omega$ ) .....	74
Figura 4.31.	Correntes “contaminadas” ( $h_t = 62,5$ m, $h_s = 0$ m, $Z_{ch} = 1$ k $\Omega$ , $Z_t = 275$ $\Omega$ e $R_g = 5$ $\Omega$ ) .....	75
Figura 4.32.	Corrente “pura”, corrente “descontaminada” e corrente “contaminada” para $T_{d30/90} = 1$ $\mu$ s ( $h_t = 62,5$ m, $h_s = 0$ m, $Z_{ch} = 1$ k $\Omega$ , $Z_t = 275$ $\Omega$ e $R_g = 5$ $\Omega$ ) .....	75
Figura 4.33.	Corrente “pura”, corrente “descontaminada” e corrente “contaminada” para $T_{d30/90} = 2$ $\mu$ s ( $h_t = 62,5$ m, $h_s = 0$ m, $Z_{ch} = 1$ k $\Omega$ , $Z_t = 275$ $\Omega$ e $R_g = 5$ $\Omega$ ) .....	76
Figura 4.34.	Corrente “pura”, corrente “descontaminada” e corrente “contaminada” para $T_{d30/90} = 4$ $\mu$ s ( $h_t = 62,5$ m, $h_s = 0$ m, $Z_{ch} = 1$ k $\Omega$ , $Z_t = 275$ $\Omega$ e $R_g = 5$ $\Omega$ ) .....	76
Figura 4.35.	Corrente “pura”, corrente “descontaminada” e corrente “contaminada” para $T_{d30/90} = 8$ $\mu$ s ( $h_t = 62,5$ m, $h_s = 0$ m, $Z_{ch} = 1$ k $\Omega$ , $Z_t = 275$ $\Omega$ e $R_g = 5$ $\Omega$ ) .....	77

Figura 4.36.	Influência do número de pontos utilizados nas simulações (programa CONTAMINATORRE). ( $h_t = 62,5$ m, $h_s = 0$ m, $Z_{ch} = 1$ k $\Omega$ , $Z_t = 275$ $\Omega$ e $R_g = 5$ $\Omega$ ) .....	79
Figura 4.37.	Corrente I0 (dado de entrada) e corrente “contaminada para dado de entrada com 501 pontos ( $h_t = 62,5$ m, $h_s = 0$ m, $Z_{ch} = 1$ k $\Omega$ , $Z_t = 275$ $\Omega$ e $R_g = 5$ $\Omega$ ) .....	80
Figura 4.38.	Comparação entre a corrente “injetada” na torre pela descarga (I0) e a corrente “descontaminada” (Idesc) obtida a partir da corrente “contaminada” (Icont) indicada na Figura 4.37 ( $h_t = 62,5$ m, $h_s = 0$ m, $Z_{ch} = 1$ k $\Omega$ , $Z_t = 275$ $\Omega$ e $R_g = 5$ $\Omega$ ) .....	80
Figura 4.39.	Ilustração para as estruturas de diferentes alturas utilizadas para realizar a “descontaminação” da corrente, conhecendo-se a corrente “contaminada” na base da estrutura (ponto “1”, $h_s = 0$ m) .....	82
Figura 4.40.	Corrente “contaminada” e correntes “descontaminadas” em função de diferentes alturas: 62,5 m, 125 m e 250 m ( $h_s = 0$ m, $Z_{ch} = 1$ k $\Omega$ , $Z_t = 275$ $\Omega$ e $R_g = 5$ $\Omega$ ) .....	82
Figura 4.41.	Corrente “contaminada”, corrente “pura” e correntes “descontaminadas” (para objetos de diferentes alturas $h_t$ ) ( $h_s = 0$ m, $Z_{ch} = 1$ k $\Omega$ , $Z_t = 275$ $\Omega$ e $R_g = 5$ $\Omega$ ). A corrente “pura” se refere ao caso base ( $h_t = 62,5$ m) .....	83
Figura 4.42.	Ilustração do procedimento adotado para avaliação das correntes “descontaminadas”: a) situação em que as correntes $I_1$ , $I_2$ e $I_3$ , são obtidas para as posições $h_{s1}$ , $h_{s2}$ e $h_{s3}$ , respectivamente; b) situação considerada para o cálculo das correntes “descontaminadas” $I_{d1}$ , $I_{d2}$ e $I_{d3}$ com o programa DESCONTAMINA .....	85
Figura 4.43.	Corrente “pura”, correntes “contaminadas” para diferentes valores de $h_s^{cont}$ de 0 m e 30 m ( $h_t = 62,5$ m, $Z_{ch} = 1$ k $\Omega$ , $Z_t = 275$ $\Omega$ e $R_g = 5$ $\Omega$ ). A corrente “pura” se refere ao caso base ( $h_s = 0$ m) .....	85
Figura 4.44.	Correntes “descontaminadas” ( $h_t = 62,5$ m, $Z_{ch} = 1$ k $\Omega$ , $Z_t = 275$ $\Omega$ e $R_g = 5$ $\Omega$ ) .....	86
Figura 4.45.	Corrente “contaminada”, corrente “pura” e corrente “descontaminada” para $h_s = 0$ m ( $h_t = 62,5$ m, $Z_{ch} = 1$ k $\Omega$ , $Z_t = 275$ $\Omega$ e $R_g = 5$ $\Omega$ ). A corrente “pura” se refere ao caso base .....	87
Figura 4.46.	Corrente “pura” e correntes “contaminadas” para valores de de 0 m, 25 m e 125 m ( $h_t = 250$ m, $Z_{ch} = 1$ k $\Omega$ , $Z_t = 275$ $\Omega$ e $R_g = 5$ $\Omega$ ). A corrente “pura” se refere ao caso base ( $h_s = 0$ m) .....	87
Figura 4.47.	Correntes “descontaminadas” para o caso base. ( $h_t = 250$ m, $Z_{ch} = 1$ k $\Omega$ , $Z_t = 275$ $\Omega$ e $R_g = 5$ $\Omega$ ) .....	88
Figura 4.48.	Corrente “contaminada”, corrente “pura” e corrente “descontaminada” para $h_s = 0$ m ( $h_t = 250$ m, $Z_{ch} = 1$ k $\Omega$ , $Z_t = 275$ $\Omega$ e $R_g = 5$ $\Omega$ ). A corrente “pura” se refere ao caso base ( $h_s = 0$ m) .....	89
Figura 4.49.	Corrente “contaminada”, corrente “pura” e “descontaminada” para $h_s = 125$ m ( $h_t = 250$ m, $Z_{ch} = 1$ k $\Omega$ , $Z_t = 275$ $\Omega$ e $R_g = 5$ $\Omega$ ). A corrente “pura” se refere ao caso base ( $h_s = 0$ m) .....	89

Figura 4.50.	Corrente “contaminada”, corrente “pura” e correntes “descontaminadas” ( $h_t = 62,5$ m, $h_s = 0$ m, $Z_t = 275 \Omega$ e $R_g = 5 \Omega$ ). A corrente “pura” se refere ao caso base ( $Z_{ch} = 1$ k $\Omega$ ) .....	90
Figura 4.51.	Corrente “contaminada”, corrente “pura” e correntes “descontaminadas” para impedância do objeto de 138 $\Omega$ , 275 $\Omega$ e 550 $\Omega$ ( $h_t = 62,5$ m, $h_s = 0$ m, $Z_{ch} = 1000 \Omega$ e $R_g = 5 \Omega$ ). A corrente “pura” se refere ao caso base ( $Z_t = 275 \Omega$ ) .....	91
Figura 4.52.	Corrente “contaminada”, corrente “pura” e correntes “descontaminadas” para resistência de terra de 5 $\Omega$ , 50 $\Omega$ e 500 $\Omega$ . ( $h_t = 62,5$ m, $h_s = 0$ m, $Z_{ch} = 1000 \Omega$ e $Z_t = 275 \Omega$ ). A corrente “pura” se refere ao caso base ( $R_g = 5 \Omega$ ) .....	93
Figura 5.1.	Visão geral do sistema desenvolvido no IEE/USP (CARVALHO et al, 2005). PR’s: pára-raios; $Z_c$ : impedância característica dos condutores; 1, 2, 3, 4: pontos de medição de tensões induzidas .....	96
Figura 5.2.	Mastro para captação de descargas .....	97
Figura 5.3.	Detalhe da base da torre, com o resistor “shunt” para medição de correntes .....	98
Figura 5.4.	Estação de medição .....	98
Figura 5.5.	Pontos de medição 1 e 2 de tensões induzidas na linha experimental .....	99
Figura 5.6.	Trecho da linha experimental .....	99
Figura 5.7.	Oscilograma da tensão obtida na torre IEE/USP, estando ela totalmente isolada .....	101
Figura 5.8.	Relação $dI/dt$ medida na “CN Tower” (adaptada de Motoyama et al, 1996) .....	102
Figura 5.9.	Esquema do circuito utilizado para determinação da impedância de surto da torre IEE/USP .....	102
Figura 5.10.	Exemplo de oscilograma obtido através do circuito indicado na Figura 5.9 .....	103
Figura 5.11.	Corrente medida na torre IEE/USP em 06/04/2004 às 17:00:32 .....	105
Figura 5.12.	Corrente após a aplicação de “FFT smoothing” .....	105
Figura 5.13.	Correntes medida e suavizada superpostas .....	106
Figura 5.14.	Correntes “contaminada” (sem aplicação de “FFT smoothing”) e “descontaminada” ( $h_t = 62,5$ m, $h_s = 0$ m, $Z_t = 275 \Omega$ , $Z_{ch} = 1$ k $\Omega$ e $R_g = 5 \Omega$ ) .....	107
Figura 5.15.	Correntes “contaminada” e “descontaminada” com aplicação de “FFT smoothing” ( $h_t = 62,5$ m, $h_s = 0$ m, $Z_t = 275 \Omega$ , $Z_{ch} = 1$ k $\Omega$ e $R_g = 5 \Omega$ ) ....	108
Figura 5.16.	Correntes “descontaminadas” sem e com aplicação de “FFT smoothing” .	109
Figura 5.17.	Correntes “descontaminadas” com aplicação de “FFT smoothing” (Idescont-smooth-8us) e suavizada após o processo de “descontaminação” (Idescont-smooth-8us cont) .....	109

Figura 5.18.	Correntes “puras” sem e com aplicação de “FFT smoothing” .....	110
Figura 5.19.	Correntes “puras” e corrente “contaminada” .....	110
Figura 5.20.	Correntes “contaminadas” para $h_s$ de 0 m e 62,5 m. ( $h_t = 62,5$ m, $Z_{ch} = 1$ k $\Omega$ , $Z_t = 275$ $\Omega$ e $R_g = 5$ $\Omega$ ) .....	111
Figura 5.21.	Correntes para modelo TL para três diferentes posições ( $v = 0,15 \times c$ ): a) sem aplicação de “FFT smoothing”; b) com aplicação de “FFT smoothing” .....	112
Figura 5.22.	Correntes para modelo MTLL em três posições ( $v = 0,15 \times c$ ) .....	113
Figura 5.23.	Corrente para modelo MTLE para três diferentes posições ( $v = 0,15 \times c$ ) ...	114
Figura 5.24.	Comparação entre as correntes para os modelos TL, MTLL e MTLE para três diferentes posições ( $v = 0,15 \times c$ ): a) topo da torre b) $z' = 3$ km c) $z' = 6$ km .....	115
Figura 5.25.	Correntes para o modelo TL para três diferentes posições ( $v = 0,30 \times c$ ): a) sem aplicação de “FFT smoothing”; b) com aplicação de “FFT smoothing” .....	116
Figura 5.26.	Corrente para o modelo MTLL para três diferentes posições ( $v = 0,30 \times c$ )	117
Figura 5.27.	Corrente para o modelo MTLE em três diferentes posições ( $v = 0,30 \times c$ ) ..	117
Figura 5.28.	Correntes no topo da torre e à altura de 6 km para os modelos TL, MTLL e MTLE .....	118

## LISTA DE TABELAS

Tabela	1	- Descrição das características dos fenômenos de QEE (adaptada de IEEE Std 1159 (1995)) .....	3
Tabela	2.1	- Características dos equipamentos de medição utilizados na CN Tower (adaptada de (MOTOYAMA et al, 1996)) .....	21
Tabela	2.2	- Resumo das características das descargas coletadas na torre (adaptada de Geldenhuys et al (1988)) .....	22
Tabela	2.3	- Principais estudos realizados em objetos elevados (adaptada de (RAKOV, 2003)) .....	25
Tabela	2.4	- Parâmetros: descarga atmosférica (adaptada de Berger et al (1975)) .	26
Tabela	2.5	- Parâmetros: descarga de retorno (adaptada de Berger et al (1975)) ...	26
Tabela	2.6	- Parâmetros das correntes de descargas CIGRE (adaptada de IEEE Std 1410 (1997)) .....	29
Tabela	2.7	- Parâmetros para os modelos de “engenharia” (adaptada de Rakov (1998)) .....	32
Tabela	2.8	- Modelos tipo linha de transmissão para $t \geq \frac{z'}{v}$ (adaptada de Rakov (2003)) .....	33
Tabela	2.9	- Modelos tipo fonte de corrente viajante para $t \geq \frac{z'}{v}$ (adaptada de Rakov (2003)) .....	34
Tabela	2.10	- Expressões de $\frac{dI_s(z^*,t)}{dz^*}$ no canal (adaptada de Rakov (2003)) .....	37
Tabela	4.1	- Parâmetros da Função de Heidler para representação de uma corrente típica de descarga subsequente .....	50
Tabela	4.2	- Parâmetros da Função de Heidler para representação de uma corrente típica da primeira descarga (utilizada nas simulações apresentadas neste Capítulo) .....	51
Tabela	5	- Valores de pico das correntes apresentadas na Figura 5.25 conforme o modelo adotado para representação da descarga de retorno ( $v = 0,15 \times c$ ) .....	114



# SUMÁRIO

<b>RESUMO .....</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>v</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>vi</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>xii</b>
<b>SUMÁRIO .....</b>	<b>xiii</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. OBJETIVO .....	10
1.2. MOTIVAÇÃO DO ESTUDO .....	10
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO .....	13
<b>2 ESTADO DA ARTE .....</b>	<b>14</b>
2.1. LEVANTAMENTO HISTÓRICO DAS PESQUISAS SOBRE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS .....	16
2.2. PARÂMETROS DAS DESCARGAS PARA APLICAÇÕES EM ENGENHARIA .....	26
2.3. CONCEITUAÇÃO DOS MODELOS DE DESCARGAS DE RETORNO .....	30
<b>3 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA “CONTAMINAÇÃO” E “DESCONTAMINAÇÃO” DA CORRENTE INCIDENTE EM OBJETOS ELEVADOS .....</b>	<b>39</b>
3.1. EXTENSÃO DOS MODELOS DAS DESCARGAS DE RETORNO NA PRESENÇA DE OBJETOS ELEVADOS .....	40
3.2. DISCUSSÃO DOS MÉTODOS DE GUERRIERI ET AL E DE RACHIDI ET AL .....	46
<b>4 CORRENTES “CONTAMINADAS” E “DESCONTAMINADAS” – ESTUDO DE SENSIBILIDADE .....</b>	<b>49</b>
4.1. AVALIAÇÃO DA “CONTAMINAÇÃO” DA CORRENTE .....	56
4.1.1. <i>Influência da altura do objeto <math>h_t</math></i> .....	57
4.1.2. <i>Influência da posição do ponto de medição <math>h_s</math></i> .....	58
4.1.3. <i>Influência da impedância do canal <math>Z_{ch}</math></i> .....	61
4.1.4. <i>Influência da impedância do objeto elevado <math>Z_t</math></i> .....	64
4.1.5. <i>Influência da resistência de terra <math>R_g</math></i> .....	66
4.1.6. <i>Influência do tempo de frente da corrente equivalente <math>T_{d30/90}</math></i> .....	73
4.2. AVALIAÇÃO DA CORRENTE “DESCONTAMINADA” .....	78

4.2.1.	<i>Influência da altura do objeto <math>h_t</math></i> .....	81
4.2.2.	<i>Influência da posição do ponto de medição <math>h_s</math></i> .....	84
4.2.3.	<i>Influência da impedância do canal <math>Z_{ch}</math></i> .....	90
4.2.4.	<i>Influência da impedância do objeto elevado <math>Z_t</math></i> .....	91
4.2.5.	<i>Influência da resistência de terra <math>R_g</math></i> .....	92
<b>5</b>	<b>APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE “CONTAMINAÇÃO” E “DESCONTAMINAÇÃO” DA CORRENTE NO SISTEMA IEE/USP</b> .....	<b>94</b>
5.1.	DESCRIÇÃO DO SISTEMA IEE/USP .....	94
5.2.	DETERMINAÇÃO DA IMPEDÂNCIA DA TORRE .....	100
5.3.	ANÁLISE DE CASO .....	104
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>120</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>123</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o termo qualidade de energia elétrica (QEE) tem sido muito enfatizado por diversos motivos, dentre os quais os fenômenos físicos decorrentes do uso cada vez maior de equipamentos sensíveis às variações de tensão, corrente e frequência, como os controladores lógicos programáveis (CLPs) e microcomputadores. Tais fenômenos se devem ora ao uso cada vez maior de equipamentos eletrônicos ligados às redes elétricas como lâmpadas fluorescentes, além dos equipamentos industriais de grande porte como as máquinas rotativas, fornos a arco e ora às descargas atmosféricas. Esses e muitos outros fenômenos existentes nas redes elétricas são chamados de “poluição elétrica”.

A “poluição elétrica”, sob o ponto de vista qualitativo, custa aos Estados Unidos da América algo em torno de US\$ 26 bilhões por ano, incluindo o custo da parcela preventiva (ELETROBRÁS, 2001).

A Tabela 1 resume os diversos tipos de “poluição elétrica” que podem ser encontradas nas redes elétricas. As categorias se referem aos distúrbios ocasionados por tensões (em sua maioria) ou correntes e classificados segundo o conteúdo espectral, duração típica e amplitude típica da tensão.

A classificação indicada na Tabela 1 é utilizada pela comunidade de qualidade de energia elétrica e, além disso, há outras classificações dadas por diversas entidades (IEC, IEEE, ANSI, NEMA, CENELEC, outros)<sup>1</sup>. Ressalta-se que essas entidades têm somado esforços para uniformizar as nomenclaturas para cada tipo de fenômeno físico passível de ocorrer em redes elétricas.

Como referências de pesquisas para QEE, o que existe hoje são algumas normas, práticas recomendadas ou recomendações e guias (IEEE Std. 1159, 1995; IEEE Std. P1564, 2001; IEEE Std. 1346, 1998; IEEE Std. 493, 1980; IEEE Std. 1250, 1995; IEC 61000 Series, 2002; NRS-048-1, 1996; NRS-048-2, 1996; NRS-048-3, 1997; NRS-048-4, 1996).

---

<sup>1</sup> IEC: International Electrotechnical Commission; IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers; ANSI: American National Standards Institute; NEMA: National Electrical Manufacturers Association; CENELEC: European Committee for Electrotechnical Standardization.

Uma das curvas frequentemente utilizadas para verificação da QEE é a chamada “curva CBEMA<sup>2</sup>”. A essência dessa curva foi incorporada ao IEEE Std. 446/1995<sup>3</sup> e essa padronização geralmente é utilizada para análise do resultado do monitoramento da QEE. Inicialmente, ela foi elaborada para verificação dos limites de funcionamento de computadores. A Figura 1.1 apresenta a “curva CBEMA”:

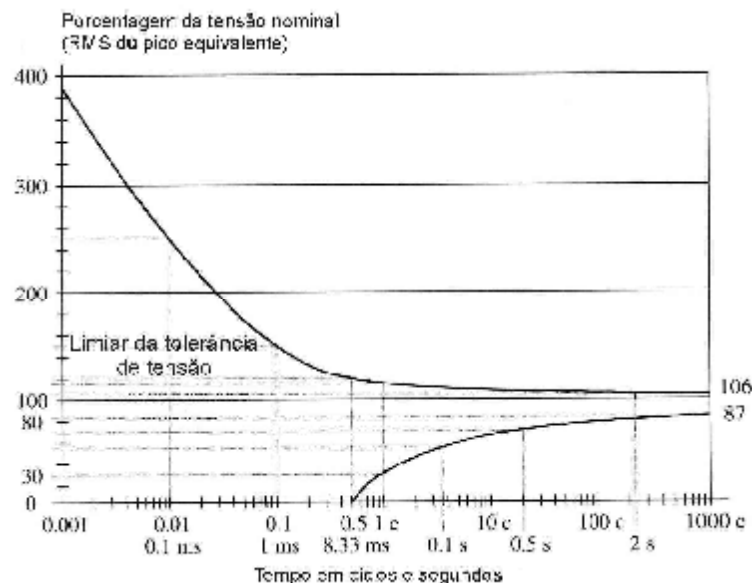


Figura 1.1. Curva CBEMA (adaptada de IEEE Std 446 (1995)).

Da curva CBEMA foi obtida a curva ITI (“Information Technology Industry Council”), sendo que ambas são semelhantes em termos de limites de tolerâncias de tensão e duração. A vantagem é que essa nova curva, que é dividida em partes discretas, facilita o usuário na digitação de dados se comparado com a curva CBEMA. A Figura 1.2 apresenta a curva ITI.

<sup>2</sup> CBEMA advém dos iniciais de “Computer Business Manufacturers Association”.

<sup>3</sup> IEEE Std. 446/1995 – IEEE Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications.

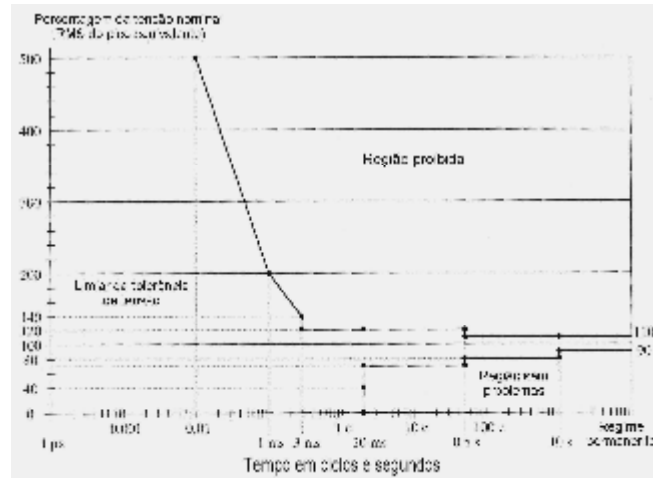


Figura 1.2. Curva ITI (adaptada de ONS (2001)).

Tabela 1 – Descrição das características dos fenômenos de QEE (adaptada de IEEE Std 1159 (1995)).

	<b>Categoria</b>	<b>Conteúdo Espectral Típico</b>	<b>Duração Típica</b>	<b>Amplitude de Tensão Típica</b>
<b>1</b>	<b>Transientes</b>			
1.1	Impulsivo			
1.1.1	Nanosegundo	5 ns subida	< 50 ns	
1.1.2	Microsegundo	1 μs subida	50 ns-1ms	
1.1.3	Milisegundo	0,1 ms subida	>1 ms	
1.2	Oscilatório			
1.2.1	Baixa frequência	<5 kHz	0,3-50 ms	0-4 pu
1.2.2	Média frequência	5-500 kHz	20 μs	0-8 pu
1.2.3	Alta frequência	0,5-5 MHz	5 μs	0-4 pu
<b>2</b>	<b>Variação de curta-duração</b>			
2.1	Instantânea			
2.1.1	Interrupção		0,5-30 ciclos	<0,1 pu
2.1.2	Afundamento ou “Sag” (“dip”)		0,5-30 ciclos	0,1-0,9 pu
2.1.3	Elevação ou “Swell”		0,5-30 ciclos	1,1-1,8 pu
2.2	Momentânea			
2.2.1	Interrupção		30 ciclos-3 s	<0,1 pu
2.2.2	Afundamento ou “Sag” (“dip”)		30 ciclos-3 s	0,1-0,9 pu
2.2.3	Elevação ou “Swell”		30 ciclos-3 s	1,1-1,4 pu
2.3	Temporário			
2.3.1	Interrupção		3 s-1 minuto	<0,1 pu
2.3.2	Afundamento ou “Sag” (“dip”)		3 s-1 minuto	0,1-0,9 pu
2.3.3	Elevação ou “Swell”		3 s-1 minuto	1,1-1,2 pu
<b>3</b>	<b>Variações de longa duração</b>			
3.1	Interrupção sustentada		> 1 minuto	zero
3.2	Subtensões		> 1 minuto	0,8-0,9 pu
3.3	Sobretensões		> 1 minuto	1,1-1,2 pu
<b>4</b>	<b>Desbalanceamento de tensão</b>		<b>Regime permanente</b>	<b>0,5-2 %</b>
<b>5</b>	<b>Distorção nas ondas</b>			
5.1	“Dc offset”		Regime permanente	0-0,1 %
5.2	Harmônicos	0-100 <sup>a</sup> harmônica	Regime permanente	0-20 %
5.3	Inter-harmônicos	0-6 kHz	Regime permanente	0-2 %
5.4	Recortes de tensão		Regime permanente	
5.5	Ruídos	Banda larga	Regime permanente	0-1 %
<b>6</b>	<b>Flutuações de tensão</b>	<b>&lt;25 Hz</b>	<b>Intermitente</b>	<b>0,1-7 %</b>
<b>7</b>	<b>Variações de frequência</b>		<b>&lt; 10 s</b>	

São apresentadas a seguir as principais definições e conceitos relativos às diferentes formas de distúrbios encontradas nos sistemas elétricos. A priori, esses fenômenos podem ser classificados em termos de qualidade de produto e qualidade de fornecimento. Os fenômenos classificados como qualidade de produto são caracterizados pelos parâmetros de tensão ou corrente, frequência, forma de onda e desequilíbrio em sistemas trifásicos; já os fenômenos de qualidade de fornecimento são caracterizados pela magnitude, frequência e intervalo de duração.

**Fenômenos transitórios:** são caracterizados pelos fenômenos de curta duração (variações súbitas), que dependem da energia armazenada inicialmente e que ao longo do tempo tendem a desaparecer, com o circuito retornando às condições de regime. Podem ser classificados conforme as seguintes categorias: transientes impulsivos (“impulsive transients”), transientes oscilatórios (“oscillatory transients”) e recortes na tensão (“notching”).

- *Transientes impulsivos:* provocam uma rápida mudança de estado da tensão, da corrente ou de ambos, de forma unidirecional em relação à polaridade (positiva ou negativa). Podem ser verificados por meio de análises espectrais, sendo caracterizado pelos parâmetros de tempo de frente, tempo de cauda e pelo valor de pico. As causas mais comuns desses fenômenos são relacionadas às descargas atmosféricas.

Devido à característica de alta frequência, a frente de onda de um transiente impulsivo pode apresentar diferentes comportamentos em diferentes pontos de uma rede elétrica; entretanto, as frentes de ondas geralmente não atingem locais tão longínquos. A excitação provocada pelos transientes impulsivos na frequência natural da rede pode provocar transiente oscilatório.

- *Transientes oscilatórios:* são caracterizados pela mudança repentina de um estado da tensão, corrente ou ambos com rápida variação em ambas polaridades (negativa e positiva). Podem ser verificadas pela análise espectral da duração e magnitude, sendo classificados em faixas de frequência: baixa, média e alta.

A energização de capacitor “back-to-back”<sup>4</sup> ou fechamento das chaves ocasionam transientes oscilatórios de tensão de média frequência. Além disso, transientes oscilatórios são típicos em sistemas de subtransmissão e de distribuição, sendo mais frequentes nos

---

<sup>4</sup> Esse fenômeno ocorre quando já existem (n-1) bancos de capacitores energizados e é energizado o n-ésimo banco de capacitor (ZANNETA Jr., 2003).

casos de energização de bancos de capacitores e de ferorrressonância durante a energização de transformadores.

- *Recortes de tensão*: são caracterizados por discontinuidades na forma da onda, sendo geralmente causados por curto-circuitos fase-fase durante a comutação da corrente nos conversores estáticos, sendo seguidos posteriormente por transientes oscilatórios.

Pelo fato de serem periódicos, também são analisados como um caso de distorção harmônica.

**Variações de tensão de curta duração**: conhecidas como variações momentâneas de tensão (VMT), são caracterizadas pelo valor eficaz da tensão entre dois níveis consecutivos, tendo duração incerta e menor que 1 minuto. Geralmente são causadas por curto-circuitos em sistemas elétricos e por manobras de equipamentos que demandem altas correntes para energização.

- *Interrupções momentâneas de tensão*: ocorrem quando a tensão se encontra em valores menores que 10% em relação ao valor nominal, tendo duração entre 0,5 ciclo até 1 minuto. Normalmente são ocasionadas por faltas em sistemas elétricos ou em equipamentos. Em termos de duração, as interrupções momentâneas de tensão podem ser classificadas em:
  - curtíssima duração: entre 0,5 ciclo e 30 ciclos;
  - curta duração: duração entre 30 ciclos e 3 segundos;
  - temporária: duração entre 3 segundos e 1 minuto.
- *“Sags” (afundamentos ou depressões)*: “sag” ou “dip” é o termo dado à diminuição da tensão ou corrente de uma ou mais fases (entre 0,1 e 0,9 pu do valor eficaz), com duração entre 0,5 ciclo até 1 minuto.

Normalmente os “sags” são causados por faltas em sistemas elétricos, energização de cargas pesadas, acionamento de motores, entre outros. Tais eventos fornecem parâmetros úteis para a proteção dos equipamentos, podendo ser subdivididos em três categorias: instantânea, momentânea e temporária.

- *“Swells” (elevações)*: “swell” ou “momentary overvoltage” é o termo dado à elevação da tensão ou corrente de uma ou mais fases (entre 1,1 e 1,9 pu do valor eficaz) com duração entre 0,5 ciclo até 1 minuto. Esse fenômeno não ocorre com tanta frequência como os “sags”.

Geralmente a fonte causadora de “swells” está ligada à retirada de grandes cargas do sistema, à energização de grandes bancos de capacitores, entre outras.

A severidade da tensão “swell” durante uma condição de falta é função do local de falta, da impedância do sistema e do sistema de aterramento.

**Variações de tensão de longa duração:** segundo a ANSI C84.1 (1982), variações de tensão de longa duração possuem duração superior a 1 minuto. Tais fenômenos não resultam de faltas nos sistemas elétricos, mas sim das operações de grandes cargas. São classificados em sobretensões sustentadas, subtensões e interrupções sustentadas.

- *Sobretensões sustentadas:* nomenclatura dada para tensões com valores superiores a 110% do valor eficaz nominal, com duração maior que 1 minuto, causados pelas retiradas de grandes cargas, energização de bancos de capacitores e mudanças incorretas dos “taps” dos transformadores.
- *Subtensões sustentadas:* nomenclatura utilizada para tensões com valores entre 10% a 90% do valor eficaz nominal, com duração maior que 1 minuto. São caracterizados pelo processo inverso das sobretensões. A sobrecarga é uma fonte causadora desse fenômeno.
- *Interrupções sustentadas:* nomenclatura utilizada para valores de tensão inferiores a 10% do valor nominal, para tempos de duração maiores que 1 minuto. As ocorrências de interrupções sustentadas necessitam de intervenções humanas para a restauração do sistema. Geralmente tal fenômeno é conhecido como “outage”<sup>5</sup>.

**Desequilíbrio de tensão:** o conceito mais aceito atualmente define que desequilíbrio de tensão é a razão entre os componentes de seqüências negativa e positiva da tensão de um sistema elétrico trifásico. A norma IEEE Std 1159 (1995) conceitua como a relação entre os componentes de seqüência zero e positiva. O desequilíbrio também pode ser definido como o máximo desvio da tensão eficaz trifásica dividido pelo valor da tensão eficaz, sendo nesse caso expresso em porcentagem.

Uma das possíveis causas do desequilíbrio de tensão é a queima de fusível de uma das fases de um banco trifásico de capacitores.

**Flutuação de tensão:** consiste em um fenômeno eletromagnético caracterizado por variações sistemáticas das tensões de forma intermitente ou randômica, sendo por vezes chamado

---

<sup>5</sup> Termo utilizado na recomendação ANSI/IEEE Std 1008/1987 – IEEE Standard for Software Unit Testing.



erroneamente de cintilação (“flicker”). Segundo a norma ANSI C84.1/1982<sup>6</sup>, o valor deve estar dentro dos limites 0,9 e 1,1 pu. Uma outra definição é dada pela norma IEC 61000-3-3 (2002). Exemplos típicos de fontes geradoras de flutuações de tensão são as cargas variáveis no tempo, como fornos a arco.

**Distorção harmônica:** é utilizada tanto para tensões como para correntes a fim de quantificar a distorção existente em determinada onda em relação à sua frequência fundamental ou primeira harmônica. Basicamente tais distorções são classificadas em: “dc offset”, harmônicas, inter-harmônicas, recortes de ondas (“notching”) e ruídos.

- “*Dc offset*”: a presença de tensões ou correntes contínuas é chamado de “dc offset” e ocorre devido aos distúrbios geomagnéticos e efeitos das retificações de meia-onda de componentes estáticos. Correntes contínuas em transformadores de correntes alternadas causam perda prematura da vida devido ao aquecimento, e eletrodos aterrados podem sofrer corrosão nos pontos de conexão.
- *Harmônicas*: são sinais distorcidos devido à presença dos múltiplos de valores da tensão ou corrente da frequência fundamental. A crescente existência desses tipos de ruído nas redes se deve ao aumento da conexão de cargas não lineares nas mesmas.

A quantificação do nível de distorção é feita pela taxa de distorção harmônica (TDH). As principais fontes geradoras de harmônicas são: núcleos de transformadores saturados, correntes de “inrush” dos transformadores, fornos elétricos a arco, pontes retificadoras trifásicas, compensadores estáticos, reatores eletrônicos e eletromagnéticos, controladores de velocidade de motores, equipamentos eletrônicos, dentre outros.

- *Inter-harmônicas*: tensões ou correntes com frequência de ordem não inteira são denominadas inter-harmônicos e podem ser visualizados quando tal sinal distorcido é discretizado em espectros de amplitudes e frequências. Podem ser encontradas em redes elétricas e geralmente as fontes desses ruídos são conversores estáticos, motores de indução, fornos a arco e cicloconversores. Os efeitos desses tipos de ruídos ainda não são bem conhecidos.
- *Ruídos*: são definidos como sinais elétricos de origem desconhecida com frequências menores que 200 kHz e somados aos sinais de tensão ou corrente. São encontrados nas fases e nos neutros dos condutores.

---

<sup>6</sup> ANSI C84.1-1995: American National Standard for Electrical Power Systems and Equipment - Voltage Ratings (60 Hz).

As fontes geradoras de ruídos são: equipamentos eletrônicos, circuitos de controle, equipamentos a arco, retificadores em estado sólido e circuitos de manobra. Esse problema evidencia-se em filtros e transformadores.

**Variações momentâneas de frequência:** são pequenos desvios de frequência que ocorrem entre o ponto de geração e o da carga solicitada e estão diretamente relacionadas com a velocidade de rotação dos geradores. O tempo e a magnitude desse fenômeno dependem essencialmente do desequilíbrio ocorrido, da característica dinâmica da carga e do tempo de resposta do sistema de geração às variações para a potência solicitada.

**Indicadores de qualidade de energia elétrica no Brasil:** alguns indicadores de qualidade de energia elétrica foram revistos e atualizados da Portaria N° 046 de 17 de abril de 1978 do Departamento Nacional de Águas e Energia (DNAEE) para a Resolução N° 24 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), de 27 de Janeiro de 2000. Abaixo estão definidos alguns desses indicadores mais relevantes<sup>7</sup>:

- *Duração equivalente de interrupção por unidade consumidora (DEC):* intervalo de tempo que, em média, no período de observação, em cada unidade consumidora do conjunto considerado ocorreu descontinuidade da distribuição de energia elétrica.
- *Frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora (FEC):* número de interrupções ocorridas, em média, no período de observação, em cada unidade consumidora do conjunto considerado.
- *Duração de interrupção individual por unidade consumidora (DIC):* intervalo de tempo que, no período de observação, em cada unidade consumidora ocorreu descontinuidade da distribuição de energia elétrica.
- *Frequência de interrupção individual por unidade consumidora (FIC):* número de interrupções ocorridas, no período de observação, em cada unidade consumidora.
- *Duração máxima de interrupção contínua por unidade consumidora (DMIC):* tempo máximo de interrupção contínua da distribuição de energia elétrica para uma unidade consumidora qualquer.

Esses conceitos estão sendo aplicados às concessionárias brasileiras a fim de garantir limites desses indicadores de qualidade para fornecimento de energia elétrica para as distribuidoras.

---

<sup>7</sup> Trecho retirado da Resolução ANEEL N° 24, de 27 de Janeiro de 2000.

No caso do não cumprimento desses limites de qualidade estabelecidas pela ANEEL, a concessionária em questão pode ser multada.

Com relação aos indicadores citados anteriormente, uma parcela das interrupções se deve às descargas atmosféricas. Em relação a isso, nota-se que:

- em geral admite-se que, em média, cerca de 70% dos desligamentos na transmissão e 35% na distribuição no Brasil são causados por descargas atmosféricas;
- no verão de 1996, verificou-se que cerca de 300 transformadores foram danificados na região do Vale do Paraíba. Na CEMIG, cerca de 70% dos desligamentos foram causados pelas descargas atmosféricas (GIN et al, 1997).

Tais situações são explicadas pelo fato do Brasil possuir uma intensa atividade de tempestades em relação à região global. Aproximadamente de 50 a 70 milhões de descargas classificadas de nuvem-solo ocorrem todos os anos (PINTO Jr.; PINTO, 2003).

As descargas atmosféricas são fenômenos físicos que causam problemas ao homem sob as mais variadas formas, seja pelas mortes, que giram em torno de 100 indivíduos anualmente nos EUA, 10 na França, 200 na África do Sul, 40 no Japão e entre 100 a 200 mortes no Brasil (PINTO Jr.; PINTO, 2000), seja pelos incêndios em florestas, distúrbios transferidos às redes elétricas, causando danos em equipamentos, etc.

As descargas influenciam diretamente a qualidade de energia elétrica, ocasionando interrupções de fornecimento de energia e variações momentâneas de tensão. No Brasil os prejuízos dessa natureza giram em torno de 500 milhões de dólares ao ano (PINTO Jr.; PINTO, 2000). Nos EUA, os prejuízos alcançam mais de 1 bilhão de dólares ao ano (SMIDT, 2003).

Na ocorrência de uma descarga próxima à rede elétrica, os intensos campos eletromagnéticos provocam a indução de tensões nos condutores. Esse fenômeno pode vir a causar descargas disruptivas nos isoladores conectados aos postes, principalmente nas linhas com tensão nominal de até 34,5 kV, e faltas temporárias na rede. O mesmo pode ocorrer no caso de descargas diretas em linhas de transmissão e sistemas de distribuição, porém com danos, severidades e solicitações mecânicas e elétricas bem maiores.

Vários aspectos são importantes para os projetos dos sistemas de proteção de linhas de transmissão e distribuição, em especial os parâmetros das descargas, àqueles relativos à descarga de retorno (“return stroke”). A corrente da descarga de retorno pode ser avaliada por

meio de dados coletados em estruturas elevadas, sendo a medição realizada diretamente por meio de um sensor (bobina de Rogowski, resistor “shunt”, outros). Entretanto, em função das reflexões sofridas pela onda de corrente na base e no topo da estrutura, a sua amplitude e a forma de onda são afetadas tanto pela presença da torre como pela posição do ponto de medição. Em determinadas situações tais efeitos podem provocar diferenças significativas entre os valores de crista de corrente na base e no topo da estrutura e ao longo do canal da descarga.

## **1.1 OBJETIVO**

Este trabalho tem como principal objetivo o desenvolvimento de ferramenta computacional para avaliação da distribuição espaço-temporal da corrente no caso de incidência de descargas atmosféricas em estruturas elevadas. A metodologia desenvolvida corresponde a uma extensão do modelo proposto por Rachidi et al (2002) e possibilita a análise da influência dos diversos parâmetros do sistema canal-estrutura-aterramento nas características das ondas de corrente. Além da análise paramétrica, o trabalho visa comparar as correntes correspondentes ao caso em que as descargas atingem diretamente o solo com aquelas referentes ao caso de incidência em estruturas elevadas.

## **1.2 MOTIVAÇÃO DO ESTUDO**

A avaliação das características da onda de corrente da descarga é de importância fundamental para projetos de coordenação e isolamento de linhas e equipamentos de transmissão e distribuição de energia. Todavia, as correntes medidas em objetos elevados possuem deformações devido às diferenças entre as impedâncias do canal da descarga, da torre e do

sistema de aterramento. Em outras palavras, a corrente medida na base ou no topo em tais objetos pode diferir substancialmente da corrente no canal da descarga. Nesse trabalho são estudados diversos aspectos, com ênfase na influência da presença de torre e do ponto de medição no comportamento da onda de corrente.

A metodologia adotada baseia-se no processo de “descontaminação” da onda de corrente por meio de um programa computacional elaborado especialmente para tal fim. O termo corrente “descontaminada” pode ser entendido como a corrente que flui pelo canal da descarga admitindo-se que os coeficientes de reflexão no topo e na base da torre são iguais a zero, ou seja, as impedâncias do canal da descarga, da torre e de terra são iguais. Em outras palavras, a corrente “descontaminada” corresponderia à corrente que fluiria ao longo do canal da descarga caso esta incidisse diretamente no solo, na ausência da torre e sem sofrer reflexão no ponto de incidência do solo. A Figura 1.3 ilustra essa situação, onde  $i_0(z',t)$  corresponde à onda de corrente que flui no canal da descarga com velocidade  $v$ .

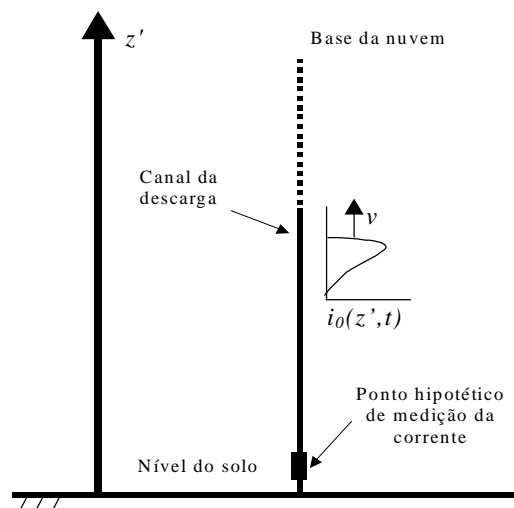


Figura 1.3. Ilustração de uma descarga que incide diretamente no solo.

Guerrieri et al (1998) e Bermudez et al (2003) tratam a corrente “descontaminada” como a corrente medida no caso em que os coeficientes de reflexão no topo e na base da torre são iguais a zero. Esses estudos mostram a importância da realização do processo de “descontaminação” da corrente para medições efetuadas em estruturas altas.

É importante destacar que a curva de distribuição de frequência cumulativa de amplitude de correntes das descargas de retorno, ilustrada na Figura 1.4, utilizada atualmente para avaliação

de desempenho de linhas de transmissão e distribuição frente às descargas atmosféricas, pode não ser tão representativa, uma vez que os dados foram coletados através de medições em objetos elevados (ANDERSON; ERIKSSON, 1980) sem que fosse levada em conta as reflexões no topo e na base de tais objetos.

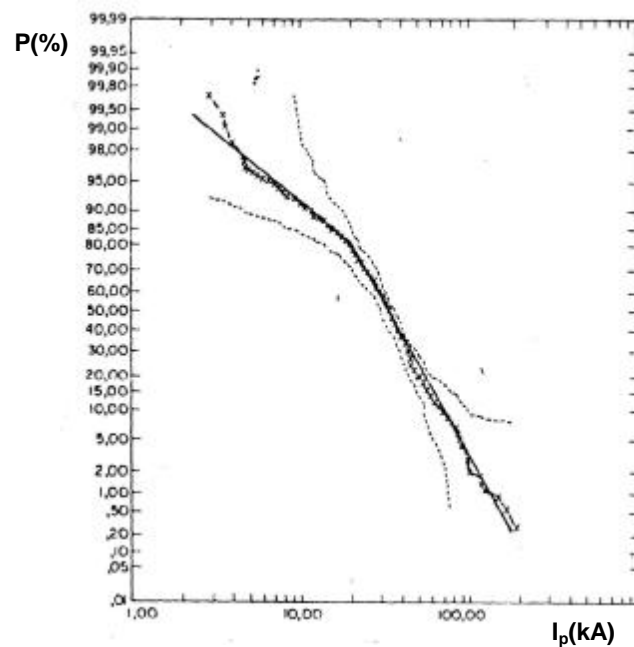


Figura 1.4. Curva de distribuição de frequência cumulativa de amplitudes de correntes das descargas de retorno (adaptada de (ANDERSON; ERIKSSON, 1980)).

Na Figura 1.4,  $P(\%)$  significa probabilidade de ocorrer uma descarga de retorno com corrente de pico ( $I_p$  em kA) superior ao valor indicado na abcissa.

Visto que os dados utilizados para obtenção da curva da Figura 1.4 foram adquiridos de medições realizadas em objetos elevados, verifica-se que esses dados se encontram “contaminados”. Assim realizando-se a “descontaminação” dos dados, utilizando as ferramentas do presente trabalho, é possível o aprimoramento da curva da Figura 1.4 para uma melhor compreensão do comportamento da descarga de retorno.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está organizado em seis capítulos, sendo que o primeiro apresenta uma introdução ao conceito de Qualidade de Energia Elétrica para os diferentes fenômenos físicos que ocorrem nas redes elétricas, suas terminologias mais comuns e as suas características. Apresenta-se também o objetivo e a motivação do trabalho, bem como a sua estrutura organizacional.

O Capítulo 2 contém um levantamento histórico dos estudos de descargas atmosféricas, seguida pelo estudo de parâmetros das descargas para aplicações em engenharia, finalizando com a conceituação dos principais modelos de representação das descargas de retorno.

O Capítulo 3 inicia-se com a apresentação de alguns dos modelos de descargas de retorno considerando a ocorrência de descargas em objetos elevados, seguida por uma discussão entre as metodologias desenvolvidas por Guerrieri et al (1998) e Rachidi et al (2002).

O Capítulo 4 contém um amplo estudo da influência da presença da torre no comportamento da corrente, considerando os efeitos dos parâmetros mais importantes. Essa forma de análise foi realizada para avaliar tanto a corrente dita “contaminada” como a corrente “descontaminada”. Para a realização das simulações foram utilizados os programas computacionais desenvolvidos no trabalho.

O Capítulo 5 descreve inicialmente o sistema desenvolvido no IEE/USP para estudos de tensões induzidas em linhas de distribuição, o qual conta com uma estrutura de 62,5 m de altura para captação de descargas atmosféricas. Em seguida, a metodologia desenvolvida anteriormente é aplicada para discussão e análise de uma situação real, referente à medição de uma corrente de uma descarga que incidiu na torre do IEE/USP.

Por fim, o Capítulo 6 mostra os resultados e as conclusões obtidas por este trabalho, além de algumas propostas para trabalhos que poderão ser desenvolvidos futuramente.

## 2 ESTADO DA ARTE

Uma típica nuvem de tempestade, denominada de cumulonimbus, possui formato de uma bigorna, com diâmetro médio entre 10 e 20 km (PINTO Jr.; PINTO, 2000), estando à altura de aproximadamente 8 a 12 km em relação ao nível do solo (UMAN, 1984), deslocando-se a velocidades de 40 a 50 km/h. Uma tempestade tem duração média de 30 e 90 minutos (PINTO Jr.; PINTO, 2000).

Dentre os diversos tipos de descargas atmosféricas, as mais comuns são as intranuvens, representando cerca de 80 % do total (PINTO Jr.; PINTO, 2000). Porém as descargas tipo nuvem-solo são as mais importantes devido à maior extensão dos problemas que podem provocar. Cerca de 90% das descargas nuvem-solo são negativas, ou seja, a região inferior da base da nuvem é carregada negativamente, induzindo no solo cargas positivas (PINTO Jr.; PINTO, 2000).

A classificação dos tipos de descargas é feita segundo a sua origem e a polaridade das cargas transferidas da nuvem. A Figura 2.1 ilustra os diversos tipos de descargas existentes na natureza, representando as descargas: (a) nuvem-solo; (b) solo-nuvem; (c) intranuvem; (d) descargas para o ar; (e) entre nuvem; e (f) nuvem para cima.

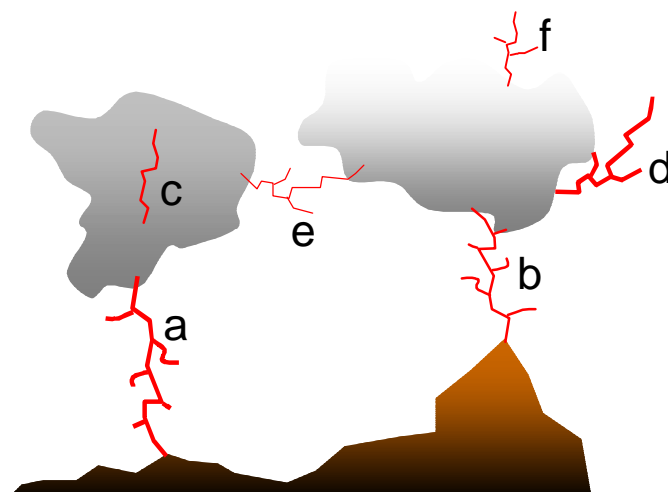


Figura 2.1. Figura ilustrativa dos diversos tipos de descargas atmosféricas existentes na natureza.



O fenômeno da descarga atmosférica é constituído por várias etapas. Para o caso da descarga tipo nuvem-solo negativa, primeiro se forma a “descarga piloto” ou “líder escalonado” (“stepped leader”) próxima à base da nuvem, na região de cargas negativas, devido à quebra da rigidez dielétrica pela diferença de potencial local (campo elétrico na faixa de 100 a 400 kV/m). Esse líder se desloca em direção ao solo em segmentos retos com espaçamento de aproximadamente 30 a 100 m em intervalos de tempo da ordem de 1  $\mu$ s. Entre os deslocamentos há uma pausa de aproximadamente 50  $\mu$ s. Durante esse processo, a velocidade de propagação da frente é da ordem de  $4,0 \times 10^5$  km/h, de baixa luminosidade, com o canal apresentando diversas ramificações (PINTO Jr.; PINTO, 2000).

Devido à influência do “líder escalonado”, para distâncias de dezenas ou até um pouco mais de uma centena de metros do mesmo em relação à superfície há a formação de um intenso campo elétrico entre a frente do “líder escalonado” e o solo, com indução e conseqüente formação de descargas positivas ascendentes a partir do solo, denominadas “descargas ascendentes” (“upward leaders”). Estima-se que a velocidade dessas descargas seja da ordem de  $4,0 \times 10^5$  km/h. A distância entre o ponto de formação dos “líderes ascendentes” e a extremidade da “descarga piloto” é chamada distância de atração e varia de acordo com a densidade de cargas do canal e a corrente prospectiva da descarga. A estimativa desse parâmetro é de grande importância para o projeto de sistemas de proteção e para a avaliação do desempenho de linhas de transmissão e distribuição frente a descargas atmosféricas.

Com o encontro entre o “líder ascendente” e a “descarga piloto”, há a formação da descarga principal, denominada descarga de retorno (“return stroke”), de intensa luminosidade, com sentido ascendente e possuindo velocidade da ordem de  $4,0 \times 10^8$  km/h, tempo de subida da ordem de 10  $\mu$ s e duração média da ordem de 100  $\mu$ s. A região visível do canal da descarga possui diâmetro médio da ordem de 1 m e a temperatura no interior do canal pode atingir até 30.000°C. A expansão abrupta local do ar devido à intensa temperatura do canal da descarga provoca o fenômeno denominado trovão, cuja máxima amplitude das ondas de som em função da frequência está na faixa de 50 Hz a 100 Hz. Entretanto apenas 1% da energia se converte em ondas sonoras audíveis aos seres humanos; a maior parte é convertida em ondas supersônicas (PINTO Jr.; PINTO, 2000). A intensidade do clarão ocasionada pela descarga principal depende da temperatura, pressão e da densidade dos elétrons do canal.

As correntes das descargas de retorno possuem valores de picos elevados, com valor médio de 31 kA (ANDERSON; ERIKSSON, 1980) e podem atingir magnitudes superiores a 200 kA. O valor médio obtido nas pesquisas realizadas pela CEMIG (Companhia Energética de Minas

Gerais) foi de 46 kA com uso de elos magnéticos e de 48 kA na Estação Morro do Cachimbo (SCHROEDER, 2001).

## 2.1. LEVANTAMENTO HISTÓRICO DAS PESQUISA SOBRE CARACTERÍSTICAS DAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Os estudos sobre as descargas atmosféricas se iniciaram no final do século XIX, com o desenvolvimento das seguintes técnicas (UMAN, 1982):

- espectrografia: por volta de 1870;
- fotografia: final do século XIX;
- medidas de radiação eletromagnética: desde 1920;
- medidas de corrente elétrica em torres instrumentadas: a partir de 1940;
- medição da corrente por meio de lançamentos de foguetes na iminência da ocorrência de uma descarga (“rocket triggered lightning”): a partir de 1960;
- medidas óticas no espaço através de satélites: a partir de 1979.

A avaliação das correntes das descargas através de medições diretas em objetos elevados e instrumentados constitui o núcleo do presente trabalho.

**Estudos preliminares** (UMAN, 1982): as primeiras medidas de correntes foram realizadas por Pockels em 1897. Ele utilizou rochas basálticas (“nephelitic basalt”) magnetizadas por indução magnética através das descargas atmosféricas. O propósito desse estudo foi estimar o valor de pico da corrente. Verificou-se que um incremento no campo magnético ocasiona um aumento proporcional no valor de pico da corrente.

No ano de 1929 começou a ser utilizada a Figura de Lichtenberg, pois o tamanho da figura impressa é, grosso modo, proporcional ao valor de pico de corrente medida em torres. Os dados iniciais foram coletados em torres de linhas de transmissão, ao todo foram verificadas 300 descargas de retorno (UMAN, 1982). Tais técnicas foram relatadas por Sporn Lloyd e

Smeloff Price em 1930 (UMAN, 1982). Eles mediram descargas de retorno que transportavam cargas negativas da nuvem para o solo, sendo que os valores das correntes encontradas eram da ordem de 100 kA (UMAN, 1982), provavelmente superestimados.

Historicamente, a Figura de Lichtenberg foi descrita pela primeira vez em 1777 por Lichtenberg (CHERINGTON; OLSON; YARNELL, 2003). No experimento ele utilizou um capacitor na qual se colocava um pó entre as placas e, na ocorrência de uma centelha, havia a impressão de uma figura devido à polarização dos eletrodos. Essas figuras foram denominadas de Figuras de Lichtenberg. Esse mesmo experimento foi realizado posteriormente, em 1888, por Trouvelot e Brown (UMAN, 1982).

Em 1924 foi introduzido o “klydonograph”, que constitui o primeiro instrumento prático utilizado para medir tensões das descargas produzidas em linhas de transmissão (UMAN, 1982).

Em 1932 começaram a ser utilizados os elos magnéticos (“magnetic links”), colocados nas torres de transmissão e expostos às descargas atmosféricas. A finalidade foi medir a carga residual devido ao efeito da magnetização gerada pela descarga. Tais experimentos foram desenvolvidos por Foust e Kuehni (UMAN, 1982). O resíduo magnético existente no elo magnético após a descarga é caracterizado pela intensidade da corrente da descarga. Verificou-se que essa avaliação não é aplicável para todas as faixas de valores das correntes de descarga, uma vez que para baixos valores de pulsos de corrente há discrepância nos resultados. Em 1940, Wagner e McCann (UMAN, 1982) começaram a utilizar três instrumentos para determinação de algumas propriedades das descargas a partir dos estudos em elos magnéticos, os quais estão descritos a seguir:

- “fulchronograph”: medição de corrente;
- “magnetic surge front recorder”: medição de tempo de subida da corrente;
- “magnetic surge integrator”: medição do tempo total da descarga.

Outras técnicas permitiram a medição das correntes, como o uso de resistores não indutivos associados aos oscilógrafos. Além disso, a estimativa das correntes também passou a ser feita por meio de medições de fluxo dos campos magnéticos a partir de antenas e oscilógrafos.

**Estudos realizados no Monte San Salvatore:** desde 1943 (BERGER et al, 1975; UMAN, 1982), o Comitê de Pesquisas de Alta-Tensão da Suíça tem realizado estudos de correntes coletadas no topo de duas torres de televisão de 55 m de altura localizados no Monte San

Salvatore, próximo a Lugano. As medições das correntes já eram feitas desde o término da construção das torres e os dados coletados eram, então, armazenados. Alguns anos depois, as informações dos campos elétricos também estavam sendo medidas e armazenadas durante a ocorrência das tempestades. Como resultado desse estudo pôde-se, por meio de computadores, determinar a descarga de retorno positiva, a primeira descarga de retorno e a descarga de retorno subsequente negativa de formas distintas.

Com o avanço das pesquisas pôde-se classificar os vários tipos de descargas: descargas ascendentes positivas e negativas e descargas descendentes positivas e negativas. Já em relação à polaridade (positiva ou negativa), a classificação é baseada nas cargas formadas na base da nuvem.

**Estudos realizados no “Empire State Building”** (UMAN, 1982): em Nova Iorque, nos EUA, está situado o “Empire State Building”, cuja altura é de 410 m em relação ao solo. Ele foi erguido no início dos anos 30. Os estudos sobre descargas nesse edifício foram realizados de forma extensiva pela General Electric Company (GE) de 1935 a 1941 e de 1947 a 1949. A média anual de descargas registrada no edifício nesse período foi de 22,6 (UMAN, 1982).

As coletas de dados foram feitas por meio de fotografias, resistência “shunt” e oscilógrafos. A técnica de estudo com fotografia consistia em obter diversas imagens com filmes em movimento. As medições das correntes por meio de um resistor “shunt” e oscilógrafo apresentavam para o valor de pico da corrente uma precisão de  $\pm 20\%$ , essa precisão também era aplicável para a taxa de crescimento, a carga, o tempo de frente e o tempo de cauda. Para as condições extremas, por exemplo, para um tempo de frente muito rápido, tal precisão era da ordem de  $\pm 50\%$  (HAGENGUTH; ANDERSON, 1952). Os estudos mais produtivos foram realizados por McEachron entre 1939 a 1941 e por Hagenguth e Anderson em 1952 (UMAN, 1982).

Em 1939 McEachron relatou evidências dos seguintes fenômenos: “líderes ascendentes” (“upward-moving stepped leaders”) e “corrente continuada” (“continuous lightning currents”), ambos observados nesse edifício. Além disso, ele relatou que os passos médios dos líderes escalonados medidos eram de 8,2 m na média, sendo que os valores encontrados estavam na faixa de 6,2 a 23 m (UMAN, 1982). Todavia, devem-se considerar os erros cometidos nessas medidas, uma vez que fotografias eram usadas para medir esses parâmetros. O tempo médio obtido para os passos dos líderes escalonados foi de 30  $\mu\text{s}$ , sendo que os limites da faixa se encontravam entre 20  $\mu\text{s}$  e 100  $\mu\text{s}$  (UMAN, 1982).

Os diversos estudos mostraram que a maioria das descargas que ocorrem no “Empire State Building” é do tipo ascendente (“upward-moving”). Geralmente nesses “líderes escalonados”, formados durante uma tempestade, não eram observadas as descargas de retorno. Em seu lugar eram observadas “continuous lightning currents” com valores da ordem de 250 A.

Verificou-se, além disso, que 50% das cargas das descargas excediam 19 C, sendo que a máxima carga estimada foi de 164 C. A duração máxima de tempo de descarga foi de 1,5 s, sendo que o seu valor médio foi de 270 ms. As classificações de 80 descargas foram determinadas, sendo 86% delas catalogadas como negativas e 14% como mistas. O máximo valor de medido foi de 58 kA, tendo polaridade positiva. A média das correntes foi de 10 kA e o limite superior do tempo de frente de onda era de 8,3  $\mu$ s (UMAN, 1982).

**Estudos realizados na torre de telecomunicações “Hoher Peissenberg”:** a torre de telecomunicações “Hoher Peissenberg” está localizada a 60 km sudoeste de Munique, Alemanha, e tem sido utilizada para estudos de medição de correntes desde 1978. Ela está a 940 m acima do nível do mar e possui altura de aproximadamente 160 m em relação ao solo. Em 1978 um sensor para medir a relação  $di/dt$  foi instalado no topo da torre; em 1992 incrementou-se com um integrador de corrente impulsiva e foi instalada no topo da torre uma câmera com capacidade para gravar descargas para tempos superiores a 1 s e, para completar, foram instaladas câmeras de alta resolução, velocidade e capacidade de armazenagem para guardar imagens das descargas. Em 1995 foram instalados outros sensores, um de  $di/dt$  e outro de corrente, a 5 m do solo, para avaliação dos transientes no solo (FUCHS et al, 1998; HEIDLER, 2002).

Nessa região, a média anual verificada entre 1992 e 1998 foi de 21 descargas, sendo que nos meses frios de novembro a abril foram observadas as maiores ocorrências, correspondendo a aproximadamente 80% do total das descargas registradas. Isso ocorria quando as temperaturas eram inferiores a 2° C, tipicamente da ordem de -1° C. A maioria das descargas foi classificada como solo-nuvem ascendente negativa, cerca de 5% foram positivas e 2% eram descargas bipolares (HEIDLER, 2002).

Outros estudos foram realizados visando o cálculo dos coeficientes de reflexão no topo e na base da torre por meio da análise das formas de onda das correntes medidas na torre. Os valores médios dos coeficientes de reflexão encontrados foram de 0,70 no topo e -0,53 na base. Além disso, foram realizadas análises estatísticas com os dados coletados ao longo dos

anos (BEIERL, 1992; FUCHS, 1998; HEIDLER, 2002) para a determinação dos parâmetros das descargas.

**Estudos realizados na Toronto “CN Tower”** (MOTOYAMA et al, 1996; RACHIDI et al, 2001): a “Canadian National Tower” ou “CN Tower” possui altura de 553 m e é uma importante torre de telecomunicações instalada no Canadá. O início da sua construção se deu em 1972, sendo finalizada em 1974. As medições de descargas nessa torre datam de 1978, sendo que os campos eletromagnéticos começaram a ser medidos a partir de 1991. Dados estatísticos indicam que em torno de 90% das descargas são ascendentes. A densidade média anual de descargas registrada foi de 2,5 descargas por km<sup>2</sup>.

As medições das correntes são feitas por meio de uma bobina de Rogowski com resposta em frequência de 40 MHz, instalada a 474 m de altura em relação ao solo. A aquisição da corrente é realizada por meio de um digitalizador Sony-Tektronix Digitizer Tipo 710A. Esse equipamento se encontra instalado a 372 m de altura a partir do nível do solo.

Os equipamentos para medição dos campos eletromagnéticos estão localizados na Universidade de Toronto, a 2 km da torre. O campo elétrico  $\vec{E}_z$  é medido por um monopolo ativo, esférico e oco (“active hollow hemispherically shaped monopole”) e os campos  $\vec{H}_f$  e  $\vec{H}_r$  são medidos por uma antena circular (“small loop antenna”). Cada um desses sensores se encontra conectado ao equipamento Sony-Tektronix Digitizer do tipo 710A.

As trajetórias das descargas são monitoradas 24 horas por dia por meio de duas câmeras situadas em dois pontos diferentes em relação ao pé da torre, uma a 2 km e outra a 11,8 km, formando um ângulo de 82,5°. As câmeras de vídeo são do tipo Hitachi VM-3100A e os gravadores são do tipo RCA VR250, VT-3050A. A captura das imagens é executada por meio dessas câmeras e permite a reconstituição das imagens das descargas em visão tridimensional.

A Tabela 2.1 apresenta as características dos equipamentos utilizados nas medições na “CN Tower”.

Tabela 2.1 – Características dos equipamentos de medição utilizados na CN Tower (adaptada de (MOTOYAMA et al, 1996)).

Grandeza medida	Equipamento	Frequência	Sensibilidade
Corrente	Bobina de Rogowski	40 MHz	0,32 V/(A/n)
Campo magnético	Antena circular	$H_f$ : 697 Hz – 150 MHz $H_r$ : 635 Hz – 134 MHz	0,421 V/(A/m)
Campo elétrico	monopolo ativo, esférico e oco	47 Hz – 100 MHz	2,38 mV/(V/m)
Equipamento de gravação	Sony-Tektronix RTD710	DC – 100 MHz	100 MS/s 10 bit/word

**Estudos realizados na África do Sul por Eriksson:** em 1972 foi criado o CSIR (“Council for Scientific and Industrial Research”) com o propósito de se estudar o fenômeno da descarga atmosférica. O local escolhido para realização das pesquisas foi a linha de transmissão “Transvaal Highveld”, situada na África do Sul. Nesse local foi instalada uma torre de 60 m de altura sobre uma colina de 80 m. A altitude desse local em relação ao nível do mar é da ordem de 1400 m. Os estudos foram executados em uma instalação localizada a 10 km da Pretória, na África do Sul. A torre de medição em questão foi montada em arranjos de treliças com estruturas triangulares em alumínio. A estrutura montada foi colocada sobre uma base isolada e foi estaiada em diversos pontos com material isolante (GELDENHUYS et al, 1988).

Como sistema de medição, na base da torre foi colocado um transformador de corrente (TC), com característica de ampla banda de passagem. Os dados obtidos nesse TC são então transferidos e gravados automaticamente por um sistema de aquisição digital. Próximo à torre está localizado um contêiner que possui características de gaiola de Faraday, onde estão condicionadas as instrumentações. Além disso, há outros equipamentos como centelhadores e elos magnéticos no topo da torre, utilizados para estimar a amplitude da corrente com exatidão de 10% e verificar as polaridades das descargas. Existe ainda um gravador de onda de corrente alimentado por bateria, capaz de registrar descargas múltiplas. Há também câmeras de TV para gravar as descargas e para verificar se elas são ascendentes ou descendentes, assim como um contador CIGRE de 10 kHz para quantificar descargas nuvem-solo. Basicamente, as medições realizadas foram do valor de pico da corrente, carga da descarga, taxa de crescimento da corrente e energia por unidade de impedância. Geldenhuys et al (1988) obtiveram resultados apresentados na Tabela 2.2 em relação às características das descargas na torre, após quinze anos de medições.

Tabela 2.2 – Resumo das características das descargas coletadas na torre (adaptada de Geldenhuys et al (1988)).

Número total de descargas coletadas	66
Número médio de descargas por ano	4,33
Número total de descargas descendentes	29
Número total de descargas ascendentes	21
Relação descargas descendentes por descargas ascendentes	1,38/1
Valor médio da densidade de descargas na área (descargas/km <sup>2</sup> .ano)	6,4

No caso do valor de pico da corrente, o valor médio encontrado foi de 43 kA, tendo-se notado razoável concordância em relação a valores de descargas negativas descendentes obtidos em outras estações de pesquisa. Outros dados obtidos sugerem que a região geográfica não influencia na observação das descargas descendentes negativas (GELDENHUYS et al, 1988). Além dos estudos realizados com dados obtidos na torre, foram também realizadas pesquisas relacionadas com indução de tensões em linhas de distribuição em meio rural (ERIKSSON; MEAL, 1982).

**Estudos realizados na Áustria, torre de Gaisberg:** o início dos estudos se deu em 1998 (DIENDORFER et al, 2000), em uma torre de telecomunicações utilizada para transmissão de ondas de rádio localizada no monte Gaisberg, a 5 km de Salzberg. Essa torre possui altura de aproximadamente 100 m e está localizada a 1287 m acima do nível do mar. Nesse local estima-se, por ano, cerca de 40 a 50 descargas diretas (“flashes”) na torre, totalizando aproximadamente 200 descargas (“strokes”).

No caso específico da torre, as correntes são medidas no topo por um resistor “shunt” de resistência de 0,25 mΩ, com resposta em frequência de zero a 3,2 MHz. A transmissão dos dados medidos no resistor “shunt” para o ponto de armazenagem é feita por fibra óptica em dois canais, um na escala de zero a 2,1 kA e outro na escala de zero a 40 kA. Quando a corrente é medida, a datação é controlada e gravada por um sistema GPS (“Global Positioning System”).

Além disso, existem outros equipamentos próximos ao pé da torre, localizados a 200 m do mesmo. Um dos equipamentos é um medidor de campo elétrico atmosférico estático, constituído por um “field mill” e o outro é um sistema de vídeo de alta velocidade.

**Estudos realizados na Suíça, torre St. Chrischona** (MONTANDON, 1992): essa torre está localizada próxima a Basel, na Suíça. A altura dela é de 250 m e os estudos iniciaram por



volta de 1989, com pesquisas relacionadas à detecção e localização de descargas. Basicamente, os estudos realizados envolvem o uso do sistema LPATS (“Lightning Positioning and Tracking System”) pela Swiss PTT, e isso se deve à baixa incidência de descargas nessa torre, em torno de 2 a 3 por ano. As instalações iniciais dos sistemas LPATS se deram em 1989, com atualização em 1990. As ondas das descargas são registradas em seis pontos diferentes da Suíça. As medições, quando realizadas, são sincronizadas com a data e hora fornecidas por um satélite de televisão.

Essas pesquisas com descargas têm os seguintes objetivos:

- testar a exatidão dos sistemas de posicionamento;
- avaliar o pulso eletromagnético gerado pela descarga;
- determinar os parâmetros das descargas;
- analisar estatisticamente os dados das correntes.

As medições das características das correntes realizadas pelo sistema LPATS permitem comparar com aquelas realizadas na torre, como o valor de pico e o tempo de subida de uma onda corrente.

**Estudos realizados pela CEMIG e UFMG:** no início da década de 70, a CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais) iniciou um programa de pesquisa sobre descargas atmosféricas. Em 1971 obteve-se um mapa do estado para índice cerâmico, em 1984 foram instalados contadores de descargas em todo estado e em 1988 iniciou-se o uso do Sistema de Localização de Descargas ou LLS (“Lightning Location System”) para incrementar as informações do conhecimento sobre as densidades de descargas no território brasileiro.

Em 1985 a CEMIG instalou o primeiro centro de pesquisa da América Latina, denominado Estação de Pesquisas do Morro do Cachimbo. O local escolhido foi o Morro do Cachimbo, em Belo Horizonte, localizado a uma altitude de 1430 m a partir do nível do mar. Nesse morro foi instalada uma torre instrumentada de 60 m, tendo ao seu redor vários recursos disponíveis. Em 1998 foi estabelecida uma cooperação entre a CEMIG e a UFMG (Universidade Federal de Minas Gerais) com a criação do LRC (Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas), tendo o propósito de investigar mais profundamente os fenômenos de descargas atmosféricas (SCHROEDER,2001; SCHROEDER et al, 2002). Várias pesquisas foram realizadas, dentre outras sobre a modelagem do solo (VISACRO F., 1998), modelagem da torre (SCHROEDER et al, 1998), análise estatística da

ocorrência das descargas a partir dos dados coletados (SCHROEDER et al, 2002), avaliação da corrente de descarga com o uso do EMTP (“Electromagnetic Transient Program”) (SCHROEDER; SOARES Jr.; VISACRO F., 2001; SCHROEDER; SOARES Jr.; VISACRO F., 2002) e estudos da distribuição da corrente ao longo do canal e da torre, considerando-se os fenômenos das reflexões no topo e na base em parceria com o INPE (GUEDES et al, 2002, 2003).

**Estudos realizados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE):** em 1995 foi criado no INPE, em São José dos Campos, o ELAT (Grupo de Eletricidade Atmosférica), com o propósito de estudar a eletricidade atmosférica. Em 1999 foi criado o Centro de Pesquisas e Testes de Raios em Cachoeira Paulista e em 2000, com a colaboração de instituições brasileiras, francesas e canadenses, foi lançado um foguete para produzir o primeiro raio provocado artificialmente no hemisfério sul.

Entre 1998 e 2001 diversos dados de descargas foram coletados por meio de sensores e pelo satélite, isso resultou em um mapa de atividade de descargas brasileiro, constituindo o primeiro mapa feito por meio de medições das descargas e não apenas por observações.

Outros estudos foram realizados, como a comparação dos parâmetros das descargas obtidos em Monte San Salvatore e Morro do Cachimbo (GUEDES et al, 2001), com os resultados indicando que a região geográfica não influencia a aparência da curva de corrente da descarga obtida na torre. Os autores concluíram também que os valores de pico das correntes são maiores no caso de baixas altitudes que no de altas latitudes, fato que poderia estar relacionado às diferentes altitudes dos centros de carga das nuvens (altitudes menores no caso de altas latitudes).

**Principais estudos realizados em torres elevadas:** a Tabela 2.3 sintetiza os principais estudos sobre descargas atmosféricas em objetos elevados e instrumentados ao longo das várias décadas.

Tabela 2.3 – Principais estudos realizados em objetos elevados (adaptada de (RAKOV, 2003)).

<b>Objeto de estudo</b>	<b>Referência(s)</b>	<b>Localização</b>	<b>Solo</b>	<b>Altura (m)</b>
Empire State Building	McEachron(1939,1941) Hagenguth e Anderson (1952)	Nova Iorque, EUA	Plano	410
Duas torres separadas de 400 m	Berger e Vogelsanger(1965,1966,1969) Berger(1967,1972,1977,1978) Berger et al(1975)	Monte San Salvatore, Lugano, Suíça	Montanhoso, 912 m acima do nível do mar	70
Torre de TV de Ostankino	Gorin et al(1975,1977) Gorin e Shkilev(1984)	Moscou, Rússia	Plano	540
Duas torres de TVs	Garbagnati e Lo Piparo(1970,1973,1982) Garbagnati et al(1974,1975,1978,1981)	Sasso di Pale e Monte Orsa, Itália	Montanha, 993 m acima do nível do mar	40
Torre de pesquisa de CSIR	Eriksson (1978,1982)	Pretória, África do Sul	Colina, 1400 m acima do nível do mar	60
Torre Canadian National	Hussein et al(1995) Janischewskyj et al(1997)	Toronto, Canadá	Plano	553
Torre de Peissenberg	Beierl (1992) Fuchs et al (1998)	Hoher Peissenberg, Alemanha	Montanha, 988 m acima do nível do mar	160
Torre St. Chrischona	Montandon (1992,1995)	Basel, Suíça	Montanha, 493 m acima do nível do mar	248
Morro do Cachimbo	Lacerda et al (1999)	Minas Gerais, Brasil	Montanha, 1600 m acima do nível do mar	60
Torre de Gaisberg	Diendorfer et al(2000)	Salzburg, Áustria	Montanha, 1287 m acima do nível do mar	100
Chaminé de Fukui	Miyake et al (1992), Asakawa et al (1997)	Fukui, Japão	Plano	200
Torre meteorológica	Goto e Narita (1995)	Maki, Japão	Plano	150

Atualmente um grupo envolvendo pesquisadores de vários países tem alocado esforços para realizar estudos sobre os campos eletromagnéticos associados a descargas atmosféricas em objetos elevados. O projeto é denominado “International Project on EM Radiation from Lightning to Tall Structures”<sup>1</sup> e foi criado em 2001.

<sup>1</sup> Retirado do site <http://emcwww.epfl.ch/iplt> em 05 de Agosto de 2004.

## 2.2. PARÂMETROS DAS DESCARGAS PARA APLICAÇÕES EM ENGENHARIA

Berger et al (1975) selecionaram o conjunto de parâmetros indicados nas Tabelas 2.4 e 2.5 para caracterizar as descargas atmosféricas e descargas de retorno:

Tabela 2.4 – Parâmetros: descarga atmosférica (adaptada de Berger et al (1975)).

<b>Descarga atmosférica</b>		
I	Valor de pico	O maior valor de pico de uma descarga
II	Duração da descarga	Tempo total da descarga em que há fluxo de corrente, mesmo que haja descargas múltiplas
III	Intervalos sem descarga	Intervalo entre descargas em que não é possível detectar corrente
IV	Carga da descarga	Carga total transferida na descarga

Tabela 2.5 – Parâmetros: descarga de retorno (adaptada de Berger et al (1975)).

<b>Descarga de retorno</b>		
I	Valor de pico	O maior valor de pico de uma descarga
II	Duração da frente	Intervalo de tempo entre 2 kA e o primeiro pico da corrente
III	Duração da descarga	Intervalo de tempo entre 2 kA e quando a corrente decai em 50% do valor de pico
IV	Máxima taxa de crescimento	Maior taxa ( $di/dt$ ) da descarga
V	Carga do impulso	Carga elétrica transportada pela onda impulsiva da descarga
VI	Carga da descarga	Carga total da descarga
VII	Energia da descarga	Energia dissipada durante o fluxo da corrente da descarga pelo canal

Segundo Anderson e Eriksson (1980), as descargas atmosféricas podem ser caracterizadas pelos seguintes aspectos:

- parâmetros de incidência, levando-se em consideração as descargas múltiplas;
- amplitude da corrente, que corresponde ao parâmetro mais importante para aplicações em engenharia;
- forma do impulso da corrente de descarga, com ênfase na taxa de subida.

**Parâmetros de incidência:** um dos principais parâmetros para se estimar o desempenho dos sistemas elétricos frente às descargas atmosféricas é a densidade de descargas ao solo ( $N_g$ ), que pode ser medida por meio de contadores, como os contadores CIGRE (500 Hz e 10 kHz). Tais contadores foram desenvolvidos pelo Grupo de Trabalho CIGRE 33.01. O parâmetro  $N_g$  representa o número médio de descargas à terra por  $\text{km}^2$  por ano (ANDERSON; ERIKSSON, 1980).

**Distribuição da amplitude da corrente:** em 1972 Popolansky determinou o valor médio de 25 kA para o pico da corrente, considerando 624 amostras medidas. Todavia, nesse estudo foram consideradas tanto descargas descendentes como ascendentes. Posteriormente, Anderson e Eriksson (1980) estimaram que 90% das descargas tipo nuvem-solo eram negativas quando medidas em torres com alturas inferiores a 60 m, situação esta mais representativa para fins práticos como em projetos de engenharia.

**Parâmetros das ondas de corrente:** as primeiras caracterizações dos parâmetros foram realizadas por Berger et al em 1975, com os dados obtidos no Monte San Salvatore, sendo posteriormente complementados por Anderson e Eriksson (1980), que introduziram alguns parâmetros adicionais. A análise é feita com base na Figura 2.2, que corresponde a uma frente de onda típica de uma descarga negativa.

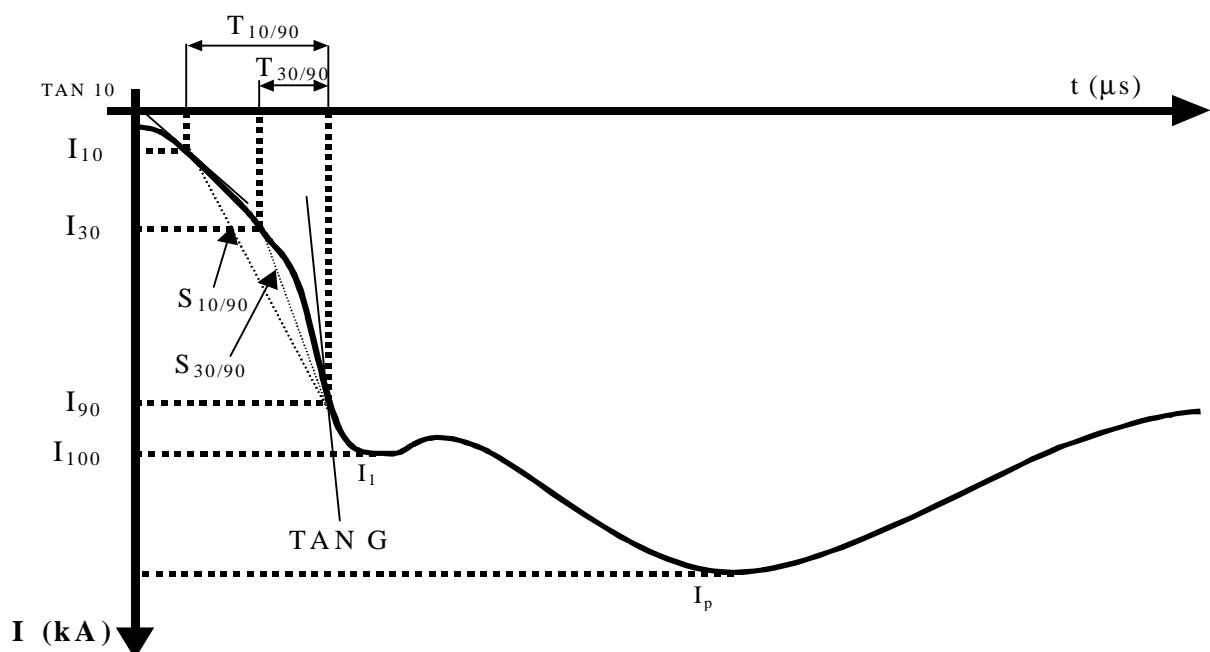


Figura 2.2. Forma de onda típica de corrente da primeira descarga de retorno negativa.

Da Figura 2.2 são definidos os seguintes parâmetros:

- $I_1$  e  $I_p$ : primeiro e segundo valores de pico da corrente, respectivamente. Os parâmetros  $T_{10/90}$ ,  $T_{30/90}$ ,  $S_{10/90}$ ,  $S_{30/90}$  e  $TAN G$  são definidos em função de  $I_1$ , enquanto  $T_{50}$  é definido em função de  $I_p$ . Geralmente as primeiras descargas de retorno é que apresentam duas cristas, com  $I_p$  normalmente maior que  $I_1$ . As descargas subseqüentes apresentam apenas um pico;
- $T_{10/90}$ : intervalo de tempo entre 10% e 90% de  $I_1$ ;
- $T_{30/90}$ : intervalo de tempo entre 30% e 90% de  $I_1$ ;
- $T_{50}$ : intervalo entre o valor de 2 kA definido e o valor correspondente a 50% do valor de pico  $I_1$ ;
- $S_{10/90}$ : taxa de crescimento médio da corrente entre 10% e 90% em relação a  $I_1$ ;
- $S_{30/90}$ : taxa de crescimento médio da corrente entre 30% e 90% em relação a  $I_1$ ;
- $TAN 10$ : taxa de crescimento definida como a tangente no ponto correspondente a 10% de  $I_1$ ;
- $TAN G$ : máxima taxa de crescimento para frente de onda da corrente.

Além disso, há outras notações advindas dos parâmetros da Figura 2.2:

- $T_{d10/90}$ : tempo de frente equivalente,  $T_{d10/90} = \frac{T_{10/90}}{0,8}$ ;
- $T_{d30/90}$ : tempo de frente equivalente,  $T_{d30/90} = \frac{T_{30/90}}{0,6}$ ;
- Carga: corresponde à integração da corrente no tempo;
- Energia por unidade de impedância: é a energia dissipada a partir da corrente que passa através de uma resistência de  $1 \Omega$ .

Para avaliação estatística dos valores de picos das correntes, utiliza-se tradicionalmente a expressão proposta por Anderson e Eriksson (1980), que resulta da aplicação da equação (2.1), que descreve a função da distribuição cumulativa, em escala log-normal:

$$F(X < x) = \frac{1}{S_{\ln x} \cdot \sqrt{2p}} \int_0^x \left\{ \frac{1}{x} \exp \left[ -\frac{1}{2} \frac{(\ln x - m)^2}{S_{\ln x}^2} \right] \right\} dx. \quad (2.1),$$

onde  $m$  é o valor médio do logaritmo neperiano da variável aleatória  $x$  e  $S_{\ln x}$  corresponde ao seu desvio padrão logarítmico (base e). O significado da equação (2.1) é a probabilidade de que a variável  $x$  assumira valores inferiores a  $X$ . A função é totalmente caracterizada por  $m$  e  $S$ . Da equação (2.1) e com dados referentes aos parâmetros indicados na Figura 2.2, os pesquisadores do grupo WG 33.01 da CIGRE elaboraram a Tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Parâmetros das correntes de descargas CIGRE (adaptada de IEEE Std 1410 (1997)).

<b>Parâmetros de distribuição log-normal para descargas descendentes negativas</b>				
Parâmetros	Primeira descarga		Descarga subsequente	
	Média ( $\mu$ )	Desvio Padrão Logarítmico ( $\sigma$ )	Média ( $\mu$ )	Desvio Padrão Logarítmico ( $\sigma$ )
Frente da onda ( $\mu$ s)	--	--	--	--
$T_{d10/90}$	5,63	0,576	0,75	0,921
$T_{d30/90}$	3,83	0,553	0,67	1,013
$T_m = \frac{I_p}{S_m}$	1,28	0,611	0,308	0,708
Taxa de crescimento (kA/ $\mu$ s)	--	--	--	--
$S_m$ ou TAN G	24,3	0,599	39,9	0,852
$S_{10}$ ou TAN 10	2,6	0,921	18,9	1,404
$S_{10/90}$	5,0	0,645	15,4	0,944
$S_{30/90}$	7,2	0,622	20,1	0,967
Corrente de crista (kA)	--	--	--	--
$I_l$	27,7	0,461	11,8	0,530
$I_p$	31,1	0,484	12,3	0,530
Inicial/Final	0,9	0,230	0,9	0,207
Tempo de cauda ( $\mu$ s)	77,5	0,577	30,2	0,933
Carga (C)	4,65	0,882	0,938	0,882
Energia por unidade de impedância (kA) <sup>2</sup> s	0,057	1,373	0,0055	1,366
Intervalo entre descargas (ms)	--	--	35	1,066

Tais parâmetros são importantes pelos seguintes fatos:

- o enfoque principal é dado ao valor de pico da corrente, já que as sobretensões ocasionadas pelas descargas são maiores no caso de correntes mais elevadas;

- a derivada da corrente em relação ao tempo ( $dI/dt$ ) resulta em tensões indutivas ao longo dos condutores, de modo que as sobretensões são ocasionadas principalmente pela rápida variação da corrente nos momentos iniciais da descarga;
- a duração da descarga atmosférica determina a quantidade de carga injetada em um sistema elétrico, assim como nos sistemas de proteção.

Além dos parâmetros descritos na Tabela 2.6, outros ainda não padronizados, podem ser obtidos com o uso de sistemas como o LLS. Esses parâmetros estão citados abaixo:

- tipo de tempestade (convencional ou frontal);
- direção e velocidade da tempestade;
- taxa de descargas (por exemplo, descargas das tempestades por células ou por unidades de área);
- relação entre descargas positivas e negativas;
- relação entre os números de descargas nuvem-nuvem e nuvem-solo.

### 2.3. CONCEITUAÇÃO DOS MODELOS DE DESCARGAS DE RETORNO

Os modelos para representação da descarga de retorno foram desenvolvidos por vários pesquisadores ao longo das décadas. Recentemente Rakov e Uman (1998) elaboraram trabalhos que resumem de forma sintética a conceituação desses modelos. O trabalho foi posteriormente estendido por Rachidi et al (2002) para descargas de retorno considerando a presença de objetos elevados. Inicialmente, tais modelos podem ser classificados em: modelos físicos, modelos eletromagnéticos, modelos de circuito distribuído e modelos de “engenharia”. Os modelos de “engenharia” são os mais importantes para o desenvolvimento do presente trabalho.

**Modelos físicos:** tipicamente a solução é encontrada por meio das equações de dinâmica dos gases (também denominados equações hidrodinâmicas), que levam em consideração a



conservação da massa, do momento e da energia. A solução das equações pode ser encontrada tendo-se três equações hidrodinâmicas, associadas a duas equações de estado tendo como parâmetros de entrada a função da corrente do canal em relação ao tempo. Para dado modelo, a saída (temperatura, pressão, densidade de massa) é dada em função do tempo.

**Modelo eletromagnético:** nesse modelo, o canal da descarga é delineado como uma antena com perdas, sendo que a solução é encontrada com base nas equações de Maxwell. Os cálculos permitem determinar a distribuição da corrente ao longo do canal. Essa metodologia permite a avaliação dos campos elétricos e magnéticos em pontos distantes em relação ao canal da descarga.

**Modelos de circuito distribuído:** a descarga é representada como um transitório em uma linha de transmissão na posição vertical, sendo a linha constituída pelos componentes  $R$ ,  $L$  e  $C$  (resistência, indutância e capacitância da linha, respectivamente, por unidade de comprimento). As propriedades do canal dependem do espaço e do tempo e geralmente não são lineares e nem uniformes. Esses modelos são utilizados para se determinar a distribuição da corrente do canal em função do tempo e da altura. Permitem também a avaliação dos campos elétricos e magnéticos em pontos distantes, porém geralmente não são levadas em consideração as ramificações formadas durante as descargas.

**Modelos de engenharia:** a distribuição espacial e temporal da corrente do canal (ou da densidade de cargas no canal) é especificada a partir da corrente observada na base do canal, da velocidade de propagação da frente de onda e do perfil de luminosidade do canal. Nota-se geralmente, nesses modelos, a necessidade do ajuste de poucos parâmetros.

Os modelos desse gênero que se destacam são: TL (linha de transmissão), MTLL (linha de transmissão modificada com decaimento linear), MTLE (linha de transmissão modificada com decaimento exponencial), BG (Bruce e Golde), TCS (fonte de corrente viajante) e DU (Diendorfer e Uman).

Cooray (2000) considera importantes os seguintes requisitos para modelos de descargas de retorno:

- dedução da corrente da descarga de retorno a partir do campo eletromagnético medido;
- prever a influência dos campos elétricos e magnéticos para grandes distâncias, onde as medições sejam impraticáveis;

- fornecer um melhor entendimento da natureza física a partir do modelo da descarga de retorno.

Rakov (2003) propõe a seguinte formulação geral para os diversos modelos de “engenharia”:

$$I(z', t) = u \left( t - \frac{z'}{v_f} \right) P(z') I \left( 0, t - \frac{z'}{v} \right) \quad (2.2),$$

onde  $u \left( t - \frac{z'}{v_f} \right)$  é função de Heaviside ou degrau, sendo

$$\begin{cases} = 0 & \text{para } t < \frac{z'}{v_f}; \\ = 1 & \text{para } t \geq \frac{z'}{v_f} \end{cases}$$

$z'$ : representa a posição (altura em relação ao solo) em que se encontra a frente da onda de corrente;

$v_f$ : velocidade de propagação da frente da descarga de retorno.

$v$ : velocidade de propagação da frente da onda de corrente.

$P(z')$ : fator de atenuação.

A Tabela 2.7 fornece os parâmetros para a maioria dos modelos segundo a formulação da equação (2.2).

Tabela 2.7 – Parâmetros para os modelos de “engenharia” (adaptada de Rakov (1998)).

	<b>Modelo</b>	<b><math>P(z')</math></b>	<b><math>v</math></b>
1	TL (Uman e McLain)	1	$v_f$
2	MTLL (Rakov e Dulzon)	$1 - \frac{z'}{H_{tot}}$	$v_f$
3	MTLE (Nucci et al)	$\exp\left(-\frac{z'}{I}\right)$	$v_f$
4	BG (Bruce e Golde)	1	$\infty$
5	TCS (Heidler)	1	$-c$

Na Tabela 2.7,  $I$  corresponde à constante de decaimento da corrente, estimada por Nucci (RAKOV, 2003) como igual a 2 km e  $H_{tot}$  corresponde à altura total do canal da descarga em relação ao nível do solo.

Segundo Rakov (2003) e Cooray (2003), os modelos de engenharia ainda podem ser classificados em duas categorias: modelos tipo linha de transmissão ou corrente de propagação (CP) e modelos tipo fonte de corrente viajante ou corrente gerada (CG).

Para os modelos avaliados por Rakov (2003), as principais formulações matemáticas das duas categorias estão resumidas nas Tabelas 2.8 e 2.9, tomadas por base a corrente da descarga de retorno  $I(z', t)$  e a densidade de cargas do canal  $r_L(z', t)$ .

Tabela 2.8 – Modelos tipo linha de transmissão para  $t \geq \frac{z'}{v}$  (adaptada de Rakov (2003)).

TL	$I(z', t) = I\left(0, t - \frac{z'}{v}\right)$
	$r_L(z', t) = \frac{I\left(0, t - \frac{z'}{v}\right)}{v}$
MTLL	$I(z', t) = \left(1 - \frac{z'}{H_{tot}}\right) I\left(0, t - \frac{z'}{v}\right)$
	$r_L(z', t) = \left(1 - \frac{z'}{H_{tot}}\right) \frac{I\left(0, t - \frac{z'}{v}\right)}{v} + \frac{Q(z', t)}{H_{tot}}$
MTLE	$I(z', t) = \exp\left(-\frac{z'}{l}\right) I\left(0, t - \frac{z'}{v}\right)$
	$r_L(z', t) = \exp\left(-\frac{z'}{l}\right) \frac{I\left(0, t - \frac{z'}{v}\right)}{v} + \frac{\exp\left(-\frac{z'}{l}\right)}{l} \cdot Q(z', t)$
$Q(z', t) = \int_{\frac{z'}{v}}^t I\left(0, t - \frac{z'}{v}\right) dt ; v=v_f=\text{constante}; H_{tot}=\text{constante}; l=\text{constante}$	

Tabela 2.9 – Modelos tipo fonte de corrente viajante para  $t \geq \frac{z'}{v}$  (adaptada de Rakov (2003)).

BG	$I(z', t) = I(0, t)$
	$r_L(z', t) = \frac{I\left(0, \frac{z'}{v_f}\right)}{v_f}$
TCS	$I(z', t) = I\left(0, t + \frac{z'}{v}\right)$
	$r_L(z', t) = -\frac{I\left(0, t + \frac{z'}{v_f}\right)}{c} + \frac{I\left(0, \frac{z'}{v^*}\right)}{v^*}$
DU	$I(z', t) = I\left(0, t + \frac{z'}{v}\right) - \exp\left[-\frac{t - \frac{z'}{v_f}}{t_D}\right] I\left(0, \frac{z'}{v^*}\right)$
	$r_L(z', t) = -\frac{I\left(0, t + \frac{z'}{v_f}\right)}{c} - \exp\left[-\frac{t - \frac{z'}{v_f}}{t_D}\right] \left[ \frac{I\left(0, \frac{z'}{v^*}\right)}{v_f} + \frac{t_D}{v^*} \frac{dI\left(0, \frac{z'}{v^*}\right)}{dt} \right] + \frac{I\left(0, \frac{z'}{v^*}\right)}{v^*} + \frac{t_D}{v^*} \frac{dI\left(0, \frac{z'}{v^*}\right)}{dt}$
$v^* = \frac{v_f}{1 + (v_f / c)}; \tau_D = \text{constante}; v_f = \text{constante}$	

A relação existente entre os modelos TL e TCS se deve ao fato de que, no modelo TL, o movimento da onda viajante da descarga de retorno ocorre no sentido positivo de  $z'$  (com  $v=v_f$ ), e no modelo TCS o movimento ocorre no sentido negativo de  $z'$  (com  $v=-c$ ). A Figura 2.3 ilustra essas características.

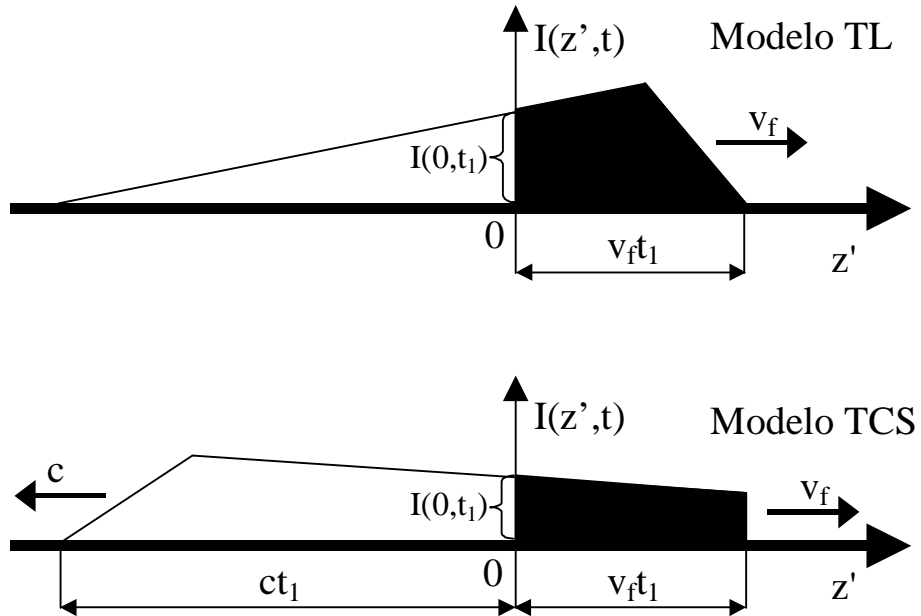


Figura 2.3. Corrente versus altura  $z'$  acima do nível do solo para um instante arbitrário  $t=t_1$  para os modelos TL e TCS. Perceber que tanto a corrente em  $z'=0$  como  $v_f$  são iguais em ambos modelos (adaptada de Rakov (2003)).

A avaliação da corrente  $I(z', t)$  é feita em função da altura  $z'$  para um dado instante  $t$ , sendo que a corrente inicial corresponde a  $I(0, t)$ , ou seja, a corrente na posição  $z' = 0$  m. Esse método de análise é utilizado também para se determinar a densidade de cargas no canal  $r_L(z', t)$ .

Thottappillil et al (1997) definiram dois componentes que constituem a densidade de cargas no canal, um associado à transferência de cargas da corrente através da seção do canal e outro associado à deposição de cargas do canal para a parte corona.

A Figura 2.4 mostra o caso de modelos que consideram fontes de corrente distribuídas ao longo do canal. Este modelo também é aplicável para modelos tipo TL, como mostra a equação (2.3).

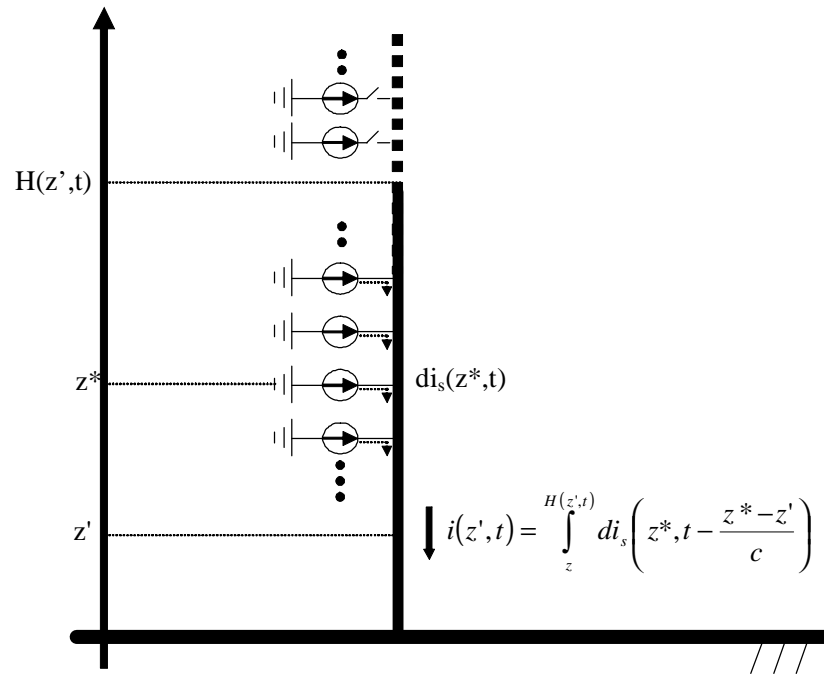


Figura 2.4. Fonte de corrente distribuída ao longo do canal (adaptada de Rachidi et al (2002)).

Na Figura 2.4,  $H(z', t)$  corresponde à altura da frente da descarga de retorno vista pelo observador à altura  $z'$  e tempo  $t$ . A equação (2.3) é uma generalização das formulações dos modelos TCS e TL e foi desenvolvida por Cooray (2003).

$$\begin{aligned} \frac{dI_s(z^*, t)}{dz^*} = & -\frac{dP(z^*)}{dz^*} I\left(0, t - \frac{z^*}{v}\right) u\left(t - \frac{z^*}{v_f}\right) + P(z^*) \left(\frac{1}{c} + \frac{1}{v}\right) \frac{\partial I\left(0, t - \frac{z^*}{v}\right)}{\partial t} u\left(t - \frac{z^*}{v_f}\right) + \\ & + P(z^*) \left(\frac{1}{c} + \frac{1}{v_f}\right) I\left(0, t - \frac{z^*}{v}\right) d\left(t - \frac{z^*}{v_f}\right) \end{aligned} \quad (2.3).$$

Na equação (2.3),  $d(\cdot)$  é a função de Dirac. Essa formulação advém da combinação da equação (2.2) com a equação (2.4), também desenvolvida por Cooray (2003):

$$\frac{dI_s(z^*, t)}{dz^*} = -\frac{\partial I(z^*, t)}{\partial z^*} + \frac{1}{c} \frac{\partial I(z^*, t)}{\partial t} \quad (2.4).$$

A Tabela 2.11 sintetiza os cinco modelos analisados para representação das descargas de retorno como resultado de  $dI(z^*, t)$  em função de  $dz^*$ .

Tabela 2.10 – Expressões de  $\frac{dI_s(z^*,t)}{dz^*}$  no canal (adaptada de Rakov (2003)).

Modelo	$\frac{dI_s(z^*,t)}{dz^*}$
TL	$\left(\frac{1}{c} + \frac{1}{v_f}\right) \frac{\partial I\left(0, t - \frac{z^*}{v_f}\right)}{\partial t} u\left(0, t - \frac{z^*}{v_f}\right)$
MTLL	$\left[ \left(\frac{1}{c} + \frac{1}{v_f}\right) \left(1 - \frac{z^*}{H_{tot}}\right) \frac{\partial I\left(0, t - \frac{z^*}{v_f}\right)}{\partial t} + \frac{I\left(0, t - \frac{z^*}{v_f}\right)}{H_{tot}} \right] u\left(0, t - \frac{z^*}{v_f}\right)$
MTLE	$\left[ \left(\frac{1}{c} + \frac{1}{v_f}\right) \exp\left(-\frac{z^*}{l}\right) \frac{\partial I\left(0, t - \frac{z^*}{v_f}\right)}{\partial t} + \frac{I\left(0, t - \frac{z^*}{v_f}\right)}{l} \exp\left(-\frac{z^*}{l}\right) \right] u\left(0, t - \frac{z^*}{v_f}\right)$
BG	$\frac{1}{v_f} I(0,t) d\left(t - \frac{z^*}{v_f}\right)$
TCS	$\left(\frac{1}{c} + \frac{1}{v_f}\right) I\left(0, t + \frac{z^*}{c}\right) d\left(t - \frac{z^*}{v_f}\right)$

A altura  $H(z',t)$  pode ser obtida da seguinte forma (RAKOV, 2003):

$$H(z',t) = \frac{t + \frac{z'}{c}}{\frac{1}{v_f} + \frac{1}{c}} \quad (2.5).$$

Em relação à Figura 2.4, a corrente total a partir das fontes das correntes distribuídas ao longo do canal é calculada por:

$$I(z',t) = \int_{z'}^{H(z',t)} di_s\left(z^*, t - \frac{z^* - z'}{c}\right) \quad (2.6).$$

Rakov (2003) cita como principais conclusões dos estudos comparativos entre os diferentes modelos de “engenharia”:

- as relações existentes entre os valores de pico do campo elétrico e da corrente são previstas razoavelmente bem pelos modelos TL, MTLL, MTLE e DU;

- campos elétricos a dezenas de metros do canal de descarga após os primeiros 10  $\mu$ s a 15  $\mu$ s são razoavelmente bem reproduzidos pelos modelos MTLL, BG, TCS e DU, mas não pelos modelos TL e MTLE;
- com referência às características gerais das formas de onda dos campos a 5 km de distância do canal, nenhum dos modelos pode ser considerado adequado;
- o modelo TCS não prevê adequadamente os campos elétricos e magnéticos medidos a distâncias de 15 e 30 m durante os primeiros microssegundos.

Além dos modelos de engenharia descritos por Rakov (2003), vale destacar o modelo desenvolvido por Visacro e Silveira (2004), denominado HEM (Modelo Eletromagnético Híbrido ou “Hybrid Electromagnetic Model”), o qual visa a representação de propriedades físicas importantes das descargas, como a atenuação da corrente, o efeito corona e a tortuosidade do canal.



### **3 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA “CONTAMINAÇÃO” E “DESCONTAMINAÇÃO” DA CORRENTE INCIDENTE EM OBJETOS ELEVADOS**

Quando as descargas atmosféricas atingem objetos elevados, estes podem influenciar consideravelmente a forma de onda da corrente e, conseqüentemente, os seus parâmetros. A corrente resultante no objeto é denominada “corrente contaminada” em função das sucessivas reflexões que ocorrem no topo e na base da estrutura atingida. O processo de “descontaminação” consiste em se obter, a partir do conhecimento da corrente em algum ponto do objeto (geralmente na base ou no topo) a corrente correspondente à situação em que as impedâncias do canal, do objeto e do solo são iguais, ou seja, assumindo que não ocorram reflexões, ou seja, que os coeficientes de reflexão na base e no topo são iguais a zero. Isso é feito aplicando-se um algoritmo baseado na teoria de ondas viajantes.

Neste Capítulo são estudados dois importantes modelos para “contaminação” e “descontaminação” de corrente, o primeiro desenvolvido por Guerrieri et al (1998) e o segundo desenvolvido por Rachidi et al (2002).

Todavia, é importante salientar que os coeficientes de reflexão no topo e na base da torre em geral são diferentes de zero. Neste trabalho também se julgou conveniente definir outra corrente, denominada corrente “pura”, a qual é definida como a corrente que resultaria no caso de ausência da torre, porém considerando a reflexão no ponto de descontinuidade canal-solo. A Figura 3.1 ilustra as correntes “pura”, “contaminada” e “descontaminada”.

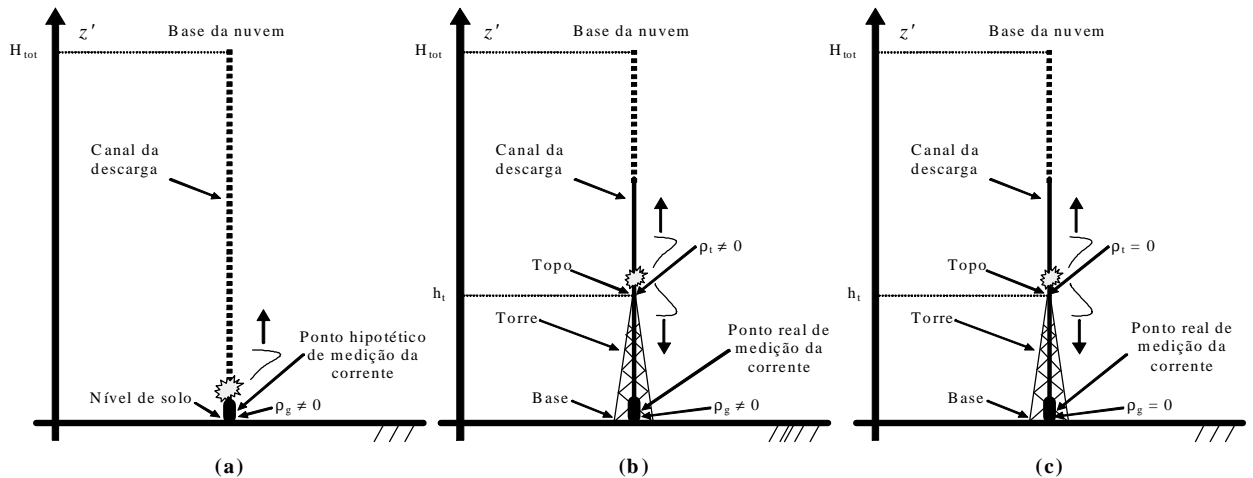


Figura 3.1. Definição das correntes: a) “pura”, b) “contaminada” e c) “descontaminada”.

### 3.1. EXTENSÃO DOS MODELOS DAS DESCARGAS DE RETORNO NA PRESENÇA DE OBJETOS ELEVADOS

Guerrieri et al (1998) desenvolveram um método para avaliar a corrente “descontaminada” a partir da corrente medida em objeto elevado e instrumentado. Para a elaboração do modelo foram feitas as seguintes considerações:

- o objeto onde incide a descarga é um condutor perfeito e unidimensional, ou seja, a altura é muito maior que o seu diâmetro;
- os coeficientes de reflexão são considerados constantes, independentes da frequência, tanto no topo como na base do objeto;
- o pulso de corrente  $i_0(z', t)$  é resultado do processo da descarga de retorno e incide no topo do objeto. Essa corrente desloca-se no sentido descendente, na velocidade da luz  $c$ , sem sofrer distorção.

A Figura 3.2 esquematiza a forma como é visualizado o canal da descarga atmosférica, a onda de corrente que se propaga no objeto e os coeficientes de reflexão no topo e na base.

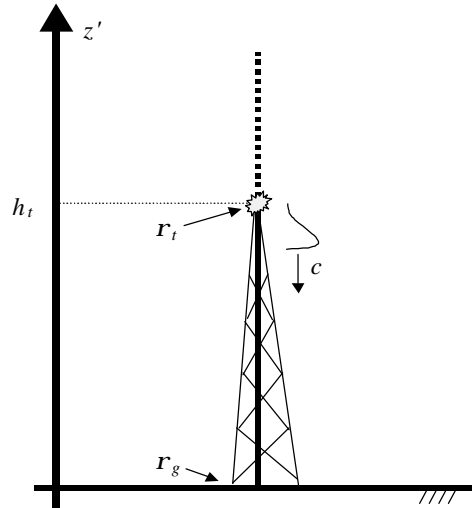


Figura 3.2. Geometria do problema (adaptada de Guerrieri et al (1998)).

A partir da Figura 3.2, Guerrieri et al (1998) determinaram a corrente “contaminada” no topo do objeto  $i(h_t, t)$  considerando as reflexões na base e no topo dos mesmos, a qual é dada pela equação (3.1):

$$i(h_t, t) = i_0(h_t, t) + \sum_{n=1}^{\infty} r_g^n r_t^{n-1} (1 + r_t) i_0\left(h_t, t - \frac{2nh_t}{c}\right) \quad (3.1),$$

onde  $c$ : velocidade da luz;

$v$ : velocidade de propagação da corrente da descarga no canal;

$h_t$ : altura do objeto;

$n$ : número de reflexões nas extremidades do objeto;

$r_t$ : coeficiente de reflexão no topo do objeto;

$r_g$ : coeficiente de reflexão na base do objeto.

Os coeficientes de reflexão no topo ( $r_t$ ) e na base ( $r_g$ ) da torre são calculados pelas equações:

$$r_t = \frac{Z_t - Z_{ch}}{Z_t + Z_{ch}} \quad (3.2) \text{ e}$$

$$r_g = \frac{R_g - Z_t}{R_g + Z_t} \quad (3.3),$$

onde  $R_g$  corresponde à impedância do sistema de aterramento (admitida como igual à resistência de terra),  $Z_t$  à impedância da torre e  $Z_{ch}$  à impedância do canal.

A equação (3.1) pode ser estendida da seguinte forma (GUERRIERI et al, 1998):

$$i(z', t) = \sum_{n=0}^{\infty} \left[ r_g^n r_t^n i_0 \left( h_t, t - \frac{h_t - z'}{c} - \frac{2nh_t}{c} \right) + r_g^{n+1} r_t^n i_0 \left( h_t, t - \frac{h_t + z'}{c} - \frac{2nh_t}{c} \right) \right] \quad (3.4), \text{ para } 0 \leq z' \leq h_t \text{ e,}$$

$$i(z', t) = i_0 \left( h_t, t - \frac{z' - h_t}{v'} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ r_g^n r_t^{n-1} (1 + r_t) i_0 \left( h_t, t - \frac{z' - h_t}{v'} - \frac{2nh_t}{c} \right) \right] \quad (3.5), \text{ para } z' > h_t.$$

Na equação (3.5)  $v'$  corresponde à velocidade de propagação dos pulsos de corrente transmitidos para o canal devido à descontinuidade canal-torre. Essa equação consiste na corrente “contaminada” no canal pelas reflexões no topo e na base do objeto e foi baseada no modelo Linha de Transmissão (TL) para a descarga de retorno.

Guerrieri et al (1998) elaboraram também uma metodologia para realizar o processo de “descontaminação” da corrente:

$$\begin{cases} i_0(h_t, t) = i(h_t, t) & \text{para } t < \frac{2h_t}{c} \\ i_0(h_t, t) = i(h_t, t) - \sum_{n=1}^k r_g^n r_t^{n-1} (1 + r_t) i_0 \left( h_t, t - \frac{2nh_t}{c} \right) & \text{para } \frac{2kh_t}{c} \leq t \leq \frac{2(k+1)h_t}{c} \\ \text{com } k = 1, 2, \dots \end{cases} \quad (3.6)$$

A equação (3.6) mostra um método de “descontaminação” de uma corrente medida no topo da torre, com a corrente “descontaminada” referida ao topo da própria torre.

Rachidi et al (2002) estenderam a aplicação de Guerrieri et al (1998) para outros modelos de descargas de retorno, inicialmente reunidos por Rakov e Uman (1998), modelando a descarga de retorno através de fontes de corrente distribuídas ao longo do canal. O objeto de incidência foi modelado como uma linha de transmissão uniforme sem perdas, percorrido no sentido descendente pela corrente da descarga de retorno à velocidade da luz, sem atenuação e sem distorção. Essa premissa é a mesma usada por Guerrieri et al (1998). A Figura 3.3 ilustra o comportamento da corrente no modelo de fontes distribuídas ao longo do canal para uma descarga que atinge uma estrutura elevada.

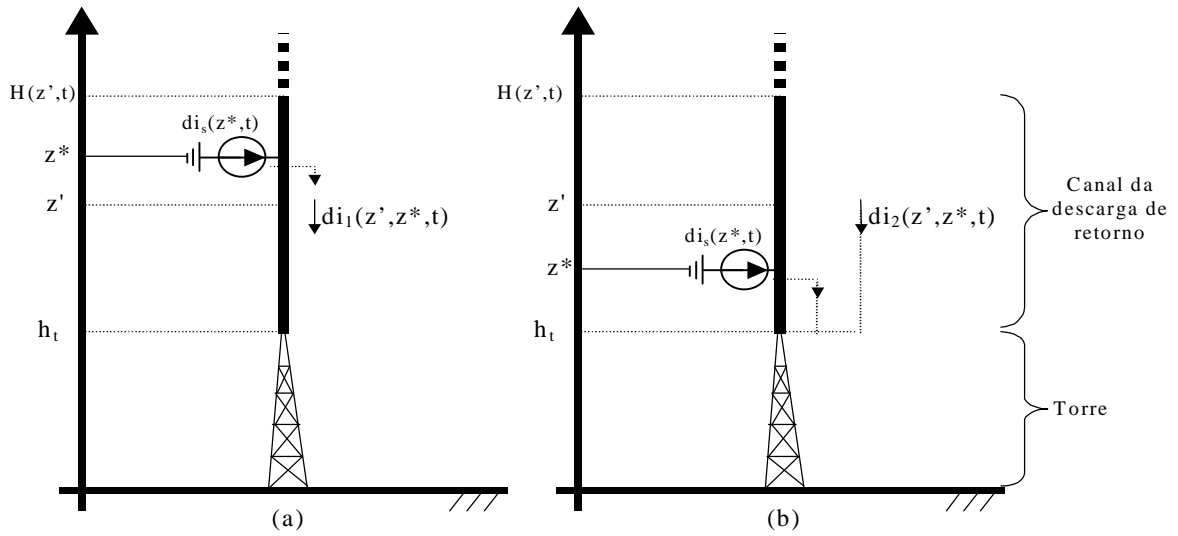


Figura 3.3. Incidência da descarga em um objeto elevado. A corrente total  $i(z', t)$  é obtida pela integração de  $d_{i1}$  e  $d_{i2}$  com limites apropriados e somando as suas contribuições de correntes (adaptada de Rachidi et al (2002)):

- a)  $z^* > z' > h_t$  (apenas a onda incidente inicialmente é mostrada,  $d_{i1}$  também inclui as reflexões no topo e na base do objeto);  
 b)  $h_t < z^* < z'$  (apenas a reflexão no topo do objeto é mostrada).

Na Figura 3.3 tem-se,

$z^*$ : altura do elemento de corrente em relação ao solo;

$di_s(z^*, t)$ : corrente elementar;

$d_{i1}(z', z^*, t)$ : fração da corrente elementar localizada à altura  $z^* > z'$ ;

$d_{i2}(z', z^*, t)$ : fração da corrente elementar localizada em  $h_t < z^* < z'$ .

A corrente total em um ponto  $z' > h_t$  no canal da descarga é obtida pela equação:

$$i(z', t) = \int_{z'}^{H(z', t)} d_{i1}(z', z^*, t) + \int_{h_t}^{z'} d_{i2}(z', z^*, t) \quad (3.7).$$

Para o caso do objeto elevado, a distribuição da corrente total em um ponto  $z'$  para  $0 \leq z' \leq h_t$  é calculada pela equação:

$$i(z', t) = \int_{h_t}^{H(z', t)} d_i(z', z^*, t) \quad (3.8).$$

Para o modelo das fontes distribuídas de corrente ao longo do canal associado a um objeto elevado, o circuito elétrico equivalente está mostrado na Figura 3.4 (RAKOV, 2001).

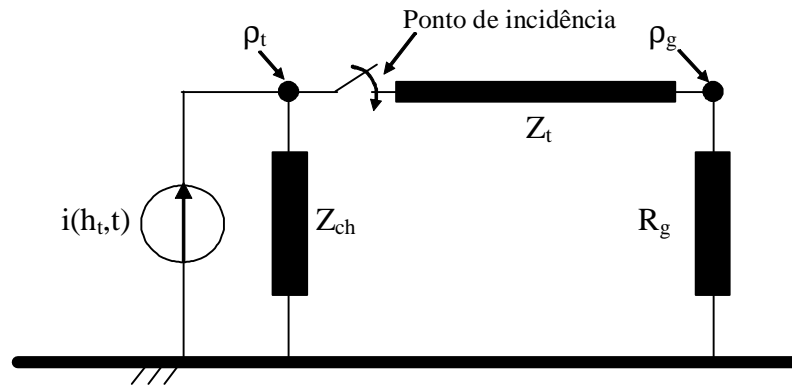


Figura 3.4. Modelo de circuito representando a fonte de corrente ( $i(h_t, t)$ ), a impedância do canal ( $Z_{ch}$ ), a impedância da torre ( $Z_t$ ) e a resistência do solo ( $R_g$ ).

Rachidi et al (2002) demonstraram a expressão geral da distribuição da corrente no canal na posição  $z'$  para  $h_t < z' \ll H_{tot}$ :

$$i(z', t) = \left[ P(z' - h_t) i_0 \left( h_t, t - \frac{z' - h_t}{v_f} \right) - r_t i_0 \left( h_t, t - \frac{z' - h_t}{c} \right) + (1 - r_t)(1 + r_t) \sum_{n=1}^{\infty} r_g^n \cdot r_t^{n-1} i_0 \left( h_t, t - \frac{z'}{c} - \frac{(2n-1)h_t}{c} \right) \right] i_0 \left( t - \frac{z'}{v} \right) \quad (3.9),$$

onde  $P(z' - h_t)$  corresponde ao fator de atenuação da corrente conforme a equação (2.2).

Para objetos elevados, na posição  $z'$  para  $0 \leq z' \leq h_t$ , a expressão da corrente distribuída é:

$$i(z', t) = (1 - r_t) \sum_{n=0}^{\infty} \left[ r_g^n \cdot r_t^n \cdot i_0 \left( h_t, t - \frac{h_t - z'}{c} - \frac{2n \cdot h_t}{c} \right) + r_g^{n+1} \cdot r_t^n \cdot i_0 \left( h_t, t - \frac{h_t + z'}{c} - \frac{2n \cdot h_t}{c} \right) \right] \quad (3.10),$$

onde  $n$  corresponde ao número de reflexões nas extremidades.

Nota-se que a equação (3.10) difere da equação (3.4) pelo termo  $(1 - r_t)$ , que corresponde ao coeficiente de transmissão no topo da torre. A equação (3.9) consiste em uma forma genérica da distribuição da corrente ao longo do canal, a qual se aplica aos modelos descritos na Tabela 2.7.

Verifica-se pela equação (3.10) que o processo de “descontaminação” da corrente para  $0 \leq z' \leq h_t$  independe do modelo adotado para a descarga de retorno.

Para o caso da “descontaminação” da corrente na torre, Bermudez et al (2003) obtiveram a equação:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_0(h_t, t) = \frac{1}{1-r_t} i(h_t, t) \quad \text{para } t < \frac{2h_t}{c} \\ i_0(h_t, t) = \frac{1}{1-r_t} i(h_t, t) - \frac{1}{1-r_t} \sum_{n=1}^k r_g^n r_t^{n-1} (1+r_t) i_0\left(h_t, t - \frac{2nh_t}{c}\right) \quad \text{para } \frac{2kh_t}{c} \leq t \leq \frac{2(k+1)h_t}{c} \\ \text{com } k = 1, 2, \dots \end{array} \right. \quad (3.11).$$

Janischewskyj et al (1999) verificaram que a presença de objetos elevados pode aumentar substancialmente os valores de pico iniciais dos campos elétricos e magnéticos, bem como das suas derivadas em relação ao tempo. A avaliação dos campos decorrentes de descargas que atingem estruturas elevadas deve ser feita considerando-se tanto a corrente na estrutura como a corrente no canal. Ambas necessitam ser obtidas a partir da corrente medida em algum ponto do objeto levando-se em consideração as reflexões na base e no topo da estrutura.

Recentemente, Baba e Rakov (2005) desenvolveram uma metodologia equivalente à de Rachidi et al (2002) para modelar a descarga de retorno na presença de objetos elevados, utilizando a equivalência Thevenin em relação ao circuito mostrado Figura 3.4. A Figura 3.5 exhibe esse modelo elétrico.

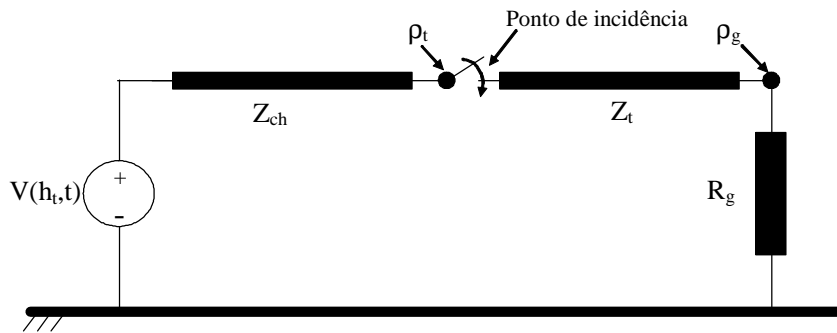


Figura 3.5. Modelo elétrico de equivalente Thevenin.

A relação entre os parâmetros  $V(h_t, t)$  (BABA; RAKOV, 2005) e  $i_0(h_t, t)$  (RACHIDI et al, 2002) é dada pela equação:

$$V(h_t, t) = 2i_0(h_t, t)Z_{ch} \quad (3.12).$$

### 3.2. DISCUSSÃO DOS MÉTODOS DE GUERRIERI ET AL E DE RACHIDI ET AL

As metodologias desenvolvidas por Guerrieri et al (1998) e Rachidi et al (2002) para cálculos das correntes “contaminada” e “descontaminada” diferem em certos aspectos, conforme indicado na Figura 3.6.

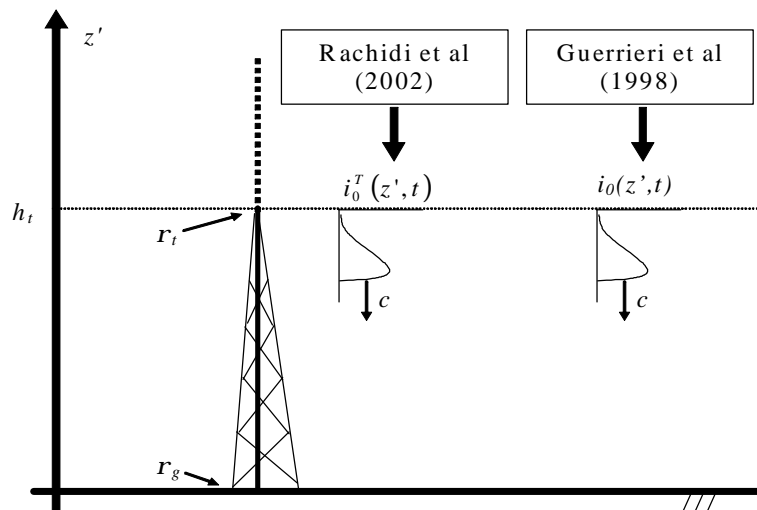


Figura 3.6. Representações utilizadas por Guerrieri et al (1998) e por Rachidi et al (2002).

A Figura 3.6 ilustra a diferença em relação à corrente incidente no topo da torre para um mesmo ponto  $z'$  e tempo  $t$ . Guerrieri et al (1998) consideram a corrente incidente  $i_0(z', t)$  no topo da torre com coeficiente de transmissão igual a 1, enquanto que Rachidi et al (2002) consideram a corrente  $i_0^T(z', t)$  no topo da torre, incluindo o coeficiente de transmissão diferente de 1. Para que o processo de “descontaminação” resulte na mesma corrente no topo da torre  $i_0(z', t)$  para os dois modelos, a seguinte relação deve ser satisfeita:

$$\frac{i_0^T(z', t)}{i_0(z', t)} = 1 - r_t \quad (3.13).$$



As Figuras 3.7 e 3.8, apresentadas por Bermudez et al (2003), comparam respectivamente as correntes no topo e em um ponto intermediário de uma torre de 248 m atingido por uma descarga, calculadas de acordo com os modelos de Guerrieri et al (1998) e de Rachidi et al (2002). Notam-se diferenças consideráveis entre os resultados obtidos com os dois modelos, principalmente na amplitude. Entretanto, embora os cálculos apresentados por Bermudez et al (2003) estejam corretos, tal comparação não é adequada, devido às considerações nos modelos, pois a corrente incidente no topo da torre não é a mesma nos dois modelos, diferindo pelo fator  $(1-r_t)$  como ilustrado na Figura 3.6.

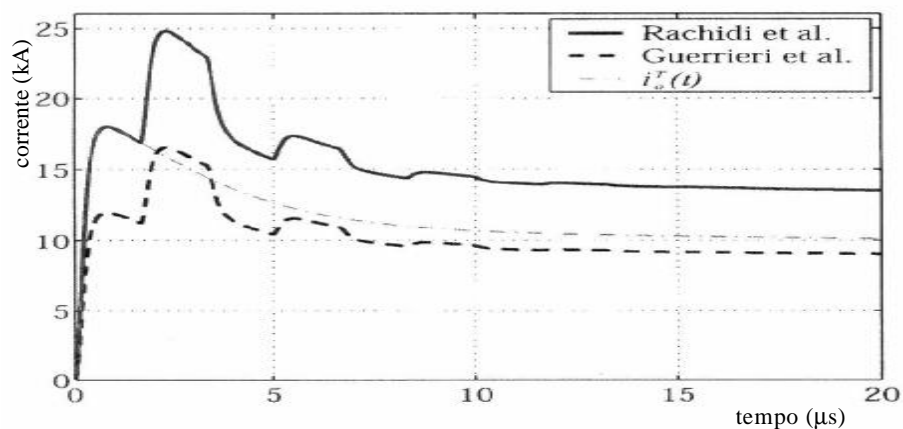


Figura 3.7. Curvas de corrente obtidas por Bermudez et al (2003) no topo de uma torre 248 m de altura ( $h_t = 248$  m) e com  $r_t = -0,5$  e  $r_g = 1$ .

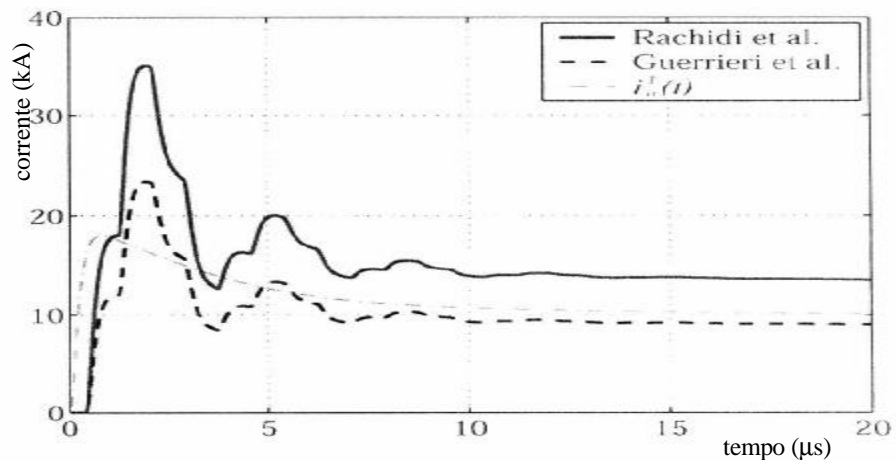


Figura 3.8. Curvas de corrente obtidas por Bermudez et al (2003) no ponto  $z' = 124$  m de uma torre de 248 m de altura ( $h_t = 248$  m) e com  $r_t = -0,5$  e  $r_g = 1$ .

As correntes mostradas nas Figuras 3.7 e 3.8 obtidas pelos modelos de Guerrieri et al (1998) e Rachidi et al (2002) apresentam formas de onda semelhantes nas duas situações indicadas, e diferindo, todavia, de forma considerável quanto às amplitudes.

Para o presente trabalho utilizou-se o modelo proposto por Rachidi et al (2002) que consideram a primeira descontinuidade existente entre o canal da descarga e o objeto elevado.

## 4 CORRENTES “CONTAMINADAS” E “DESCONTAMINADAS” – ESTUDO DE SENSIBILIDADE

A incidência de descargas atmosféricas em objetos elevados pode influenciar consideravelmente os parâmetros da corrente medida em um ponto do objeto, como o valor de pico e o tempo de frente da corrente em relação ao caso de descargas diretas no solo. Neste Capítulo, aspectos importantes relacionados aos parâmetros das descargas são simulados e avaliados. Essas simulações foram realizadas através dos programas computacionais CONTAMINATORRE e DESCONTAMINA, ambos elaborados em Matlab® e utilizando o modelo proposto por Rachidi et al (2002).

Para a análise do comportamento da corrente, as grandezas altura do objeto ( $h_t$ ), ponto de medição ( $h_s$ ), impedância do canal ( $Z_{ch}$ ), impedância da torre ( $Z_t$ ), resistência de terra ( $R_g$ ) e tempo de frente equivalente ( $t_f$ ) foram parametrizados, ou seja, uma grandeza foi variada em uma faixa de valores, sendo as outras mantidas invariáveis.

Uma forma de representação matemática das correntes de descargas é feita através da Função de Heidler, apresentada na equação (4.1). Ao contrário da primeira descarga, que pode ser representada através da equação (4.1) escolhendo-se valores convenientes para os parâmetros, as correntes das descargas subseqüentes geralmente são representadas através da soma de duas funções de Heidler. A Tabela 4.1 apresenta os valores dos parâmetros das duas funções que, somadas, dão origem a uma corrente típica de descargas subseqüentes.

$$i_0(t) = \frac{I_0}{h} \cdot \frac{\left(\frac{t}{t_1}\right)^{\frac{1}{n}}}{1 + \left(\frac{t}{t_1}\right)^n} \cdot \exp\left(-\frac{t}{t_2}\right) \quad (4.1),$$

$$h = \exp\left[-\left(\frac{t_1}{t_2}\right) \left(n \cdot \frac{t_2}{t_1}\right)^{\frac{1}{n}}\right]$$

onde,  $I_0$ : amplitude da corrente do canal;

$t_1$ : constante do tempo de frente da onda;

$t_2$ : constante de tempo de decaimento;

$h$ : fator de correção de amplitude;

$n$ : expoente (2, 3, ...,10).

Tabela 4.1 – Parâmetros da Função de Heidler para representação de uma corrente típica de descarga subsequente.

$I_{11}$			$I_{12}$		
$I_1$ (kA)	$t_{11}$ ( $\mu$ s)	$t_{21}$ ( $\mu$ s)	$I_2$ (kA)	$t_{12}$ ( $\mu$ s)	$t_{22}$ ( $\mu$ s)
10,7	0,25	2,5	6,5	2,1	230

A soma das duas funções com os parâmetros indicados na Tabela 4.1 ( $I_{11}$  e  $I_{12}$ ) resulta na curva mostrada na Figura 4.1.

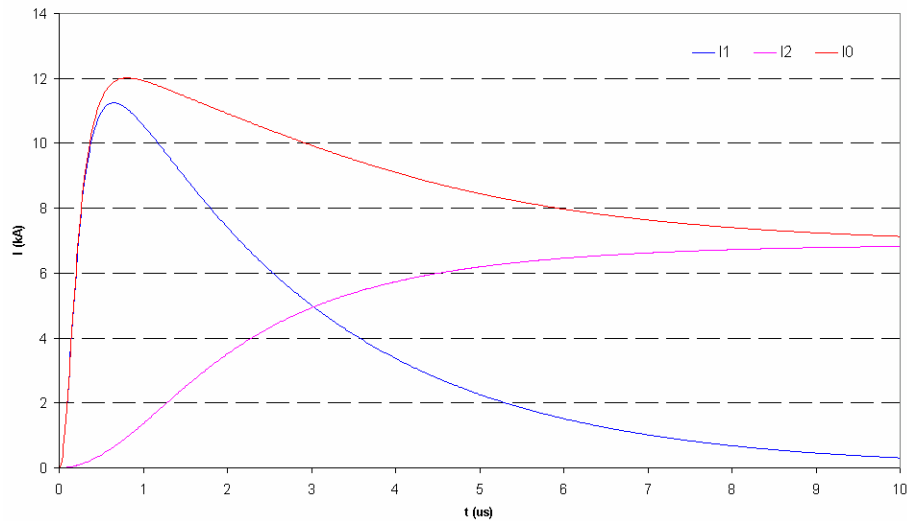


Figura 4.1. Representação de uma corrente típica de descarga subsequente através da soma de duas funções de Heidler, considerando os parâmetros indicados na Tabela 4.1.

Da Figura 4.1 tem-se:

- I1: corrente correspondente a  $I_{11}$  (Tabela 4.1);
- I2: corrente correspondente a  $I_{12}$  (Tabela 4.1);
- I0: soma de I1 e I2 (corrente típica de descarga subsequente).

Todavia, conforme mencionado anteriormente, é possível representar correntes típicas da primeira descarga através de apenas uma Função de Heidler. Nas simulações apresentadas neste Capítulo, a corrente foi representada através dos parâmetros indicados na Tabela 4.2 cuja onda de corrente está apresentada na Figura 4.2, que corresponde a uma corrente com 36,7 kA de amplitude.

Nota-se que os parâmetros  $t_{11}$  e  $t_{21}$  não correspondem ao tempo equivalente da frente e ao tempo de cauda respectivamente, pois são parâmetros utilizados para ajustar a forma da curva a fim de obter os valores  $T_{30/90}$  e  $T_{50}$  desejados.  $I_1$  não corresponde ao valor de pico do impulso de corrente, uma vez que o valor de pico é corrigido por um fator  $1/h$  conforme mostra a equação (4.1).

Tabela 4.2 – Parâmetros da Função de Heidler para representação de uma corrente típica da primeira descarga (utilizada nas simulações apresentadas neste Capítulo).

Primeira descarga		
$I_1$ (kA)	$t_{11}$ ( $\mu$ s)	$t_{21}$ ( $\mu$ s)
35	0,7	105

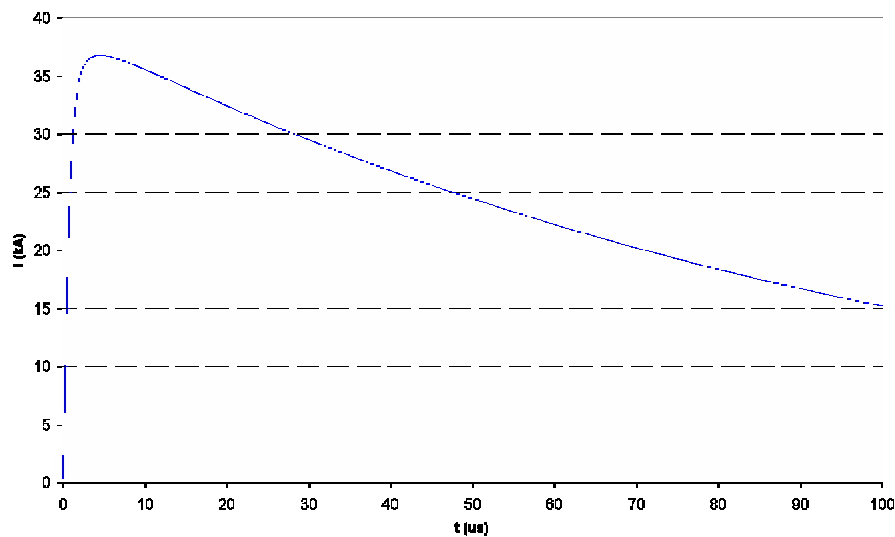


Figura 4.2. Corrente utilizada nas simulações (valores dos parâmetros indicados na Tabela 4.2).

A corrente indicada na Figura 4.2 tem tempo de frente equivalente ( $T_{d30/90}$ ) igual a  $2 \mu\text{s}$ , ou

$$\text{seja, } T_{d30/90} = \frac{T_{30/90}}{0,6} = \frac{1,25}{0,6} = 2,0 \mu\text{s, e o tempo de cauda } T_{50} \text{ de aproximadamente } 80 \mu\text{s.}$$

O processo de “contaminação” da corrente foi realizado com a aplicação do programa computacional CONTAMINATORRE e dado de entrada gerado conforme equação (4.1) e Tabela 4.2. Verificou-se também que essa simulação (“contaminação” de corrente) pode ser feita com o simulador de circuitos Pspice, utilizando-se o mesmo dado de entrada e modelo de circuito elétrico equivalente proposto por Rakov (2001) ilustrada na Figura 3.4. A Figura 4.3 compara a corrente obtida pelo programa CONTAMINATORRE com as correntes obtidas por Bermudez et al (2003) apresentadas na Figura 3.8. Nota-se na Figura 4.3 que as correntes calculadas pelo programa CONTAMINATORRE e por Rachidi et al (2002) são praticamente iguais.

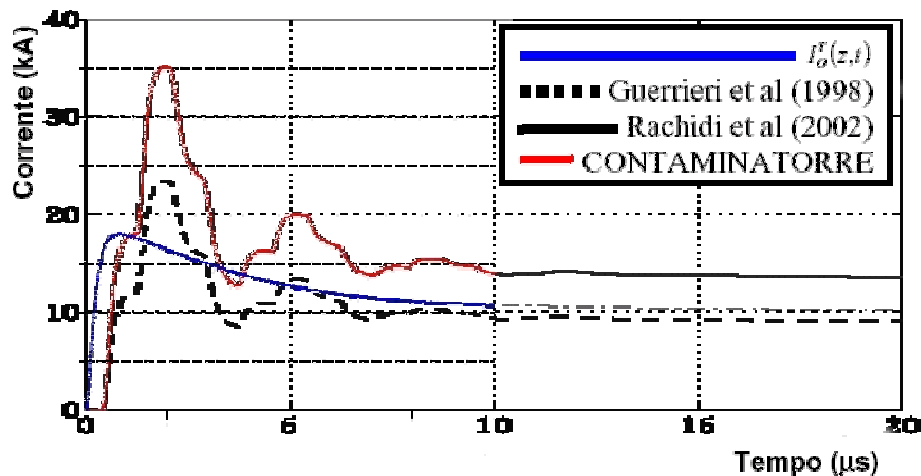


Figura 4.3. Comparação ilustrativa entre a corrente obtida pelo programa CONTAMINATORRE e aqueles referentes à Figura 3.8 (BERMUDEZ et al, 2003) para as seguintes condições:  $h_t = 248 \text{ m}$ ;  $h_s = 124 \text{ m}$ ;  $r_t = -0,5$  e  $r_g = 1$ .

Na Figura 4.3 tem-se:

- $i_0^T(t)$ : corrente “descontaminada” obtida a partir da equação (3.11);
- Guerrieri et al (1998): corrente “contaminada” segundo a equação (3.4);
- Rachidi et al (2002): corrente “contaminada” segundo a equação (3.10).

Para a realização do processo de “descontaminação” foi utilizado o programa computacional DESCONTAMINA. Para a validação desse programa fez-se o processo de

“descontaminação” da corrente “contaminada” pelo programa CONTAMINATORRE e, em seguida, a corrente “descontaminada” foi comparada à onda obtida pela Função de Heidler. A equação utilizada para realizar o processo de “descontaminação” é:

$$\begin{cases} i_0(h_t, t) = \frac{i(0, t)}{(1+r_g)(1-r_t)} & \text{para } t \leq \frac{2h_t}{c} \\ i_0(h_t, t) = \frac{1}{(1+r_g)} \left\{ \frac{i_0(0, t)}{(1-r_t)} - \sum_{n=1}^N \left[ (r_g^n r_t^n + r_g^{n+1} r_t^n) i_0 \left( h_t, t - \frac{2nh_t}{c} \right) \right] \right\} & \text{para } t > \frac{2h_t}{c} \end{cases} \quad (4.2).$$

Na equação (4.2), a “descontaminação” da corrente é realizada considerando-se os dados referentes à base da torre; a corrente “descontaminada”, por sua vez, é feita referenciando-se no topo dessa mesma torre.

Ao longo do desenvolvimento do programa computacional notou-se a importância de se realizar o processo de “descontaminação” da corrente com grande número de pontos para o dado de entrada.

Todas as simulações foram baseadas no fenômeno representado pela Figura 3.1b. Os coeficientes de reflexão no topo e na base da torre foram calculados pelas equações (3.2) e (3.3), respectivamente.

Para as simulações no Pspice, os valores  $L$  (indutância por unidade de comprimento) e  $C$  (capacitância por unidade de comprimento) foram calculados a partir das equações (4.3) e (4.4), respectivamente.

$$Z_t = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (4.3)$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4.4)$$

Na equação (4.3)  $Z_t$  corresponde à impedância da torre, e na equação (4.4),  $v$  é a velocidade da frente da onda de corrente na torre, sendo que, em geral, é da ordem da velocidade da luz, ou seja,  $c$ . Para as simulações foi utilizado o valor da velocidade da luz ( $3 \times 10^8$  m/s).

A comparação entre os resultados obtidos em Pspice e CONTAMINATORRE foi feita utilizando-se o mesmo dado para obtenção da Figura 4.3. Para isso, adotou-se  $Z_t = 275 \Omega$ . Assim, aplicando-se as equações (4.1) e (4.2) obteve-se  $Z_{ch} = 875 \Omega$  e  $R_g = 0 \Omega$ .

Sabendo-se que  $v = 3 \times 10^8$  m/s e  $Z_t = 275 \Omega$  e utilizando as equações (4.3) e (4.4) obteve-se  $L = 0,917 \mu\text{H/m}$  e  $C = 12,12 \text{ pF/m}$ . Esses resultados foram utilizados como parâmetros de simulação no circuito em Pspice ilustrado na Figura 4.4.

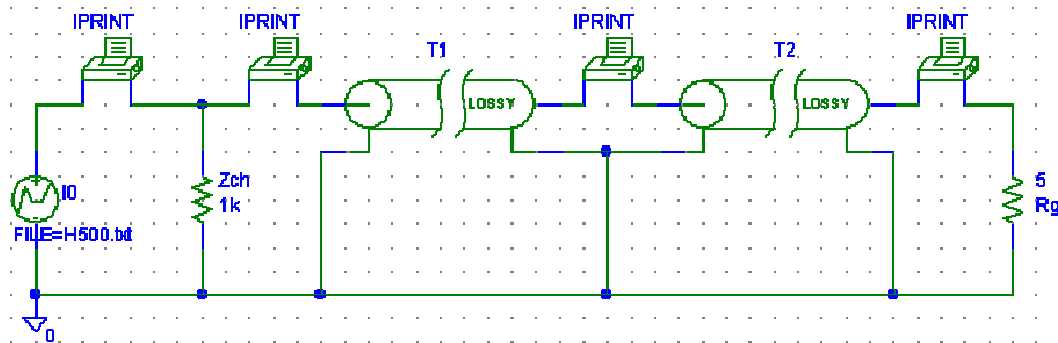


Figura 4.4. Circuito de simulação (Pspice).

Na Figura 4.4 tem-se:

- I0: arquivo contendo dados da corrente “descontaminada”;
- IPRINT: impressora de dados da corrente;
- Zch: impedância do canal da descarga;
- T1 e T2: linha de transmissão;
- Rg: resistência de terra.

As ondas de correntes obtidas para  $h_s = 124$  m da estrutura através dos programas Pspice e CONTAMINATORRE estão mostradas na Figura 4.5 juntamente com a corrente “descontaminada” (I0). Nota-se que as correntes “contaminadas” são praticamente idênticas.



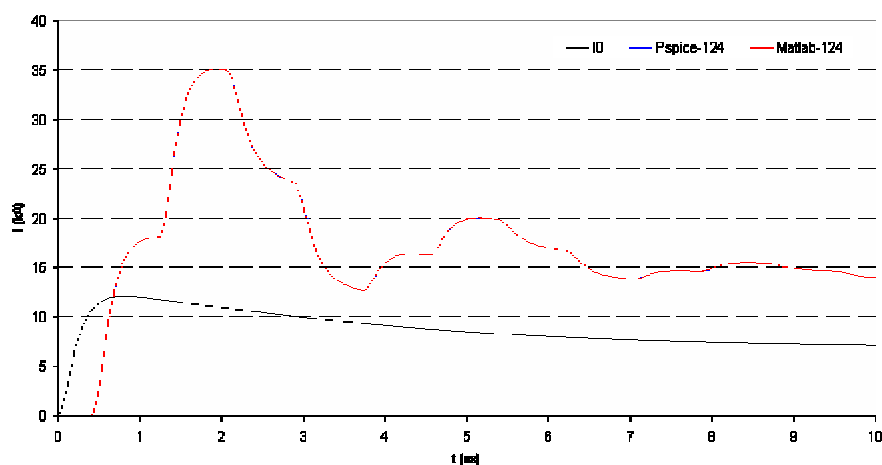


Figura 4.5. Comparação entre as correntes obtidas através dos programas Pspice e CONTAMINATORRE para o caso indicado na Figura 4.3 ( $h_s = 124$  m,  $h_t = 248$  m,  $r_t = -0,5$ ,  $r_g = 1$ ).

Na Figura 4.5 tem-se:

- I0: Função de Heidler representando a corrente “descontaminada”;
- Pspice-124: corrente obtida através do simulador Pspice;
- Matlab-124: corrente obtida através do programa CONTAMINATORRE.

A Figura 4.5 mostra claramente uma boa concordância entre os resultados obtidos pelos programas CONTAMINATORRE e Pspice. Todavia, é necessário salientar que o programa Pspice não realiza o processo de “descontaminação” de uma onda de corrente “contaminada”.

A Figura 4.6 mostra resultados de medição referentes à torre de Peissenberg, com dados de corrente coletados em dois pontos distintos da torre, um próximo ao topo, à altura de 167 m, e outro próximo à base, à 13 m do solo (BERMUDEZ et al, 2003).

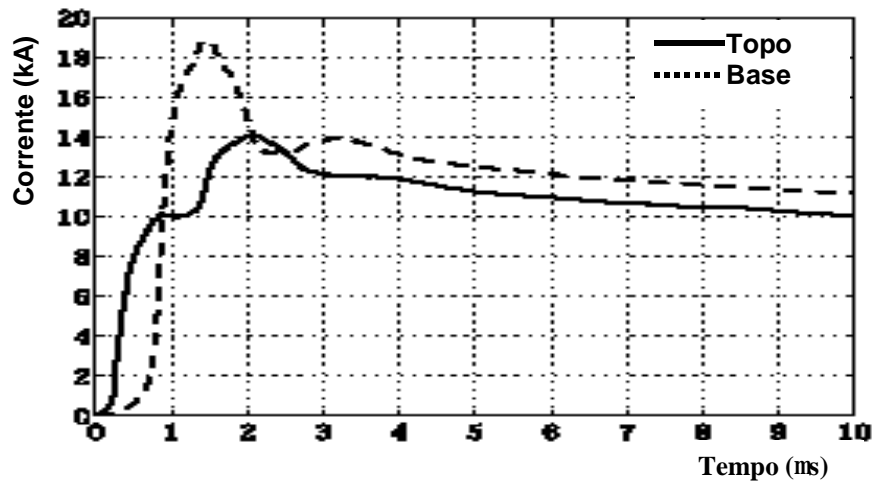


Figura 4.6. Corrente medida na torre de Peissenberg em Janeiro 1998 (adaptada de Bermudez et al (2003)).

A Figura 4.6 mostra claramente a influência das reflexões que ocorrem nos pontos de descontinuidade das impedâncias (topo e base da torre). Verifica-se também que, na situação considerada o valor de pico da corrente na base é maior que no topo da estrutura. É importante destacar que essas duas correntes advêm da mesma descarga.

#### 4.1. AVALIAÇÃO DA “CONTAMINAÇÃO” DA CORRENTE

Nesse tópico são realizadas simulações com o intuito de avaliar o comportamento da onda de corrente em diversas situações. Considera-se para isso uma situação base, ou seja, uma descarga incidente, conforme mostra a Figura 4.2, no topo de uma torre, com avaliação da corrente na base ( $h_s = 0$  m), e considerando conhecidos os valores  $h_t$ ,  $Z_t$  e  $R_g$  e adotando um valor típico para  $Z_{ch}$ . O propósito é avaliar a influência de cada um desses parâmetros na distribuição da corrente na estrutura.

A referência para os parâmetros utilizados foi a torre existente no Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo (IEE/USP), a qual apresenta as seguintes características:

- $h_t = 62,5$  m;
- $h_s = 0$  m;
- $Z_t = 275 \Omega$ ;
- $R_g = 5 \Omega$ .

#### 4.1.1. Influência da altura do objeto $h_t$

Para a realização das simulações foram utilizados os seguintes valores de  $h_t$  para o objeto elevado: 0 m, 62,5 m, 125 m, 250 m e 500 m. Esses valores abrangem alturas de algumas das estruturas utilizadas para os estudos das descargas atmosféricas citados por Rakov (2002), sendo os resultados apresentados na Figura 4.7.

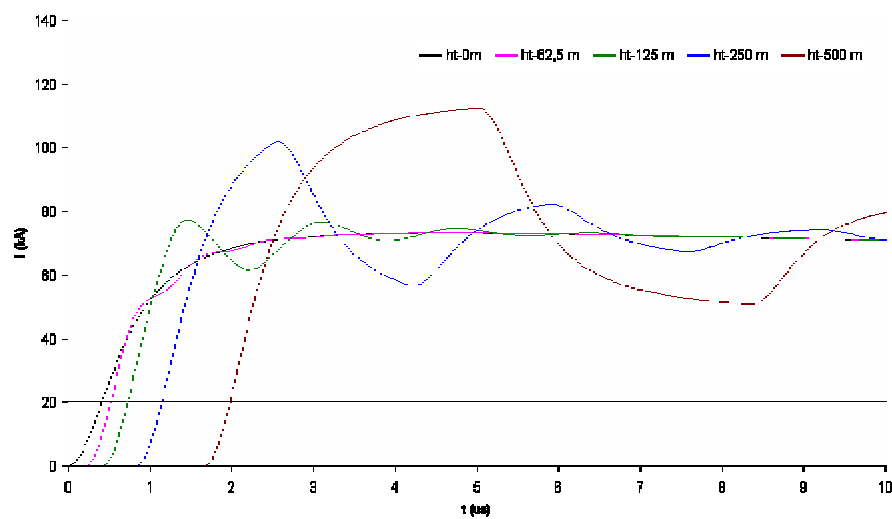


Figura 4.7. Correntes “contaminadas” avaliadas na base da estrutura considerando estruturas com diferentes alturas ( $h_s = 0$  m,  $Z_{ch} = 1$  k $\Omega$ ,  $Z_t = 275 \Omega$  e  $R_g = 5 \Omega$ ).

Nota-se que a corrente referente à  $h_t=0\text{m}$  corresponde à corrente no caso de descarga incidente diretamente no solo, ou seja, à corrente “pura”,  $h_t=62,5\text{m}$  à corrente na base de uma estrutura de 62,5 m de altura,  $h_t=125\text{m}$  à corrente na base de uma estrutura de 125 m de altura,  $h_t=250\text{m}$  à corrente na base de uma estrutura de 250 m de altura e  $h_t=500\text{m}$  à corrente na base de uma estrutura de 500 m de altura.

Pela Figura 4.7 verificam-se poucas oscilações para estruturas “baixas”, ou seja, com alturas de aproximadamente 60m e grandes oscilações no caso de estruturas elevadas, característica também observadas por Guerrieri et al (1998). Para estruturas “baixas” nota-se que o tempo de frente equivalente e o valor de pico da corrente não sofrem modificações significativas em relação ao caso de descargas incidentes diretamente no solo, ou seja, em relação à corrente “pura”. Já para as estruturas elevadas, o valor de pico da corrente sofre considerável elevação em relação a corrente “pura”.

#### ***4.1.2. Influência da posição do ponto de medição $h_s$***

O parâmetro  $h_s$  foi variado para três valores de  $h_t$  e verificou-se o comportamento da onda de corrente para três diferentes posições da torre: base ( $h_s = 0\text{ m}$ ), centro ( $h_s = h_t/2$ ) e topo ( $h_s = h_t$ ). Os valores de  $h_t$  utilizados foram 10 m, 62,5 m e 500 m, conforme mostram as Figuras 4.8, 4.9 e 4.10, respectivamente.

As formas das ondas das correntes foram comparadas com a onda de corrente “pura” ao nível do solo, ou seja, de uma descarga incidente diretamente no solo.

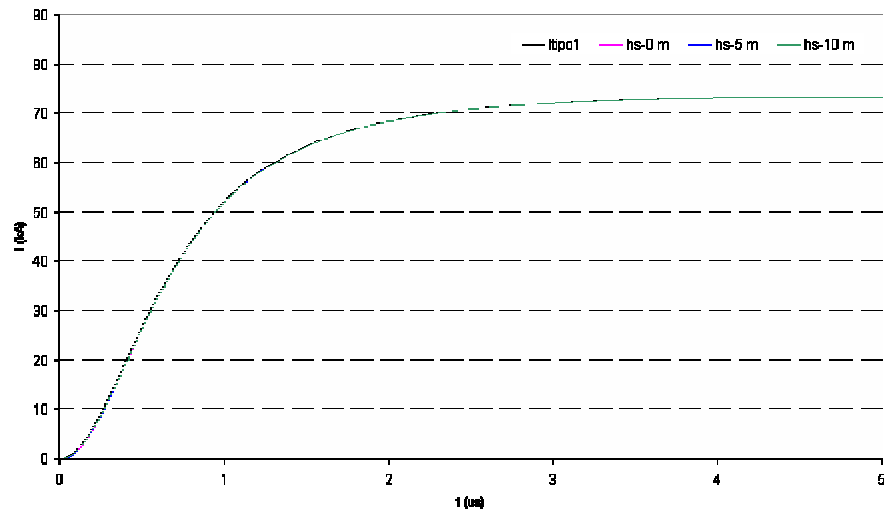


Figura 4.8. Correntes em diferentes posições da estrutura para uma torre ( $h_t = 10$  m,  $h_{base} = 0$  m,  $h_{centro} = 5$  m,  $h_{topo} = 10$  m,  $Z_{ch} = 1$  k $\Omega$ ,  $Z_t = 275$   $\Omega$  e  $R_g = 5$   $\Omega$ ).

Na Figura 4.8 tem-se:

- Itipo1: corrente “pura” ( $Z_{ch} = 1$  k $\Omega$  e  $R_g = 5$   $\Omega$ );
- hs-0m: corrente obtida no nível do solo;
- hs-5m: corrente obtida no ponto médio da torre;
- hs-10m: corrente obtida no topo da torre.

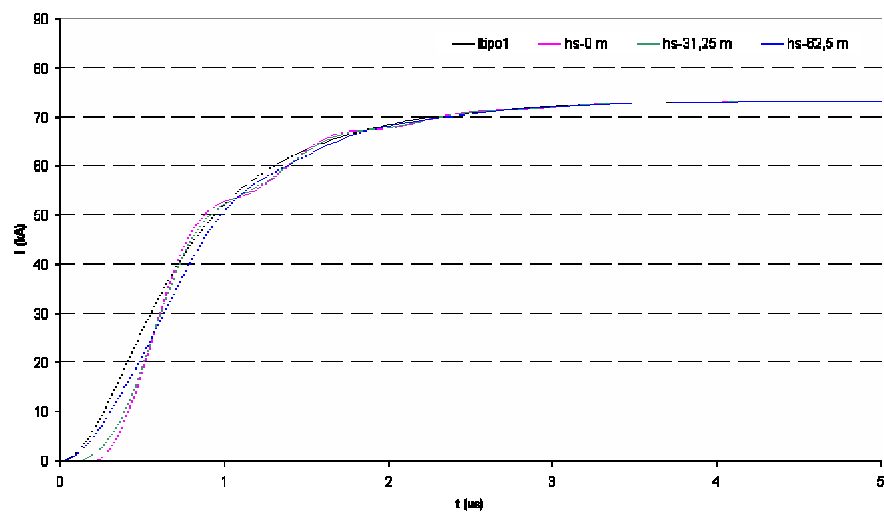


Figura 4.9. Correntes em diferentes posições da estrutura para uma torre ( $h_t = 62,5$  m,  $h_{base} = 0$  m,  $h_{centro} = 31,25$  m,  $h_{topo} = 62,5$  m,  $Z_{ch} = 1$  k $\Omega$ ,  $Z_t = 275$   $\Omega$  e  $R_g = 5$   $\Omega$ ).

Na Figura 4.9 tem-se:

- Itipo1: corrente “pura” ( $Z_{ch} = 1 \text{ k}\Omega$  e  $R_g = 5 \Omega$ );
- hs-0m: corrente obtida no nível do solo;
- hs-31,25m: corrente obtida no ponto médio da torre;
- hs-62,5m: corrente obtida no topo da torre.

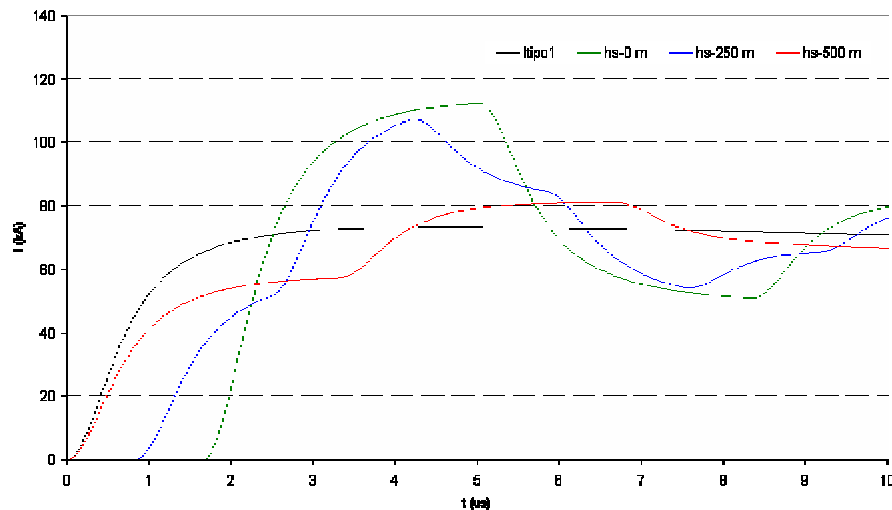


Figura 4.10. Correntes em diferentes posições da estrutura para uma torre ( $h_t = 500 \text{ m}$ ,  $h_{base} = 0 \text{ m}$ ,  $h_{centro} = 250 \text{ m}$ ,  $h_{topo} = 500 \text{ m}$ ,  $Z_{ch} = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $Z_t = 275 \Omega$  e  $R_g = 5 \Omega$ ).

Na Figura 4.10 tem-se:

- Itipo1: corrente “pura” ( $Z_{ch} = 1 \text{ k}\Omega$  e  $R_g = 5 \Omega$ );
- hs-0m: corrente obtida no nível do solo;
- hs-250m: corrente obtida no ponto médio da torre;
- hs-500m: corrente obtida no topo da torre.

As simulações mostram que para torres “baixas” a influência da “contaminação” da corrente em função do ponto de obtenção da mesma é pequena, fatos observados nas Figuras 4.8 e 4.9 para as três posições consideradas. Verifica-se ainda que as ondas de correntes “contaminadas” e “puras” são praticamente iguais. A Figura 4.9 mostra a situação de “contaminação” da corrente para o caso da torre IEE/USP e nota-se que a influência da torre não é tão significativa em termos de valor de pico e tempo de frente quando essas correntes

são comparadas com a corrente “pura”. Tal fato está de acordo com os estudos realizados por Visacro et al (2004). Já para torres elevadas como a de 500 m, a influência da altura da estrutura é significativa, como mostrado na Figura 4.10, sendo esse fato verificado pelas oscilações das correntes devido às diversas reflexões no topo e na base da estrutura. Nessa figura nota-se ainda que o maior valor de pico da corrente é obtido na base da estrutura, o que está de acordo com os estudos realizados por Guerrieri et al (1998).

#### 4.1.3. Influência da impedância do canal $Z_{ch}$

Rakov (2001, 2002) em seus estudos cita estimativas de valores da impedância do canal  $Z_{ch}$  na faixa de  $600 \Omega$  a  $2,5 \text{ k}\Omega$  com base em registros oscilográficos de correntes de descargas atmosféricas na torre de Ostankino, cuja altura é de 540 m e está localizada em Moscou. A impedância do canal foi calculada a partir de medições efetuadas à altura de 533 m, assumindo para a impedância da torre o valor de  $300 \Omega$ .

A partir desses estudos adotou-se no presente trabalho, para avaliação da influência da impedância do canal, os seguintes valores de  $Z_{ch}$ :  $500 \Omega$ ,  $1 \text{ k}\Omega$  e  $2,5 \text{ k}\Omega$ . A Figura 4.11 apresenta as correntes “puras” obtidas para essas três condições.

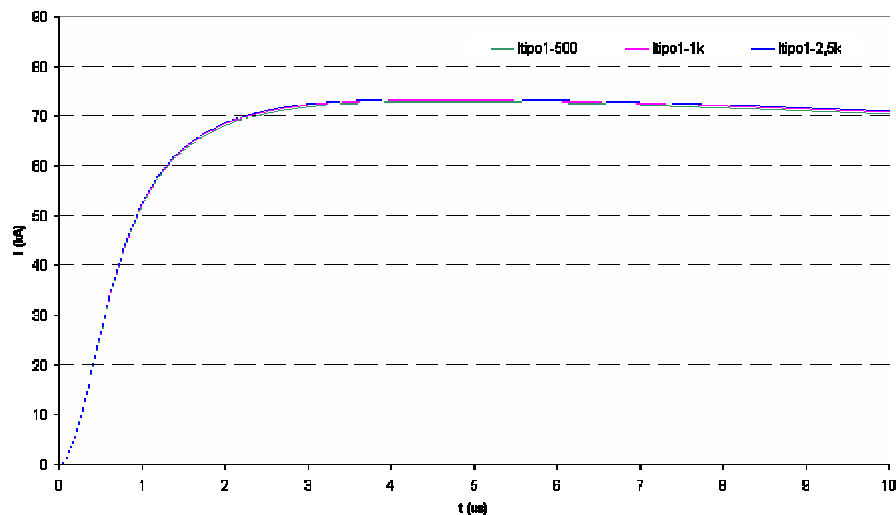


Figura 4.11. Correntes “puras” em função da impedância do canal ( $Z_{ch1} = 500 \Omega$ ,  $Z_{ch2} = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $Z_{ch3} = 2,5 \text{ k}\Omega$ ,  $Z_t = 275 \Omega$  e  $R_g = 5 \Omega$ ).

Na Figura 4.11, Itipo1-500 corresponde à corrente para  $Z_{ch} = 500 \Omega$ , Itipo1-1k para  $Z_{ch} = 1 \text{ k}\Omega$  e Itipo1-2,5k para  $Z_{ch} = 2,5 \text{ k}\Omega$ . Nota-se que as ondas das correntes “puras” são praticamente coincidentes, não variando de forma significativa em função da impedância do canal. A Figura 4.12 mostra a comparação obtida para as correntes “contaminadas” na base da torre considerando a variação de  $Z_{ch}$ .

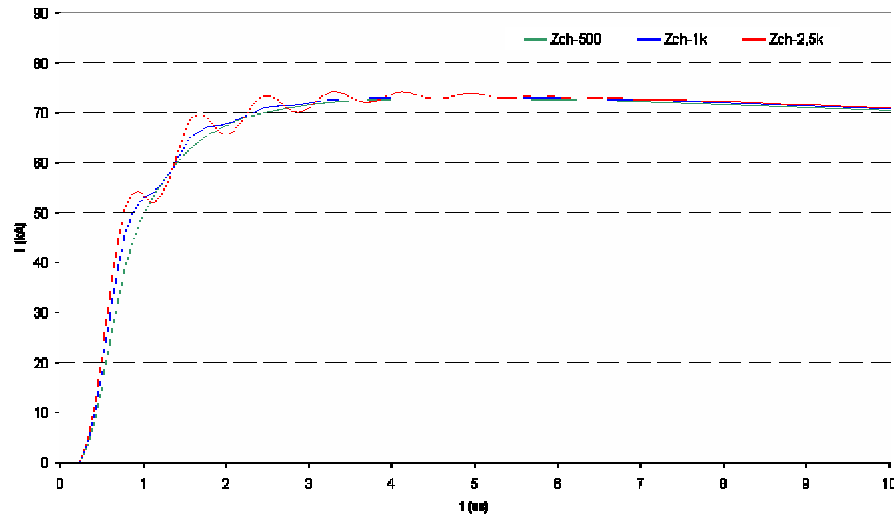


Figura 4.12. Correntes “contaminadas” na base da torre em função da impedância do canal ( $h_t = 62,5 \text{ m}$  com  $h_s = 0 \text{ m}$ ,  $Z_{ch1} = 500 \Omega$ ,  $Z_{ch2} = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $Z_{ch3} = 2,5 \text{ k}\Omega$ ,  $Z_t = 275 \Omega$  e  $R_g = 5 \Omega$ ).

Na Figura 4.12,  $Z_{ch} = 500 \Omega$ ,  $Z_{ch} = 1 \text{ k}\Omega$  e  $Z_{ch} = 2,5 \text{ k}\Omega$  correspondem às correntes para os casos de impedâncias do canal de  $500 \Omega$ ,  $1 \text{ k}\Omega$  e  $2,5 \text{ k}\Omega$ , respectivamente. Diferentemente das ondas de correntes “puras” mostradas na Figura 4.11, a Figura 4.12 mostra que a impedância do canal influencia na “contaminação” das correntes para grandes valores de  $Z_{ch}$ , fato observado pelas oscilações da corrente. Por outro lado, tanto o tempo de frente quanto o valor de pico da corrente apresentam valores semelhantes. As Figuras 4.13, 4.14 e 4.15 mostram comparações realizadas entre as correntes “puras” e “contaminadas” para os três valores de  $Z_{ch}$  considerados.



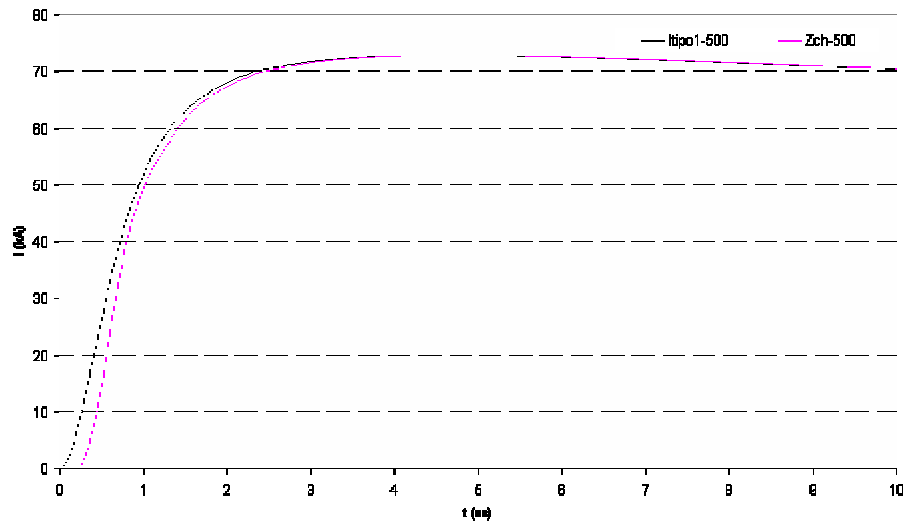


Figura 4.13. Correntes “pura” e “contaminada” para  $Z_{ch} = 500 \Omega$   
 ( $h_t = 62,5$  m com  $h_s = 0$  m,  $Z_t = 275 \Omega$  e  $R_g = 5 \Omega$ ).

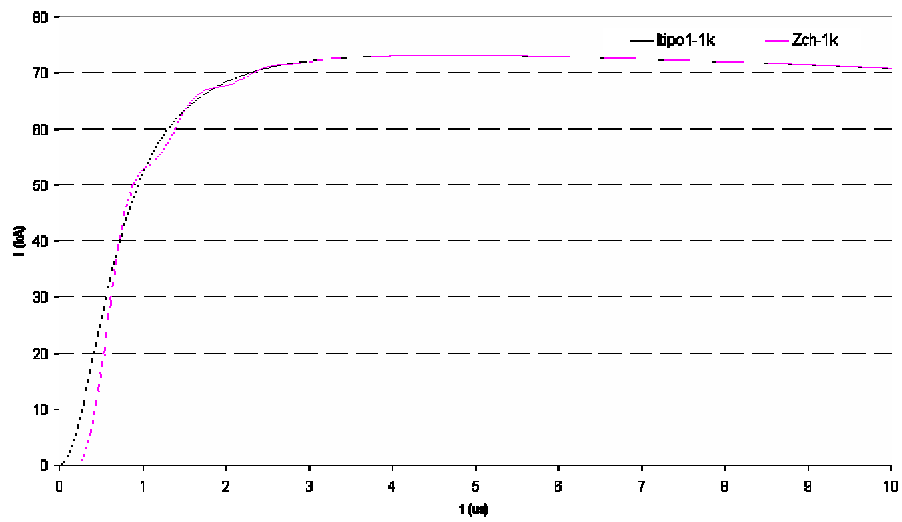


Figura 4.14. Correntes “pura” e “contaminada” para  $Z_{ch} = 1 \text{ k}\Omega$   
 ( $h_t = 62,5$  m com  $h_s = 0$  m,  $Z_t = 275 \Omega$  e  $R_g = 5 \Omega$ ).

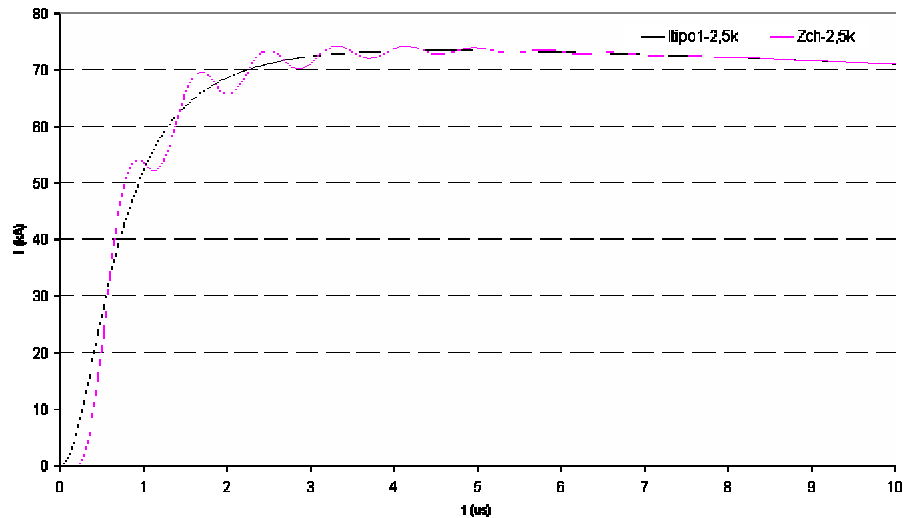


Figura 4.15. Correntes “pura” e “contaminada” para  $Z_{ch} = 2,5 \text{ k}\Omega$   
 ( $h_t = 62,5 \text{ m}$  com  $h_s = 0 \text{ m}$ ,  $Z_t = 275 \Omega$  e  $R_g = 5 \Omega$ ).

Observa-se através da Figura 4.13 que existe certa diferença entre os tempos de frente das correntes “pura” e “contaminada”. Nota-se nessa figura que praticamente não existem oscilações para  $Z_{ch} = 500 \Omega$ , enquanto que as correntes mostradas na Figura 4.14 apresentam valores de crista e tempos de frente muito semelhantes. A Figura 4.15 mostra várias oscilações na frente da corrente “contaminada” diferentemente da corrente “pura”.

As simulações mostram que as oscilações causadas pela “contaminação” da corrente devido às reflexões no topo e na base do objeto, tendem a aumentar à medida que aumenta o valor da impedância do canal de descarga.

#### 4.1.4. Influência da impedância do objeto elevado $Z_t$

Neste item é verificado o comportamento da corrente em função da variação da impedância da torre  $Z_t$  para os seguintes valores:  $138 \Omega$ ,  $275 \Omega$  e  $550 \Omega$ . Esses valores são combinados com dois diferentes valores de impedância do canal, ou seja,  $Z_{ch}$  ( $500 \Omega$  e  $1 \text{ k}\Omega$ ) para a realização das análises.

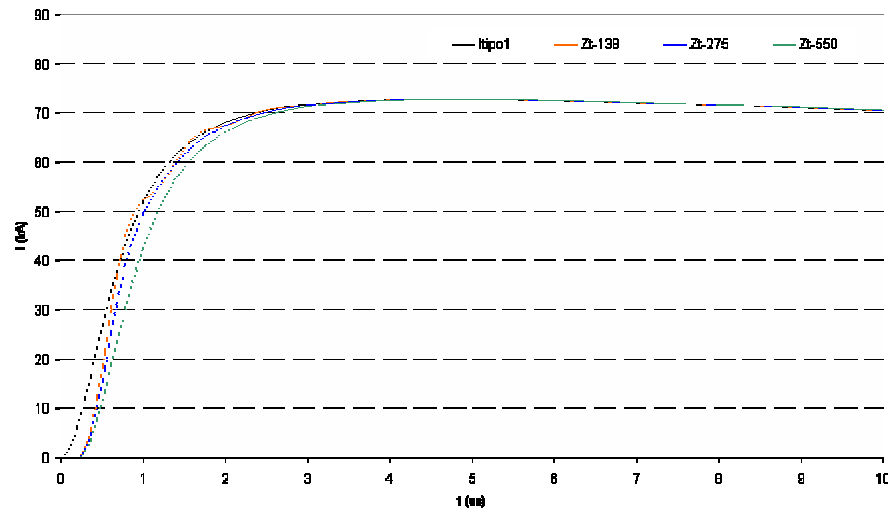


Figura 4.16. Corrente “pura” e correntes “contaminadas” em função da impedância da torre ( $h_t = 62,5$  m,  $h_s = 0$  m,  $Z_{ch} = 500 \Omega$ ,  $Z_{t1} = 138 \Omega$ ,  $Z_{t2} = 275 \Omega$  e  $Z_{t3} = 550 \Omega$  e  $R_g = 5 \Omega$ ).

Na Figura 4.16, a curva Itipo1 corresponde à descarga incidente diretamente no solo ou corrente “pura”, Zt-138 à corrente de descarga incidente em uma torre com  $Z_t = 138 \Omega$ , Zt-275 à corrente de descarga incidente em uma torre com  $Z_t = 275 \Omega$  e Zt-550 à corrente de descarga incidente em uma torre com  $Z_t = 550 \Omega$ . As ondas nessa figura mostram que o efeito da impedância do objeto se verifica principalmente no tempo de frente da corrente, sendo que os valores de pico permanecem praticamente inalterados. Nota-se que menor tempo de frente para o caso  $Z_t = 138 \Omega$ . A Figura 4.17 mostra as correntes obtidas para  $Z_{ch} = 1 \text{ k}\Omega$ .

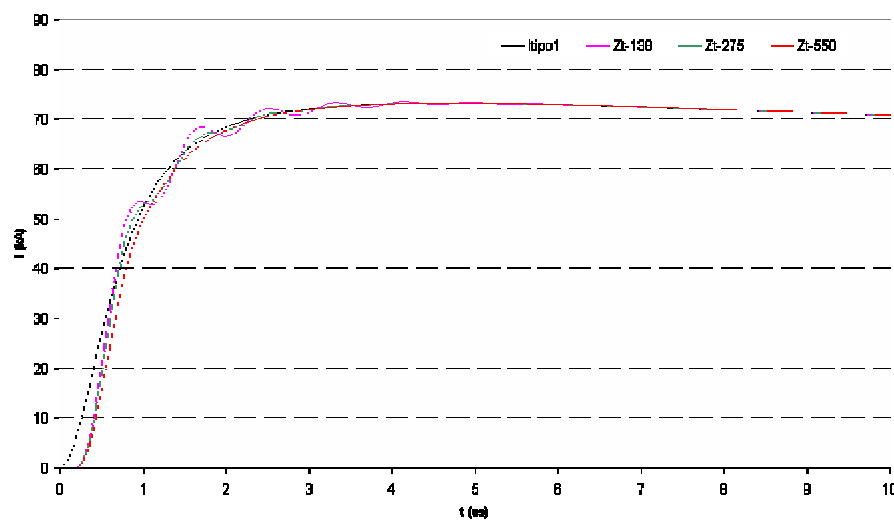


Figura 4.17. Corrente “pura” e correntes “contaminadas” em função da impedância da torre ( $h_t = 62,5$  m,  $h_s = 0$  m,  $Z_{ch} = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $Z_{t1} = 138 \Omega$ ,  $Z_{t2} = 275 \Omega$  e  $Z_{t3} = 550 \Omega$  e  $R_g = 5 \Omega$ ).

As correntes mostradas na Figura 4.17, semelhantemente à Figura 4.16, apresentam pequenas diferenças no tempo de frente, sendo que o valor de pico se mantém praticamente inalterado. Nessa figura verifica-se que a corrente referente à impedância do objeto de  $138 \Omega$  apresenta oscilações na parte frontal da onda de corrente, diferentemente das demais correntes.

#### 4.1.5. Influência da resistência de terra $R_g$

As Figuras 4.18 e 4.19 mostram o comportamento da onda de corrente face à variação da resistência de terra  $R_g$  para  $5 \Omega$ ,  $50 \Omega$ ,  $100 \Omega$  e  $1 \text{ k}\Omega$ . Esses valores foram combinados com dois valores de impedância da torre  $Z_t$ :  $138 \Omega$  e  $275 \Omega$ . A Figura 4.18 mostra as correntes para  $Z_t = 138 \Omega$  e a Figura 4.19 para  $Z_t = 275 \Omega$ .

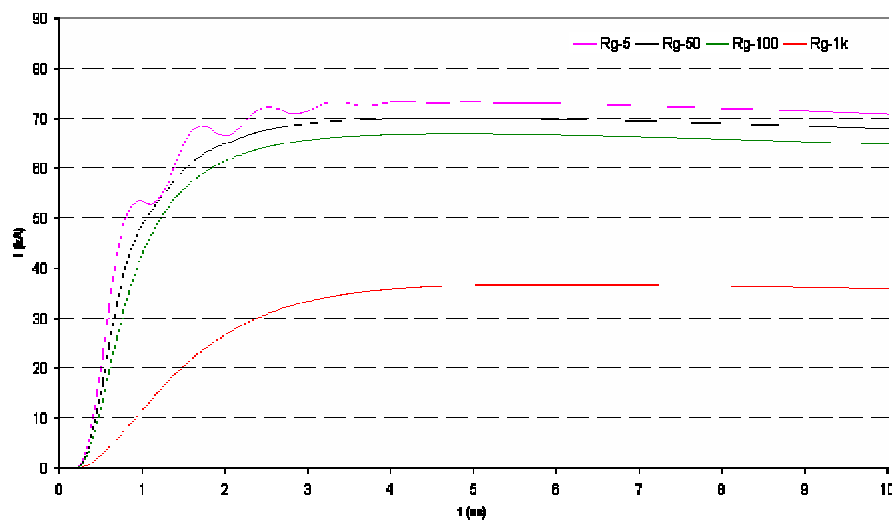


Figura 4.18. Correntes “contaminadas” em função da variação da resistência de terra ( $h_t = 62,5 \text{ m}$ ,  $h_s = 0 \text{ m}$ ,  $Z_{ch} = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $Z_t = 138 \Omega$ ,  $R_{g1} = 5 \Omega$ ,  $R_{g2} = 50 \Omega$ ,  $R_{g3} = 100 \Omega$  e  $R_{g4} = 1 \text{ k}\Omega$ ).

Na Figura 4.18 tem-se:

- Rg-5: corrente “contaminada” referente à resistência de terra igual a  $5 \Omega$ ;
- Rg-50: corrente “contaminada” referente à resistência de terra igual a  $50 \Omega$ ;
- Rg-100: corrente “contaminada” referente à resistência de terra igual a  $100 \Omega$ ;

- Rg-1k: corrente “contaminada” referente à resistência de terra igual a 1 k $\Omega$ .

Nota-se pela Figura 4.18 que o valor de pico da corrente tende a diminuir com o aumento do valor da resistência de terra sem apresentar muita alteração no tempo de frente entre as ondas de correntes.

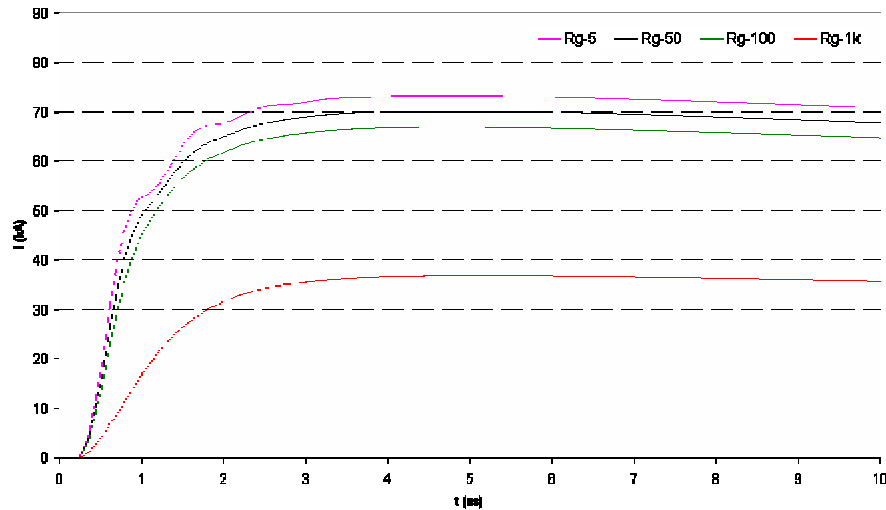


Figura 4.19. Correntes “contaminadas” em função da variação da resistência de terra ( $h_t = 62,5$  m,  $h_s = 0$  m,  $Z_{ch} = 1$  k $\Omega$ ,  $Z_t = 275$   $\Omega$ ,  $R_{g1} = 5$   $\Omega$ ,  $R_{g2} = 50$   $\Omega$ ,  $R_{g3} = 100$   $\Omega$  e  $R_{g4} = 1$  k $\Omega$ ).

De forma similar à Figura 4.18, a Figura 4.19 mostra que elevados valores de resistência de terra acarretam diminuição do valor de pico da corrente. Para os mesmos valores de resistências de terra considerados nas Figuras 4.18 e 4.19 foram obtidas as correntes “puras” mostradas na Figura 4.20.

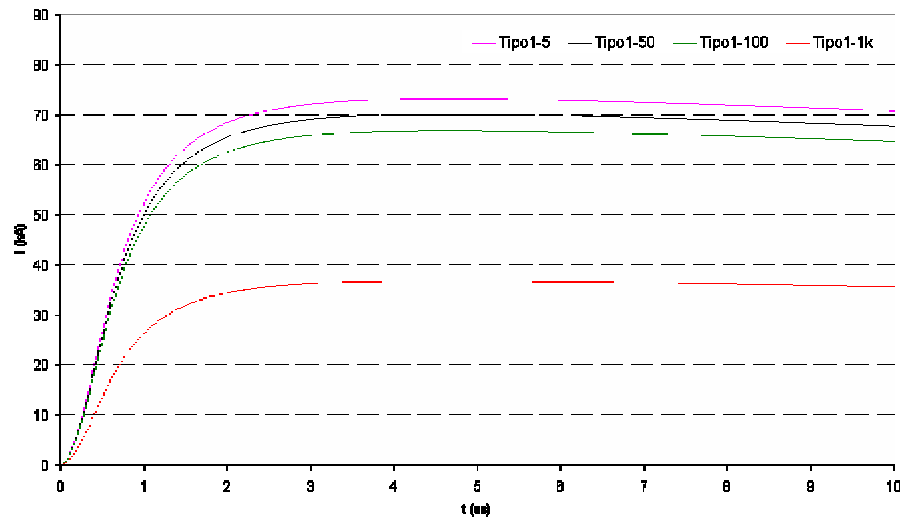


Figura 4.20. Correntes “puras” para diferentes valores de  $R_g$   
 ( $Z_{ch} = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $R_{g1} = 5 \text{ }\Omega$ ,  $R_{g2} = 50 \text{ }\Omega$ ,  $R_{g3} = 100 \text{ }\Omega$  e  $R_{g4} = 1 \text{ k}\Omega$ ).

Na Figura 4.20 tem-se que:

- Tipo1-5: corrente “pura” para  $R_g = 5 \text{ }\Omega$ ;
- Tipo1-50: corrente “pura” para  $R_g = 50 \text{ }\Omega$ ;
- Tipo1-100: corrente “pura” para  $R_g = 100 \text{ }\Omega$ ;
- Tipo1-1k: corrente “pura” para  $R_g = 1 \text{ k}\Omega$ .

As correntes “puras” apresentam os mesmos comportamentos das correntes “contaminadas”, ou seja, o valor de pico da corrente diminui com o aumento da resistência de terra.

As Figuras 4.21 a 4.24 mostram ondas de correntes de descarga “puras” e as correntes “contaminadas” para  $Z_t = 138 \text{ }\Omega$  e diferentes valores de  $R_g$ . As Figuras 4.25 a 4.28 mostram ondas de correntes “puras” e correntes “contaminadas” para  $Z_t = 275 \text{ }\Omega$ .

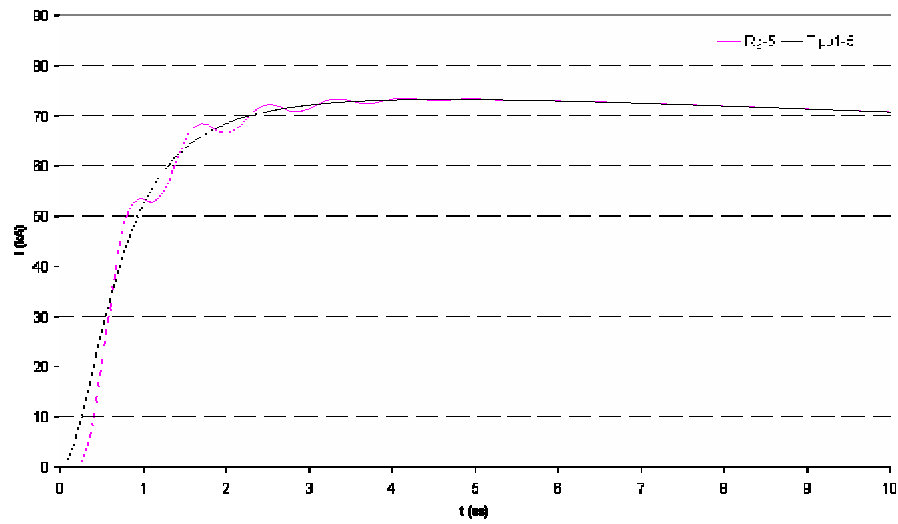


Figura 4.21. Correntes “pura” e “contaminada” para  $Z_t = 138 \Omega$  e  $R_g = 5 \Omega$   
 ( $h_t = 62,5 \text{ m}$ ,  $h_s = 0 \text{ m}$ ,  $Z_{ch} = 1 \text{ k}\Omega$ ).

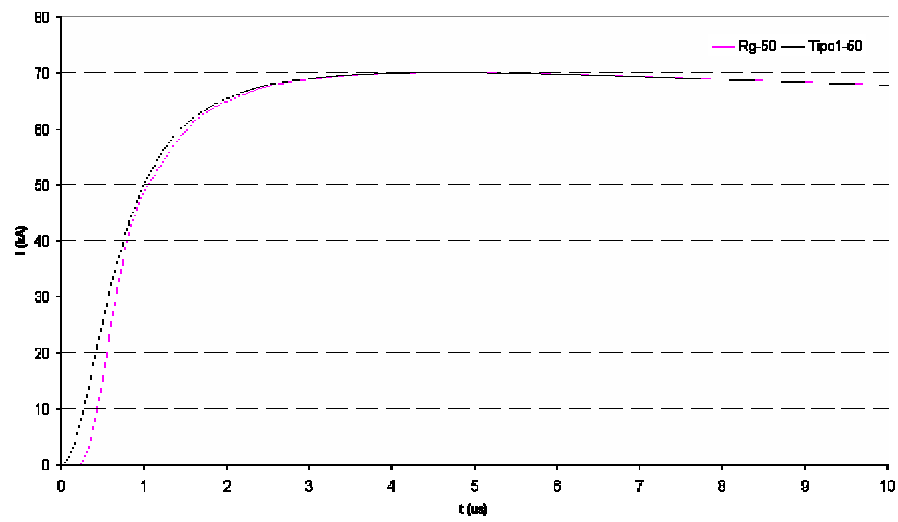


Figura 4.22. Correntes “pura” e “contaminada” para  $Z_t = 138 \Omega$  e  $R_g = 50 \Omega$   
 ( $h_t = 62,5 \text{ m}$ ,  $h_s = 0 \text{ m}$ ,  $Z_{ch} = 1 \text{ k}\Omega$ ).

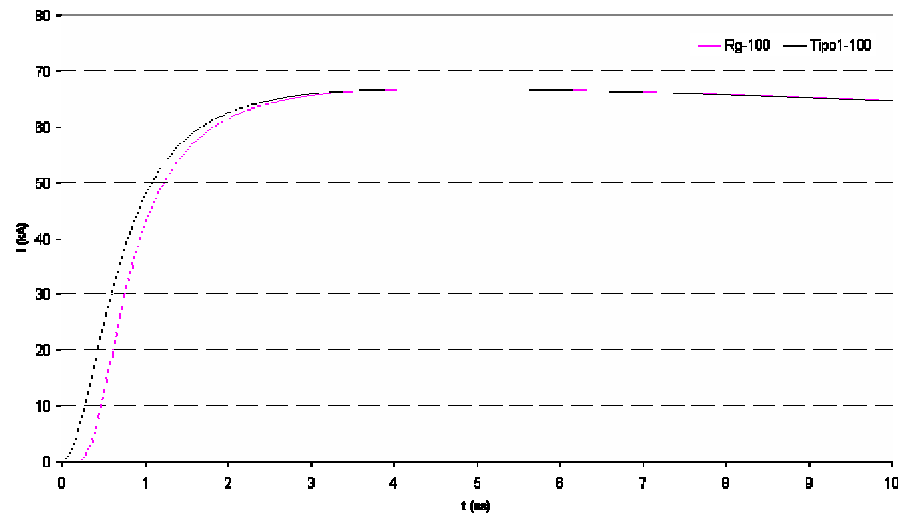


Figura 4.23. Correntes “pura” e “contaminada” para  $Z_t = 138 \Omega$  e  $R_g = 100 \Omega$   
 ( $h_t = 62,5 \text{ m}$ ,  $h_s = 0 \text{ m}$ ,  $Z_{ch} = 1 \text{ k}\Omega$ ).

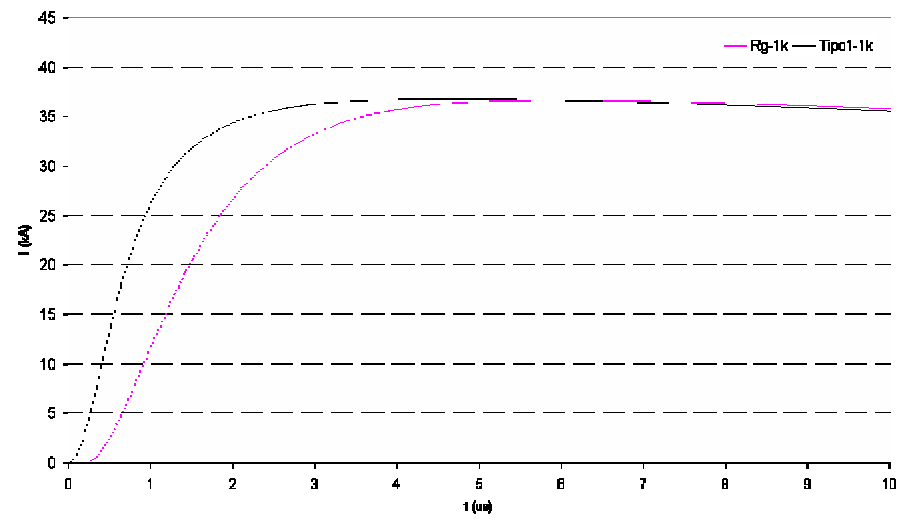


Figura 4.24. Correntes “pura” e “contaminada” para  $Z_t = 138 \Omega$  e  $R_g = 1 \text{ k}\Omega$   
 ( $h_t = 62,5 \text{ m}$ ,  $h_s = 0 \text{ m}$ ,  $Z_{ch} = 1 \text{ k}\Omega$ ).



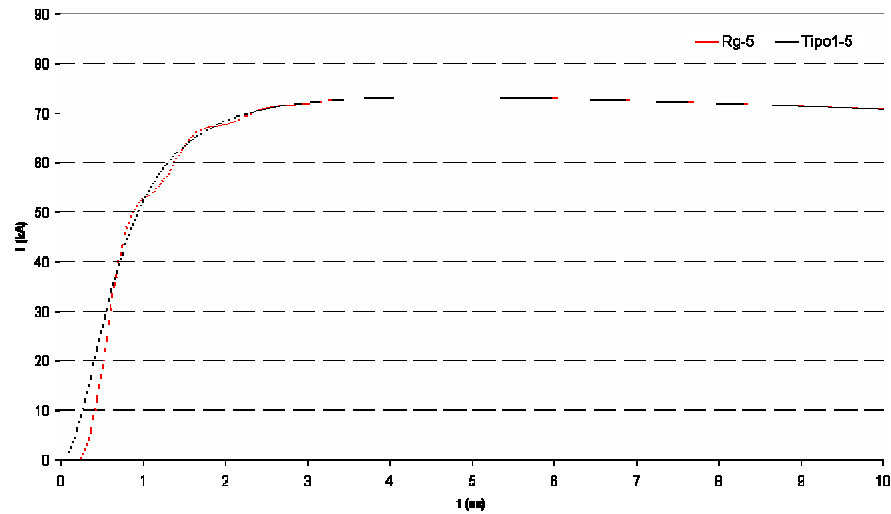


Figura 4.25. Correntes “pura” e “contaminada” para  $Z_t = 275 \Omega$  e  $R_g = 5 \Omega$  ( $h_t = 62,5 \text{ m}$ ,  $h_s = 0\text{m}$ ,  $Z_{ch} = 1 \text{ k}\Omega$ ).

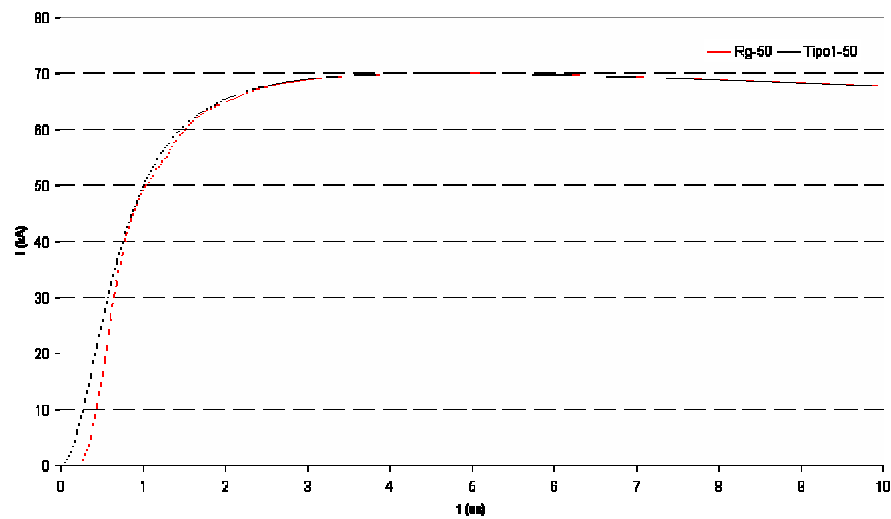


Figura 4.26. Correntes “pura” e “contaminada” para  $Z_t = 275 \Omega$  e  $R_g = 50 \Omega$  ( $h_t = 62,5 \text{ m}$ ,  $h_s = 0\text{m}$ ,  $Z_{ch} = 1 \text{ k}\Omega$ ).

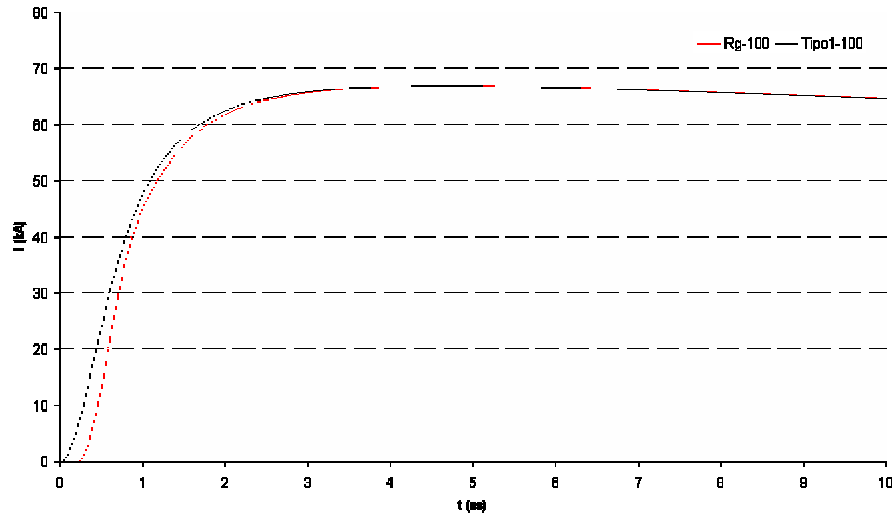


Figura 4.27. Correntes “pura” e “contaminada” para  $Z_t = 275 \Omega$  e  $R_g = 100 \Omega$  ( $h_t = 62,5 \text{ m}$ ,  $h_s = 0 \text{ m}$ ,  $Z_{ch} = 1 \text{ k}\Omega$ ).

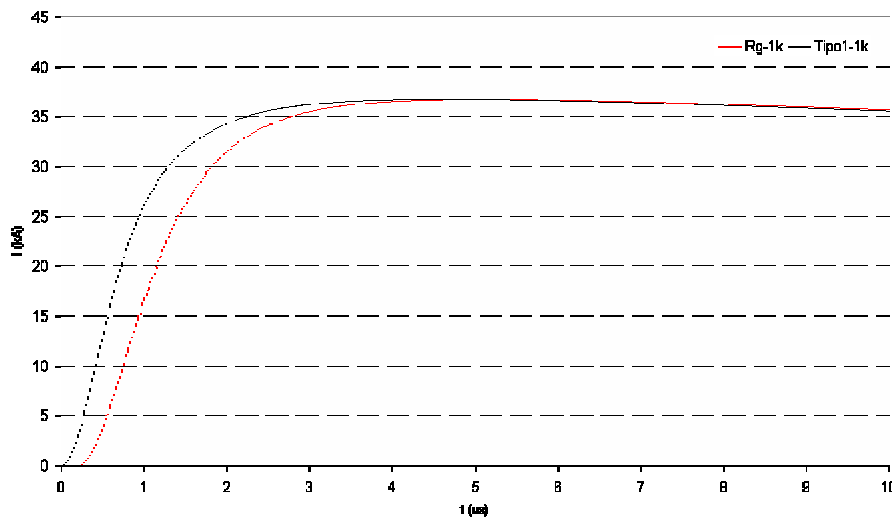


Figura 4.28. Correntes “pura” e “contaminada” para  $Z_t = 275 \Omega$  e  $R_g = 1 \text{ k}\Omega$  ( $h_t = 62,5 \text{ m}$ ,  $h_s = 0 \text{ m}$ ,  $Z_{ch} = 1 \text{ k}\Omega$ ).

As Figuras 4.21 e 4.25 mostram pequenas oscilações na parte frontal da corrente “contaminada”, que apesar disso tem forma bastante semelhante à corrente “pura”. Já as correntes “contaminadas” mostradas nas Figuras 4.22 e 4.26, relativas ao caso de  $R_g = 50 \Omega$ , são as que mais se assemelham à corrente “pura”. Para valores de resistência de terra elevados há diferenças na parte frontal da onda de corrente apresentando-se maiores, conforme mostrado nas Figuras 4.24 e 4.28, embora as amplitudes se mantenham inalteradas.

#### 4.1.6. Influência do tempo de frente equivalente da corrente $T_{d30/90}$

Nesse item, os valores do tempo de frente equivalente de onda ( $T_{d30/90}$ ) foram variados para a realização das simulações, bem como para as análises do comportamento das ondas de correntes. Foram utilizados quatro diferentes valores de tempo de frente equivalente ( $T_{d30/90}$ ): 1  $\mu$ s, 2  $\mu$ s, 4  $\mu$ s e 8  $\mu$ s. Segundo medições realizadas em objetos elevados, conforme a Tabela 2.6 apresentada no Capítulo 2, o valor médio de  $T_{d30/90}$  é de 3,83  $\mu$ s para a primeira descarga de retorno e 0,67  $\mu$ s para descargas subsequentes.

A Figura 4.29 mostra as correntes “descontaminadas” para as quatro frentes consideradas, as quais foram obtidas ajustando-se convenientemente os parâmetros da Função de Heidler para a primeira descarga de retorno, ou seja, utilizando a equação (4.1) e parâmetros  $I_1$ ,  $t_{11}$ ,  $t_{21}$  adequadamente.

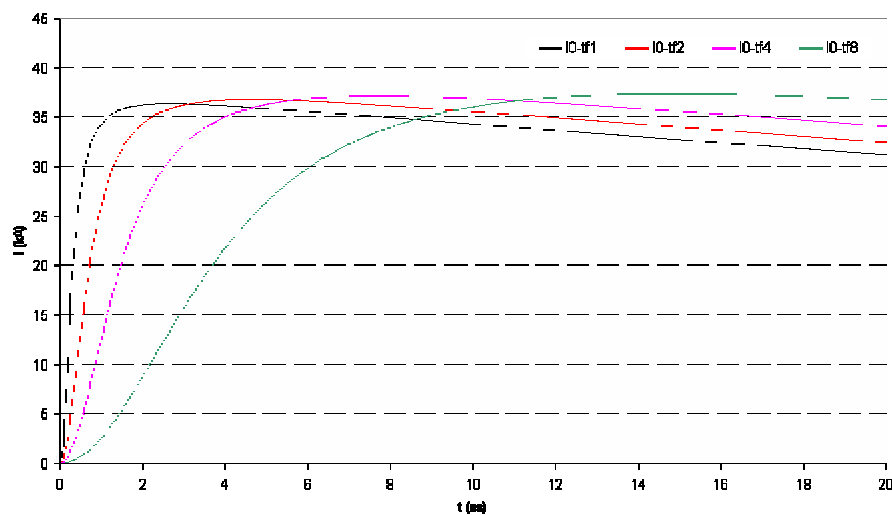


Figura 4.29. Correntes “descontaminadas” com diferentes tempos de frentes.

Da Figura 4.29 tem-se:

- I0-tf1: corrente “descontaminada” com  $T_{d30/90} = 1 \mu$ s;
- I0-tf2: corrente “descontaminada” com  $T_{d30/90} = 2 \mu$ s;
- I0-tf4: corrente “descontaminada” com  $T_{d30/90} = 4 \mu$ s;
- I0-tf8: corrente “descontaminada” com  $T_{d30/90} = 8 \mu$ s.

A Figura 4.30 mostra as correntes “puras”, enquanto a Figura 4.31 apresenta as correntes “contaminadas” correspondentes para as seguintes condições:  $h_t = 62,5$  m,  $h_s = 0$  m,  $Z_{ch} = 1$  k $\Omega$ ,  $Z_t = 275$   $\Omega$  e  $R_g = 5$   $\Omega$ .

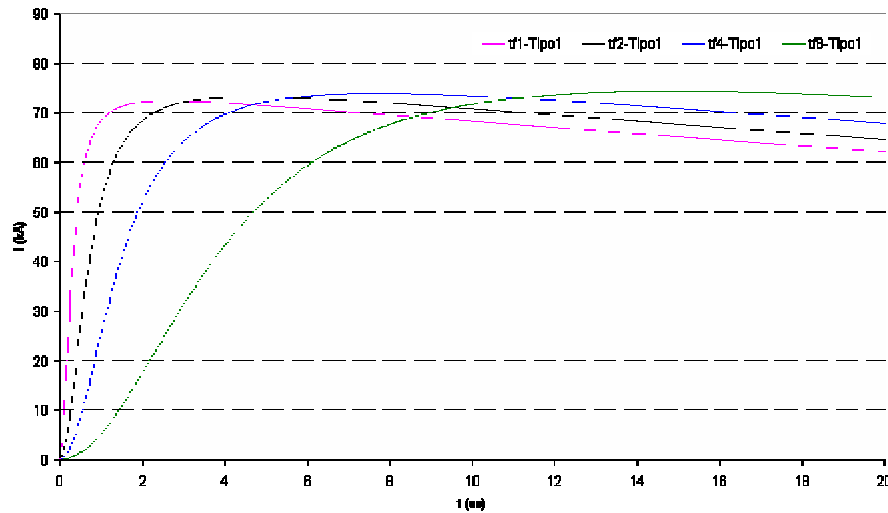


Figura 4.30. Correntes “puras” ( $Z_{ch} = 1$  k $\Omega$ ,  $Z_t = 275$   $\Omega$  e  $R_g = 5$   $\Omega$ ).

Na Figura 4.30 tem-se:

- tf1-Tipo1: corrente “pura” para  $T_{d30/90} = 1$   $\mu$ s;
- tf2-Tipo1: corrente “pura” para  $T_{d30/90} = 2$   $\mu$ s;
- tf4-Tipo1: corrente “pura” para  $T_{d30/90} = 4$   $\mu$ s;
- tf8-Tipo1: corrente “pura” para  $T_{d30/90} = 8$   $\mu$ s.

A Figura 4.30 apresenta ondas de correntes similares às ondas mostradas na Figura 4.29, diferindo apenas no valor de pico da corrente, devido à diferença da impedância entre o canal e a resistência de terra, conforme explicado no Capítulo 3, Figura 3.1a.

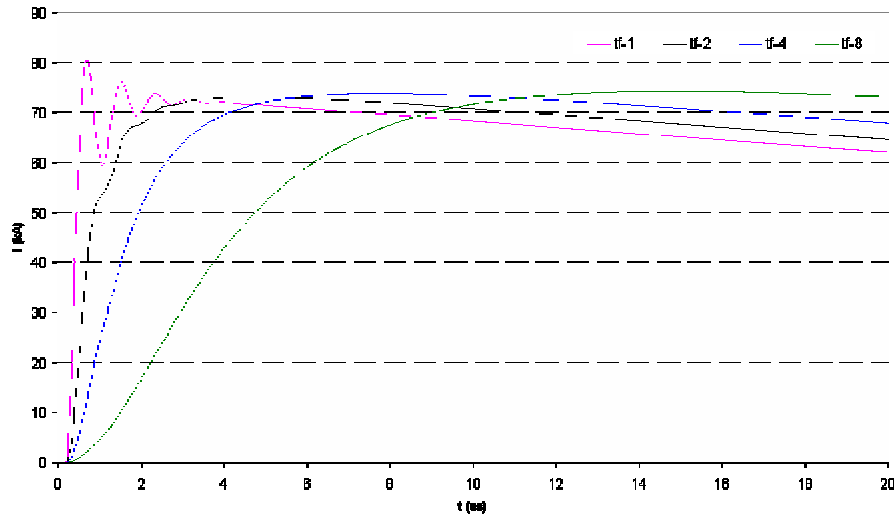


Figura 4.31. Correntes “contaminadas” ( $h_t = 62,5$  m,  $h_s = 0$  m,  $Z_{ch} = 1$  k $\Omega$ ,  $Z_t = 275$   $\Omega$  e  $R_g = 5$   $\Omega$ ).

Na Figura 4.31, tf-1 corresponde à corrente “contaminada” para  $T_{d30/90} = 1$   $\mu$ s, tf-2 para  $T_{d30/90} = 2$   $\mu$ s, tf-4 para  $T_{d30/90} = 4$   $\mu$ s e tf-8 para  $T_{d30/90} = 8$   $\mu$ s. Nota-se que para tempos de frente “rápidos” a “contaminação” da corrente é maior, sendo verificado pelas oscilações na parte frontal da onda, já para tempos de frente longos essas oscilações diminuem. A onda de corrente tf-8, por exemplo, não apresenta oscilações.

As Figuras 4.32, 4.33, 4.34 e 4.35 mostram o comportamento comparativo entre as correntes geradas pela Função de Heidler (corrente “descontaminada”), “pura” e “contaminada”.

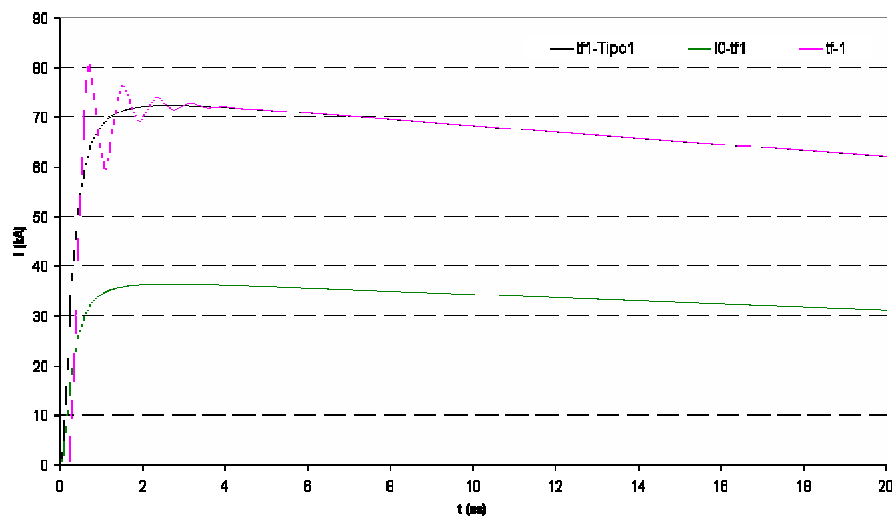


Figura 4.32. Corrente “pura”, corrente “descontaminada” e corrente “contaminada” para  $T_{d30/90} = 1$   $\mu$ s ( $h_t = 62,5$  m,  $h_s = 0$  m,  $Z_{ch} = 1$  k $\Omega$ ,  $Z_t = 275$   $\Omega$  e  $R_g = 5$   $\Omega$ ).

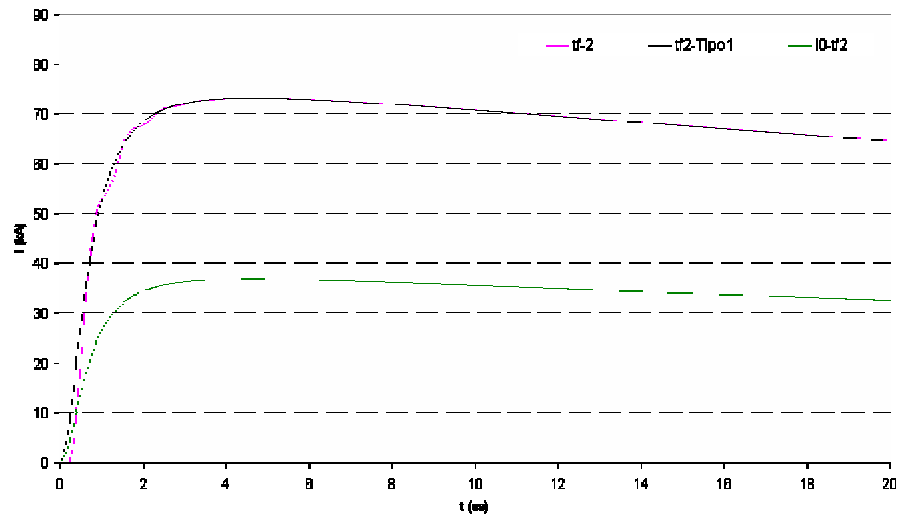


Figura 4.33. Corrente “pura”, corrente “descontaminada” e corrente “contaminada” para  $T_{d30/90} = 2 \mu\text{s}$  ( $h_t = 62,5 \text{ m}$ ,  $h_s = 0 \text{ m}$ ,  $Z_{ch} = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $Z_t = 275 \Omega$  e  $R_g = 5 \Omega$ ).

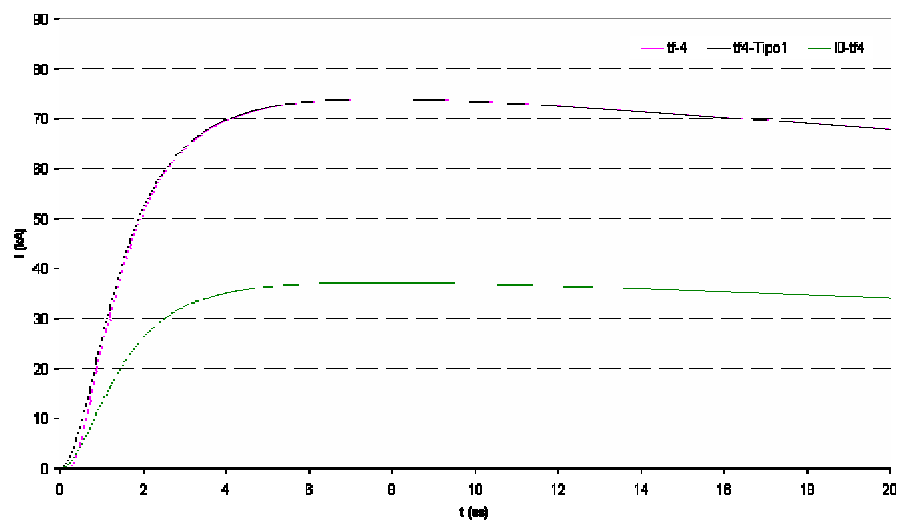


Figura 4.34. Corrente “pura”, corrente “descontaminada” e corrente “contaminada” para  $T_{d30/90} = 4 \mu\text{s}$  ( $h_t = 62,5 \text{ m}$ ,  $h_s = 0 \text{ m}$ ,  $Z_{ch} = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $Z_t = 275 \Omega$  e  $R_g = 5 \Omega$ ).

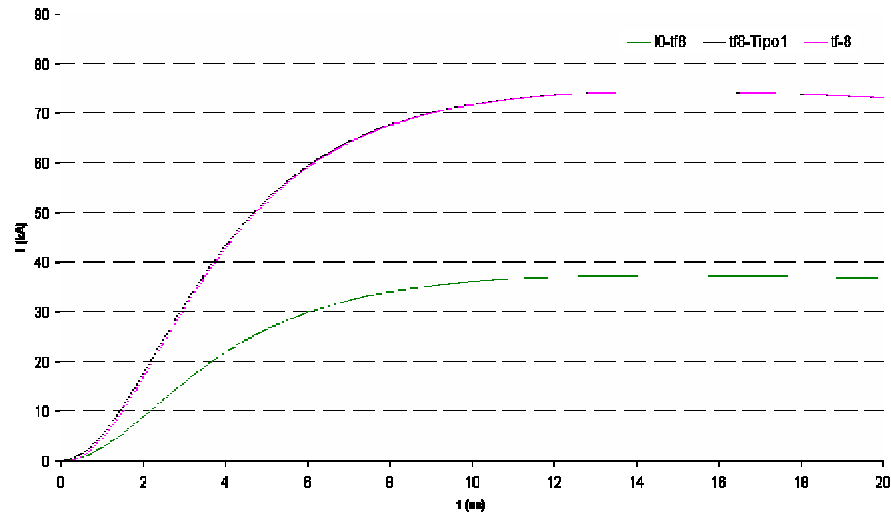


Figura 4.35. Corrente “pura”, corrente “descontaminada” e corrente “contaminada” para  $T_{d30/90} = 8 \mu\text{s}$  ( $h_t = 62,5 \text{ m}$ ,  $h_s = 0 \text{ m}$ ,  $Z_{ch} = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $Z_l = 275 \Omega$  e  $R_g = 5 \Omega$ ).

Para tempos de frente equivalentes muito “rápidos”, conforme comentado anteriormente e mostrado na Figura 4.32, notam-se oscilações consideráveis na parte frontal da corrente “contaminada” devido à influência da torre, que por essa razão difere, nesta porção inicial, da corrente “pura”. Já para tempos de frente “lentos”, como mostrado na Figura 4.35, não há oscilações na corrente “contaminada”, sendo muito semelhante à corrente “pura”. Nesse caso, as ondas de correntes “contaminada” e “pura” são praticamente coincidentes. Para  $T_{d30/90} = 3,83 \mu\text{s}$ , que é o tempo de frente equivalente médio das correntes para primeira descarga (Tabela 2.6), os resultados são análogos aos apresentados na Figura 4.34. Nessa figura nota-se que não há oscilações iniciais e a corrente “contaminada” apresenta forma de onda de corrente muito semelhante à da corrente “pura”.

Os termos frentes equivalentes “rápidos” e “lentos” foram considerados verificando-se a taxa de crescimento da corrente em função do tempo na parte inicial da onda de corrente considerada.

## 4.2 AVALIAÇÃO DA CORRENTE “DESCONTAMINADA”

A avaliação da corrente “descontaminada” foi realizada com base em simulações, verificando-se a influência dos parâmetros do sistema canal-torre-aterramento que ocasionam distorções na onda de corrente. Para a análise da corrente “descontaminada” utilizou-se uma extensão do modelo de Rachidi et al (2002), adotando-se o seguinte procedimento:

- considerou-se inicialmente a corrente “contaminada” ht-62.5 m da Figura 4.7 que corresponde à seguinte situação:  $h_t = 62,5$ ,  $h_s = 0$  m,  $Z_{ch} = 1$  k $\Omega$ ,  $Z_t = 275$   $\Omega$ ,  $R_g = 5$   $\Omega$ ,  $I_p = 36,7$  kA,  $T_{d30/90} = 2$   $\mu$ s e  $T_{50} = 80$   $\mu$ s;
- obteve-se, em seguida, a corrente “descontaminada”, aplicando-se o processo de “descontaminação” com o programa DESCNTAMINA;
- foram variados os parâmetros do sistema canal-torre-aterramento de modo a se fazer um estudo de sensibilidade da corrente “descontaminada”. Para efeito de comparação, parte das figuras apresentadas neste item apresentam também as correntes “pura” e “contaminada”.

As correntes apresentadas na Figura 4.36 foram obtidas através das simulações utilizando o programa CONTAMINATORRE e exprime, para a condição indicada, correntes “contaminadas” obtidas considerando diferentes quantidades de pontos para os dados de entrada, sendo a corrente representada através da Função de Heidler. O resultado comparativo entre as ondas de correntes “contaminadas” mostrou-se satisfatório para a realização de simulações com poucos pontos de entrada, já que a quantidade dos mesmos não acarreta diferenças significativas nas ondas das correntes “contaminadas”. Essa verificação é relevante, pois está ligada diretamente à taxa de amostragem utilizada no sistema de medição, já que um sistema com baixa taxa de amostragem poderia não se mostrar adequado para a determinação da forma de onda da corrente “descontaminada”. Feitas essas considerações, no presente trabalho optou-se por utilizar nas simulações dados de entrada com 501 pontos (501 linhas e 2 colunas), o que se mostrou satisfatório, conforme mostra a Figura 4.36.



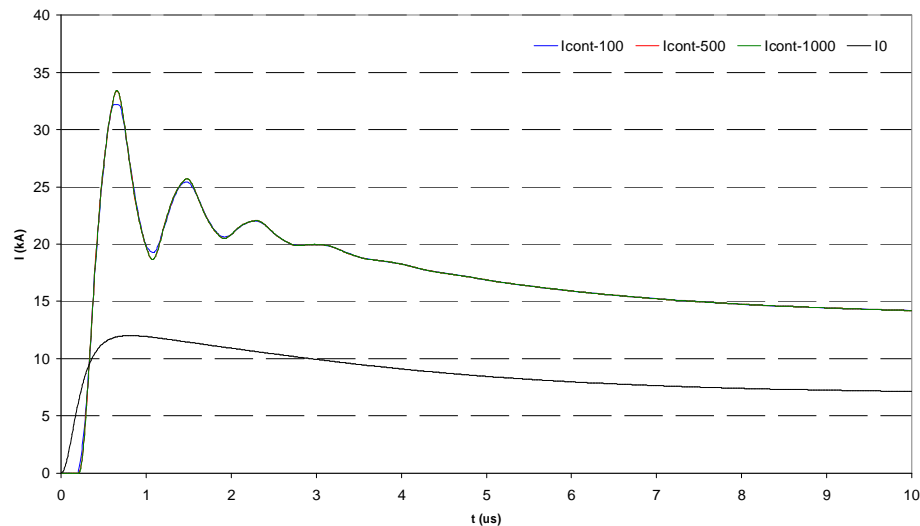


Figura 4.36. Influência do número de pontos utilizados nas simulações (programa CONTAMINATORRE). ( $h_t = 62,5$  m,  $h_s = 0$  m,  $Z_{ch} = 1$  k $\Omega$ ,  $Z_t = 275$   $\Omega$  e  $R_g = 5$   $\Omega$ ).

Da Figura 4.36 tem-se:

- I0: corrente “descontaminada” gerada pela Função de Heidler (dado de entrada);
- Icont-100: corrente “contaminada” obtida com 101 pontos de dados de entrada;
- Icont-500: corrente “contaminada” obtida com 501 pontos de dados de entrada;
- Icont-1000: corrente “contaminada” obtida com 1001 pontos de dados de entrada.

As correntes da Figura 4.36 apresentam apenas pequenas diferenças. Para a onda de corrente Icont-500 aplicou-se o processo de “descontaminação” utilizando o programa DESCONTAMINA, obtendo-se a Figura 4.37.

A Figura 4.37 mostra a corrente utilizada com o dado de entrada (I0, definida pela Função de Heidler) e a corrente “contaminada” (Icont). A Figura 4.38 compara a corrente “descontaminada”, obtida a partir da corrente “contaminada”, com aquela “injetada” na estrutura pela descarga atmosférica (I0). Nota-se uma boa concordância entre as duas ondas de correntes na Figura 4.38, indicando que o programa DESCONTAMINA está funcionando adequadamente.

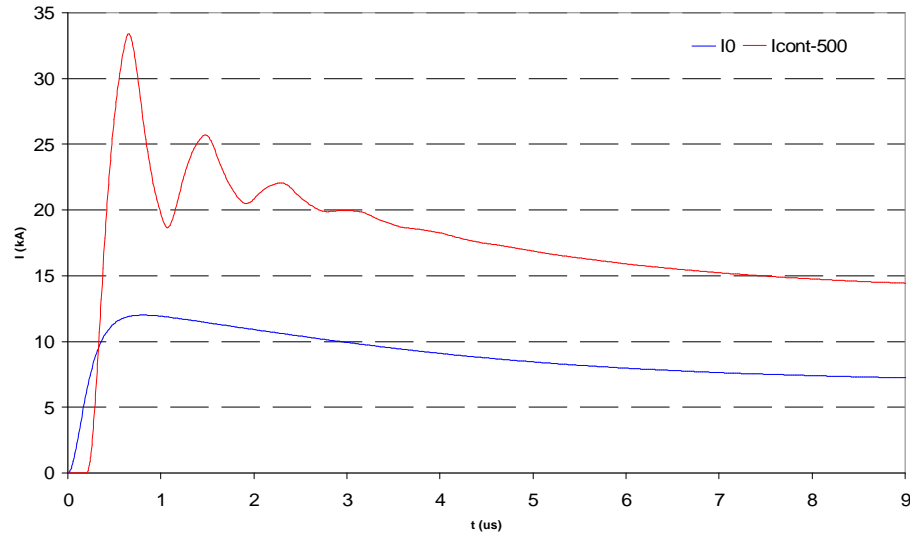


Figura 4.37. Corrente  $I_0$  (dado de entrada) e corrente “contaminada para dado de entrada com 501 pontos ( $h_t = 62,5$  m,  $h_s = 0$  m,  $Z_{ch} = 1$  k $\Omega$ ,  $Z_t = 275$   $\Omega$  e  $R_g = 5$   $\Omega$ ).

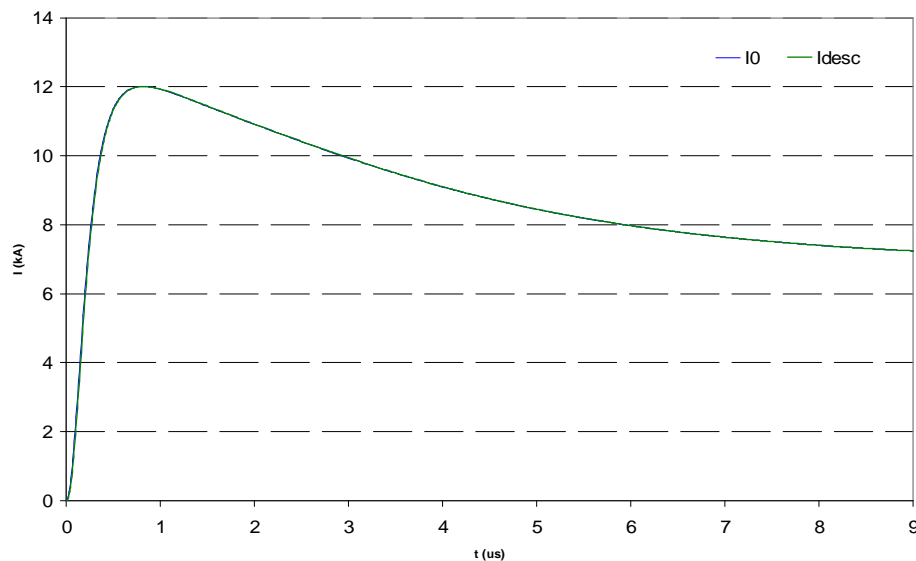


Figura 4.38. Comparação entre a corrente “injetada” na torre pela descarga ( $I_0$ ) e a corrente “descontaminada” ( $I_{desc}$ ) obtida a partir da corrente “contaminada” ( $I_{cont}$ ) indicada na Figura 4.37 ( $h_t = 62,5$  m,  $h_s = 0$  m,  $Z_{ch} = 1$  k $\Omega$ ,  $Z_t = 275$   $\Omega$  e  $R_g = 5$   $\Omega$ ).

A maior dificuldade para realizar o processo de “descontaminação” está relacionada à escolha do valor da impedância do canal ( $Z_{ch}$ ) que é de difícil avaliação. Por outro lado, a resistência de terra ( $R_g$ ) pode ser medida e a impedância da torre ( $Z_t$ ) pode ser estimada por meio de experimentos e cálculos em regime transitório. Já a altura da estrutura ( $h_t$ ) e a posição do sensor ( $h_s$ ) são conhecidas.

As simulações mostradas nos próximos itens visam analisar o comportamento da corrente “descontaminada” em relação aos parâmetros citados anteriormente. Considerou-se uma onda

de corrente que poderia eventualmente ter sido medida quando da incidência de uma descarga atmosférica em um objeto elevado. Para essa situação hipotética, todos os parâmetros ( $h_t$ ,  $h_s$ ,  $Z_{ch}$ ,  $Z_t$ ,  $R_g$ ) são conhecidos. Essa corrente está “contaminada” pelas reflexões no topo e na base do objeto. A corrente “descontaminada” foi obtida através do programa DESCONTAMINA. Foi também determinada, para efeito de comparação, a corrente “pura”, definida no Capítulo 3 (situação ilustrada na Figura 3.1a), que consiste em uma corrente hipotética obtida a partir de uma descarga incidente diretamente no solo, considerando coeficiente de reflexão real no ponto de descontinuidade canal-solo. O cálculo da corrente “pura” foi realizado a partir da corrente “descontaminada” correspondente ao caso base, ou seja, para as condições:  $h_t = 62,5$  m,  $h_s = 0$  m,  $Z_{ch} = 1$  k $\Omega$ ,  $Z_t = 275$   $\Omega$  e  $R_g = 5$   $\Omega$ .

#### **4.2.1. Influência da altura do objeto $h_t$**

A Figura 4.39 ilustra o procedimento utilizado para verificar a influência da altura do objeto ( $h_t$ ) no processo de “descontaminação” da corrente, conhecendo-se os parâmetros do sistema canal-objeto-solo e a forma da onda da corrente “contaminada” na base da estrutura (ponto “1”,  $h_s = 0$  m). As correntes “descontaminadas” foram obtidas nos topos das estruturas, as quais apresentam o mesmo valor para a impedância de surto ( $Z_t = 275$   $\Omega$ ) e a mesma resistência de terra ( $R_g = 5$   $\Omega$ ). A corrente “contaminada” obtida no ponto “1”, ou seja, na base, possui as mesmas características para todas as situações mostradas na Figura 4.39.

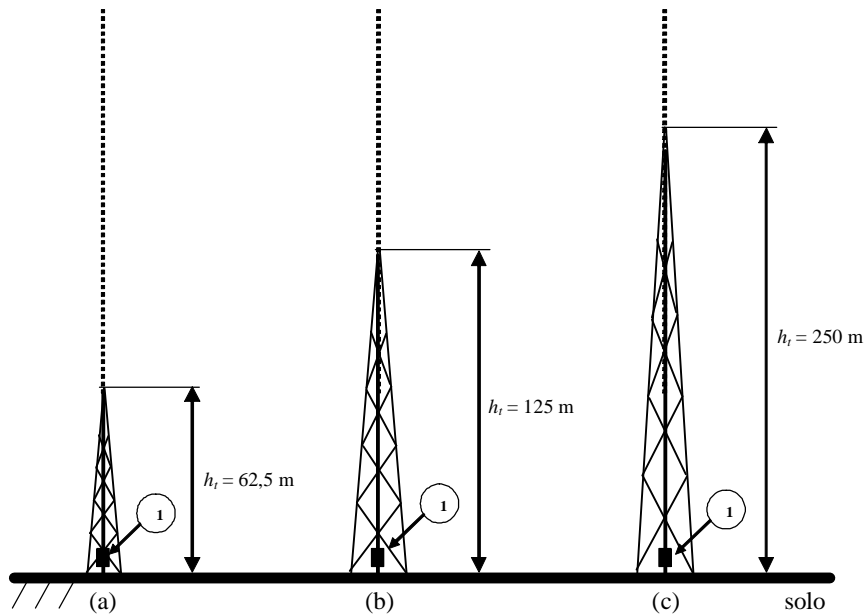


Figura 4.39. Ilustração para as estruturas de diferentes alturas utilizadas para realizar a “descontaminação” da corrente, conhecendo-se a corrente “contaminada” na base da estrutura (ponto “1”,  $h_s = 0$  m).

A partir das considerações iniciais, as correntes “descontaminadas” foram obtidas nos topos das estruturas com alturas de 62,5 m, 125 m e 250 m, conforme mostrado na Figura 4.40.

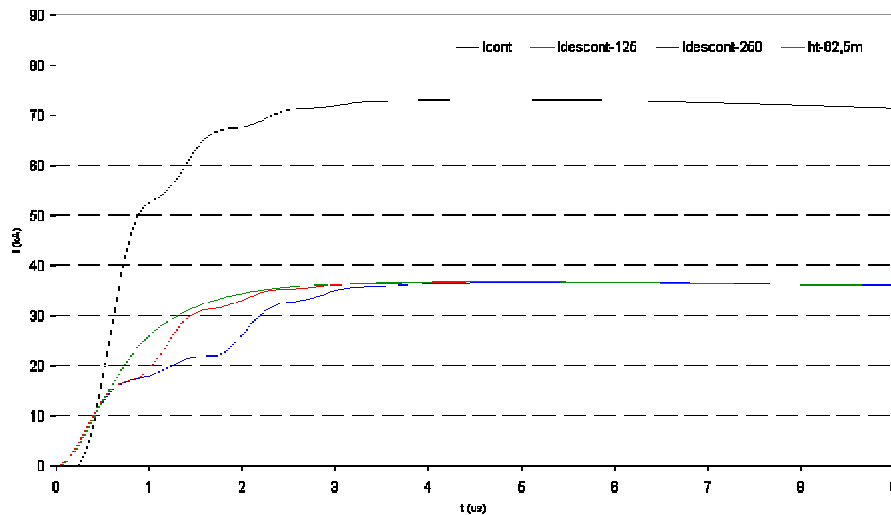


Figura 4.40. Corrente “contaminada” e correntes “descontaminadas” em função de diferentes alturas: 62,5 m, 125 m e 250 m ( $h_s = 0$  m,  $Z_{ch} = 1$  k $\Omega$ ,  $Z_t = 275$   $\Omega$  e  $R_g = 5$   $\Omega$ ).

Na Figura 4.40 tem-se:

- $I_{cont}$ : corrente “contaminada”;

- ht-62,5m: corrente “descontaminada”, considerando um objeto com altura de 62,5 m;
- Idescont-125m: corrente “descontaminada”, considerando um objeto com altura de 125 m;
- Idescont-250m: corrente “descontaminada”, considerando um objeto com altura de 250 m.

A Figura 4.41 apresenta as correntes “descontaminadas” considerando objetos com alturas de 50 m, 62,5 m e 75 m. É também apresentada a corrente “pura”, obtida a partir da corrente “contaminada” para o caso base ( $h_t = 62,5$  m).

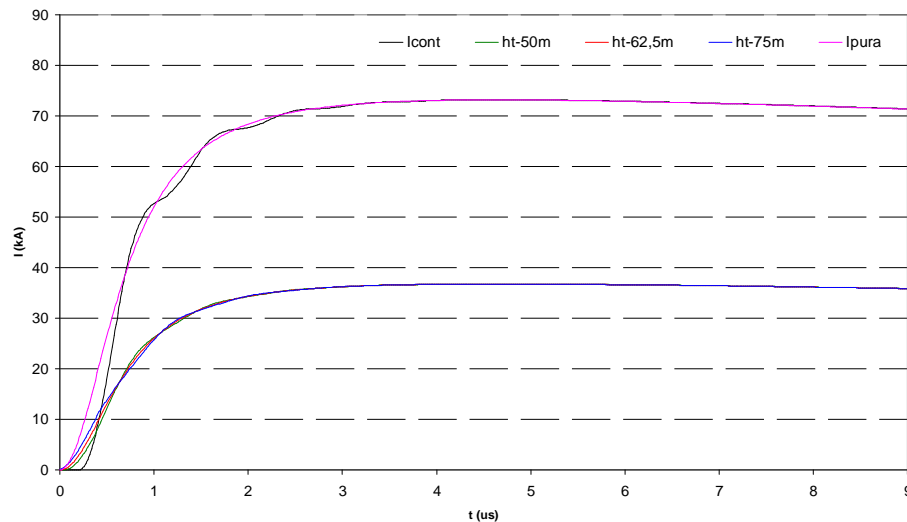


Figura 4.41. Corrente “contaminada”, corrente “pura” e correntes “descontaminadas” (para objetos de diferentes alturas  $h_t$ ) ( $h_s = 0$  m,  $Z_{ch} = 1$  k $\Omega$ ,  $Z_t = 275$   $\Omega$  e  $R_g = 5$   $\Omega$ ). A corrente “pura” se refere ao caso base ( $h_t = 62,5$  m).

Na Figura 4.41 tem-se:

- $I_{\text{cont}}$ : corrente “contaminada”;
- $h_s-50\text{m}$ : corrente “descontaminada” considerando  $h_t$  igual a 50 m;
- $h_s-62,5\text{m}$ : corrente “descontaminada” considerando  $h_t$  igual a 62,5 m;
- $h_s-75\text{m}$ : corrente “descontaminada” considerando  $h_t$  igual a 75 m;
- $I_{\text{pura}}$ : corrente “pura” ( $h_t = 62,5$  m).

A Figura 4.41 mostra que as ondas de correntes “descontaminadas” para alturas próximas (50 m, 62,5 m e 75 m) resultam em ondas de correntes praticamente coincidentes. Para efeito de cálculo de “descontaminação” de uma corrente é possível de se utilizar um valor da altura do objeto próximo a sua real altura, caso a altura não seja exatamente conhecida.

#### 4.2.2. Influência da posição do ponto de medição $h_s$

É também importante analisar a influência da posição do sensor no processo de “descontaminação”, já que os sensores normalmente se encontram instalados no topo, na base ou em algum ponto próximo ao topo ou à base da torre. Para essa análise adotou-se o seguinte procedimento:

- inicialmente foram calculadas as correntes “contaminadas” em diferentes posições  $h_s^{cont}$  na estrutura através do programa CONTAMINATORRE;
- em seguida, para cada uma das correntes “contaminadas” realizou-se a “descontaminação” considerando-se os valores dos parâmetros referentes ao caso base, ou seja,  $h_t = 62,5$  m,  $h_s = 0$  m,  $Z_{ch} = 1$  k $\Omega$ ,  $Z_t = 275$   $\Omega$  e  $R_g = 5$   $\Omega$ .

Esse procedimento foi adotado com o objetivo de avaliar a influência, na corrente “descontaminada”, no caso de um eventual erro na determinação da altura exata do ponto de medição.

A Figura 4.42 ilustra o procedimento adotado, sendo que as correntes  $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_3$  correspondem às correntes “contaminadas” nas posições  $h_{s1}$ ,  $h_{s2}$  e  $h_{s3}$ , respectivamente. Para efeito de análise, essas correntes  $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_3$  foram “descontaminadas” considerando  $h_s = 0$  m, obtendo-se  $I_{d1}$ ,  $I_{d2}$  e  $I_{d3}$ , respectivamente.

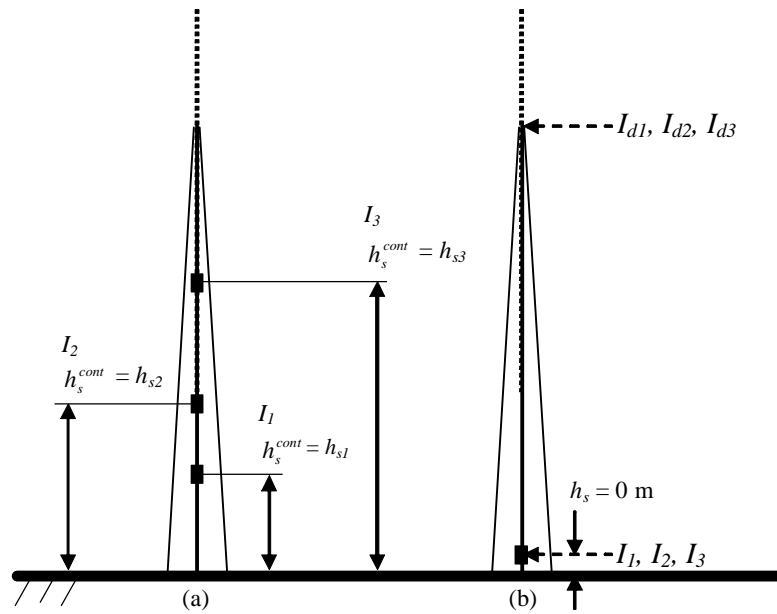


Figura 4.42. Ilustração do procedimento adotado para avaliação das correntes “descontaminadas”:  
 a) situação em que as correntes  $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_3$ , são obtidas para as posições  $h_{s1}$ ,  $h_{s2}$  e  $h_{s3}$ , respectivamente;  
 b) situação considerada para o cálculo das correntes “descontaminadas”  $I_{d1}$ ,  $I_{d2}$  e  $I_{d3}$  com o programa DESCONTAMINA.

A Figura 4.43 mostra as correntes “contaminadas” considerando uma torre com 62,5 m de altura e as posições  $h_s^{cont} = 0$  m e  $h_s^{cont} = 30$  m. É também apresentada a corrente “pura” correspondente ao caso base ( $h_s^{cont} = 0$  m).

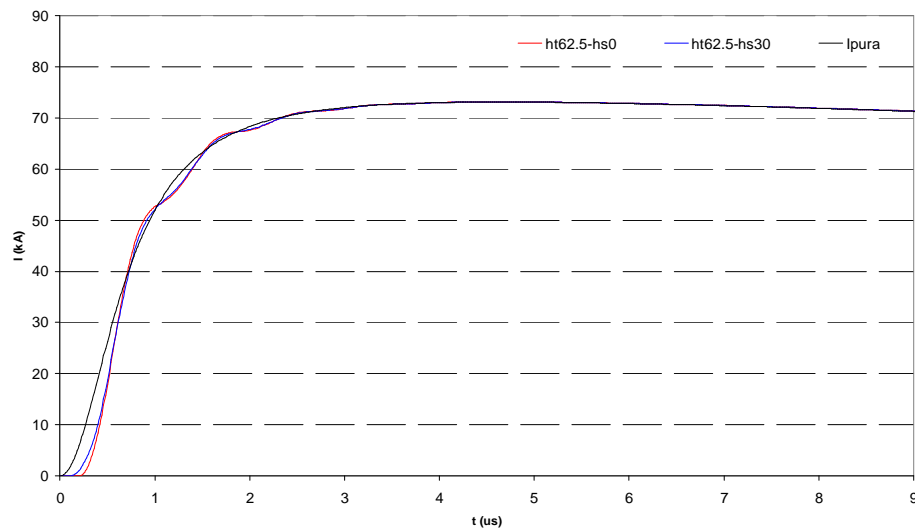


Figura 4.43. Corrente “pura”, correntes “contaminadas” para diferentes valores de  $h_s^{cont}$  de 0 m e 30 m ( $h_t = 62,5$  m,  $Z_{ch} = 1$  k $\Omega$ ,  $Z_t = 275$   $\Omega$  e  $R_g = 5$   $\Omega$ ). A corrente “pura” se refere ao caso base ( $h_s = 0$  m).

Na Figura 4.43 tem-se:

- ht62.5-hs0: corrente “contaminada” para  $h_s^{cont} = 0$  m;
- ht62.5-hs30: corrente “contaminada” para  $h_s^{cont} = 30$  m;
- Ipura: corrente “pura”.

Nota-se pela Figura 4.43 que a corrente “pura” e as duas correntes “contaminadas” apresentam características semelhantes. A Figura 4.44 apresenta as correntes “descontaminadas” correspondentes às correntes mostradas na Figura 4.43.

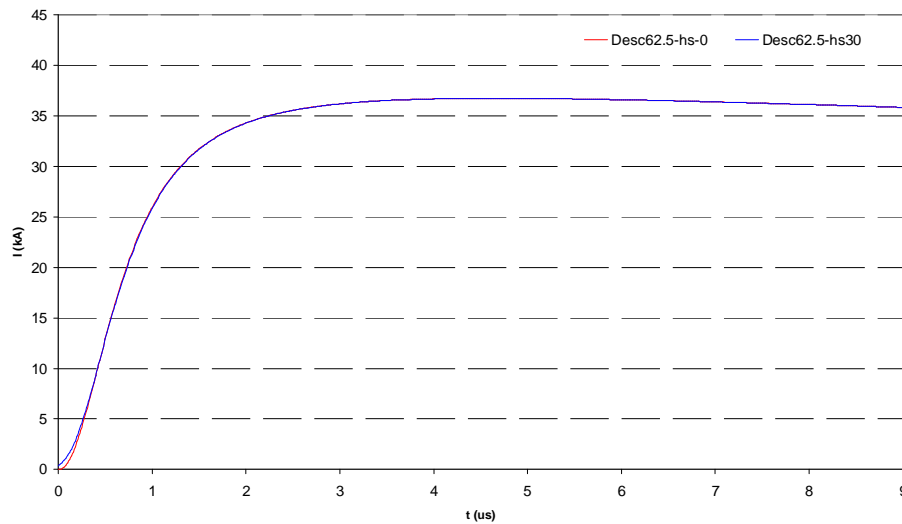


Figura 4.44. Correntes “descontaminadas” ( $h_t = 62,5$  m,  $Z_{ch} = 1$  k $\Omega$ ,  $Z_l = 275$   $\Omega$  e  $R_g = 5$   $\Omega$ ).

Na Figura 4.44 tem-se:

- Desc62.5-hs0: corrente “descontaminada” para  $h_s = 0$  m e  $h_s^{cont} = 0$  m;
- Desc62.5-hs30: corrente “descontaminada” para  $h_s = 0$  m e  $h_s^{cont} = 30$  m.

As ondas de corrente da Figura 4.44 são muito semelhantes, indicando que para a situação considerada, os valores adotados para  $h_s^{cont}$  praticamente não afetaram as correntes “descontaminadas”. A Figura 4.45 mostra, para a mesma escala de tempo, a corrente “pura” e a corrente “contaminada” da Figura 4.43 e a corrente “descontaminada” da Figura 4.44, todas para a condição de  $h_s^{cont} = 0$  m.



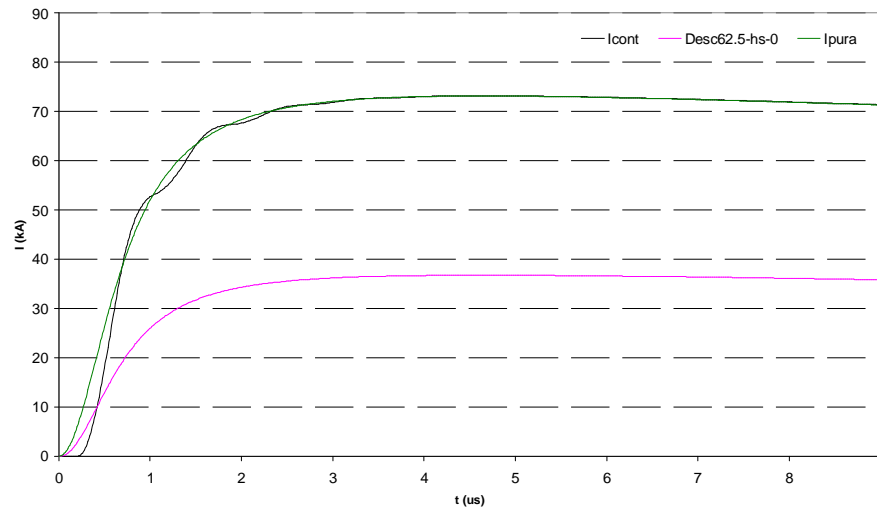


Figura 4.45. Corrente “contaminada”, corrente “pura” e corrente “descontaminada” para  $h_s = 0$  m ( $h_t = 62,5$  m,  $Z_{ch} = 1$  k $\Omega$ ,  $Z_t = 275$   $\Omega$  e  $R_g = 5$   $\Omega$ ). A corrente “pura” se refere ao caso base.

As correntes apresentadas na Figura 4.45 apresentam tempos de frente muito próximos, em torno de  $T_{d30/90} = 2$   $\mu$ s, sendo que os valores de pico das correntes  $I_{cont}$  e  $I_{pura}$  são praticamente iguais.

A Figura 4.46 mostra os resultados correspondentes a uma torre com altura de 250 m, sendo que no processo de “contaminação” foram utilizados para  $h_s^{cont} = 0$  m,  $h_s^{cont} = 25$  m e  $h_s^{cont} = 125$  m.

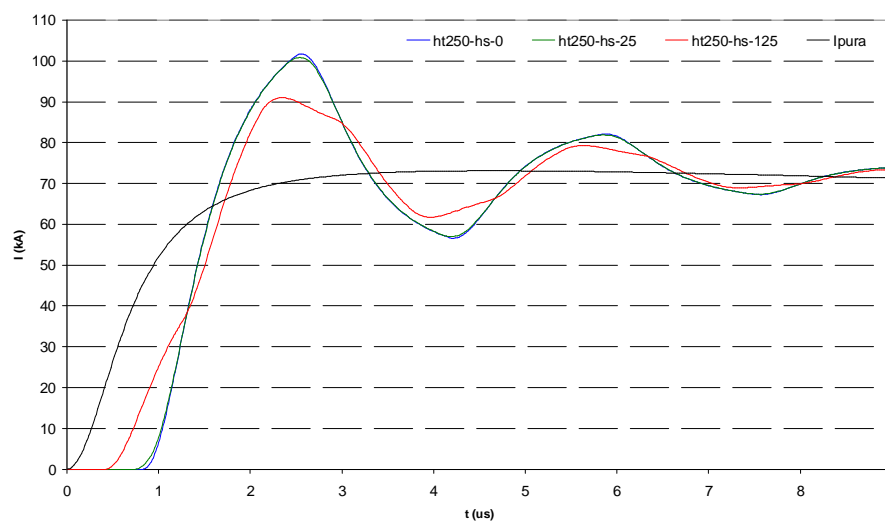


Figura 4.46. Corrente “pura” e correntes “contaminadas” para valores de  $h_s^{cont}$  de 0 m, 25 m e 125 m ( $h_t = 250$  m,  $Z_{ch} = 1$  k $\Omega$ ,  $Z_t = 275$   $\Omega$  e  $R_g = 5$   $\Omega$ ). A corrente “pura” se refere ao caso base ( $h_s = 0$  m).

Na Figura 4.46 tem-se:

- ht250-hs-0: corrente “contaminada” para  $h_s^{cont} = 0$  m;
- ht250-hs-25: corrente “contaminada” para  $h_s^{cont} = 25$  m;
- ht250-hs-125: corrente “contaminada” para  $h_s^{cont} = 125$  m;
- Ipura: corrente “pura”.

Na Figura 4.46 nota-se que as correntes “contaminadas”, diferentemente do caso referente à estrutura de 62,5 m, apresentam oscilações bem mais acentuadas que a corrente “pura”. A Figura 4.47 mostra as correntes “descontaminadas”.

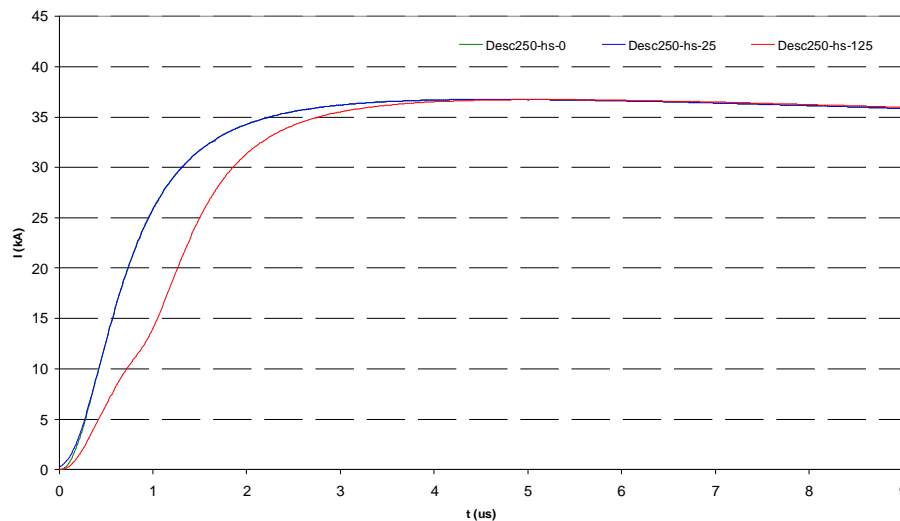


Figura 4.47. Correntes “descontaminadas” para o caso base.  
( $h_t = 250$  m,  $Z_{ch} = 1$  k $\Omega$ ,  $Z_t = 275$   $\Omega$  e  $R_g = 5$   $\Omega$ ).

Na Figura 4.47 tem-se:

- Desc250-hs-0: corrente “descontaminada” para  $h_s = 0$  m e  $h_s^{cont} = 0$  m;
- Desc250-hs-25: corrente “descontaminada” para  $h_s = 0$  m e  $h_s^{cont} = 25$  m;
- Desc250-hs-125: corrente “descontaminada” para  $h_s = 0$  m e  $h_s^{cont} = 125$  m.

Diferentemente ao caso referente ao objeto de 62,5 m de altura (Figura 4.44), a Figura 4.47 mostra que se o processo de “descontaminação” for aplicado para dados obtidos a  $h_s^{cont} \cong h_t/2$ , a corrente “descontaminada” apresenta a relação  $di/dt$ , na porção inicial da onda de corrente, mais lenta que as correntes Desc250-hs-0 e Desc250-hs-25.

As Figuras 4.48 e 4.49 apresentam as corrente “pura”, “contaminada” e “descontaminada” para a estrutura de 250 m, considerando para os valores de 0 m e 125 m, respectivamente. Essas figuras mostram que a corrente “contaminada” possui valor de pico e tempo de frente diferentes da corrente “pura”, além disso, diferencia-se por apresentar oscilações na parte frontal da corrente.

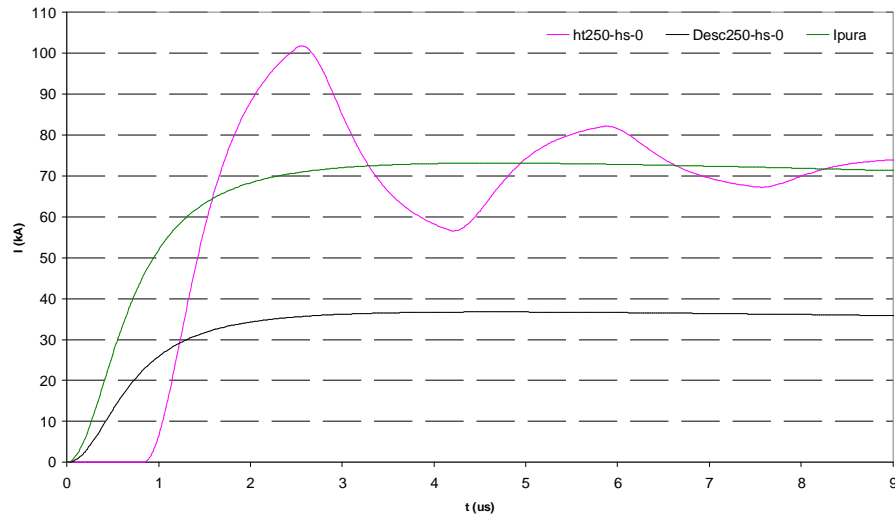


Figura 4.48. Corrente “contaminada”, corrente “pura” e corrente “descontaminada” para  $h_s = 0$  m ( $h_t = 250$  m,  $Z_{ch} = 1$  k $\Omega$ ,  $Z_t = 275$   $\Omega$  e  $R_g = 5$   $\Omega$ ). A corrente “pura” se refere ao caso base ( $h_s = 0$  m).

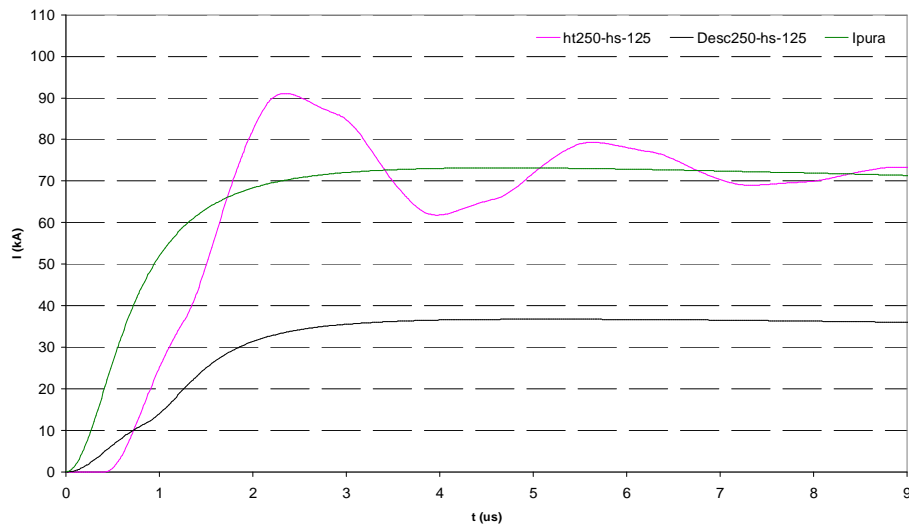


Figura 4.49. Corrente “contaminada”, corrente “pura” e “descontaminada” para  $h_s = 125$  m ( $h_t = 250$  m,  $Z_{ch} = 1$  k $\Omega$ ,  $Z_t = 275$   $\Omega$  e  $R_g = 5$   $\Omega$ ). A corrente “pura” se refere ao caso base ( $h_s = 0$  m).

### 4.2.3. Influência da impedância do canal $Z_{ch}$

Rakov (2001) em suas pesquisas cita valores de impedância do canal da descarga entre  $600 \Omega$  e  $2,5 \text{ k}\Omega$ , considerando estudos sobre os oscilogramas das correntes adquiridos à altura de  $533 \text{ m}$  da torre de Ostankino, na Rússia. Para tal avaliação foi assumida uma impedância da torre constante e igual a  $300 \Omega$ .

As simulações realizadas neste item mostram os resultados obtidos para diferentes valores de  $Z_{ch}$ , tendo sido utilizados no processo de “descontaminação” os seguintes valores de  $Z_{ch}$ :  $500 \Omega$ ,  $1000 \Omega$ ,  $1500 \Omega$  e  $2500 \Omega$ . A Figura 4.50 mostra a corrente “contaminada” e as correntes “descontaminadas” com uso de diferentes valores de  $Z_{ch}$  e a corrente “pura” correspondente a  $Z_{ch} = 1 \text{ k}\Omega$ .

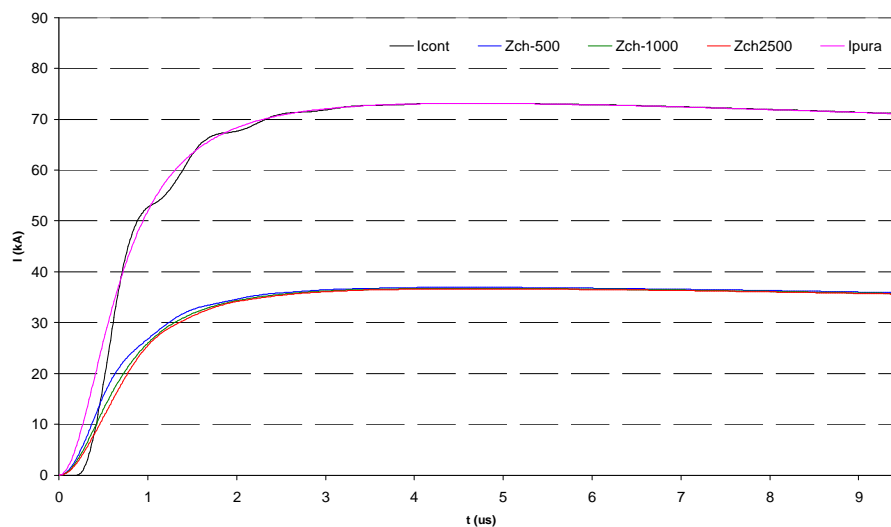


Figura 4.50. Corrente “contaminada”, corrente “pura” e correntes “descontaminadas” ( $h_t = 62,5 \text{ m}$ ,  $h_s = 0 \text{ m}$ ,  $Z_t = 275 \Omega$  e  $R_g = 5 \Omega$ ). A corrente “pura” se refere ao caso base ( $Z_{ch} = 1 \text{ k}\Omega$ ).

Na Figura 4.50 tem-se:

- Icont: corrente “contaminada”;
- Zch-500: corrente “descontaminada” utilizando  $Z_{ch} = 500 \Omega$ ;
- Zch-1000: corrente “descontaminada” utilizando  $Z_{ch} = 1000 \Omega$ ;

- $Z_{ch}$ -2500: corrente “descontaminada” utilizando  $Z_{ch} = 2500 \Omega$ ;
- $I_{pura}$ : corrente “pura” (considerando  $Z_{ch} = 1 \text{ k}\Omega$ ).

As correntes apresentadas na Figura 4.50 mostram que a impedância do canal não influencia de forma significativa o processo de “descontaminação” da corrente, pelo menos na faixa de valores considerada para  $Z_{ch}$ .

A obtenção da impedância do canal é possível por meio de métodos indiretos como, por exemplo, pela avaliação do coeficiente de reflexão no topo da torre (BERMUDEZ et al, 2003) a partir de medições de correntes em duas alturas diferentes da estrutura ou através do coeficiente de reflexão no topo, sabendo-se o valor da impedância da estrutura (BEIERL, 1992).

#### 4.2.4. Influência da impedância do objeto elevado $Z_t$

As simulações de “descontaminação” da corrente foram realizadas para os valores de  $Z_t$  de  $138 \Omega$ ,  $275 \Omega$  e  $550 \Omega$  para a impedância da torre, e com os demais parâmetros mantidos inalterados. A Figura 4.51 mostra as correntes obtidas para essas condições.

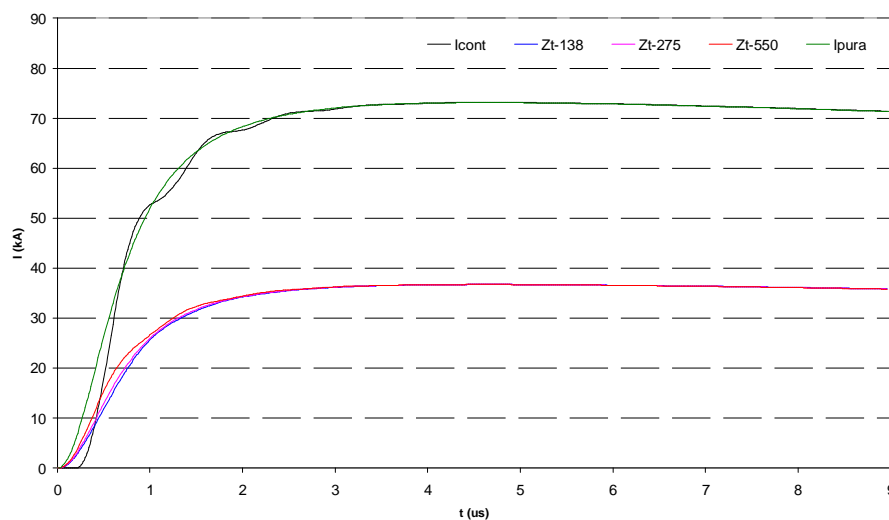


Figura 4.51. Corrente “contaminada”, corrente “pura” e correntes “descontaminadas” para impedância do objeto de  $138 \Omega$ ,  $275 \Omega$  e  $550 \Omega$  ( $h_t = 62,5 \text{ m}$ ,  $h_s = 0 \text{ m}$ ,  $Z_{ch} = 1000 \Omega$  e  $R_g = 5 \Omega$ ). A corrente “pura” se refere ao caso base ( $Z_t = 275 \Omega$ ).

Na Figura 4.51 tem-se:

- $I_{cont}$ : corrente “contaminada”;
- $Z_t-138$ : corrente “descontaminada” para  $Z_t = 138 \Omega$ ;
- $Z_t-275$ : corrente “descontaminada” para  $Z_t = 275 \Omega$ ;
- $Z_t-550$ : corrente “descontaminada” para  $Z_t = 550 \Omega$ ;
- $I_{pura}$ : corrente “pura” ( $Z_t = 275 \Omega$ ).

De forma semelhante à impedância do canal  $Z_{ch}$ , a impedância do objeto elevado  $Z_t$  não influencia de forma considerável para o resultado final do processo de “descontaminação” da corrente, como mostra a Figura 4.51. Esse é um resultado importante, já que as medições da impedância realizadas em estruturas envolvem certo grau de dificuldade, conforme será discutido no item 5.2. Salienta-se ainda que a impedância  $Z_t$  do objeto pode variar durante o transitório.

#### **4.2.5. Influência da resistência de terra $R_g$**

A resistência de terra, no pé da torre, influencia o processo de “contaminação” da corrente devido às reflexões causadas pela descontinuidade torre-solo. Esse processo ocorre continuamente até a estabilização. Na incidência de descargas diretas no solo ocorrem reflexões devido aos diferentes valores de  $Z_{ch}$  e  $R_g$ , resultando em uma corrente definida no presente trabalho como corrente “pura”.

Rakov e Cooray (2005) citam que a condutividade do solo pode variar de  $10^{-4}$  S/m em regiões montanhosas a 5 S/m sobre a superfície dos oceanos, sendo que a derivada do pico da corrente da descarga atmosférica sofre decréscimo com o decréscimo da condutividade do solo no ponto de incidência.

Para uma corrente “contaminada” devido à presença do objeto, realizou-se o processo de “descontaminação” com base no modelo de ondas viajantes, adotando-se para  $R_g$  os valores 5  $\Omega$ , 50  $\Omega$  e 500  $\Omega$ . A Figura 4.52 mostra os resultados obtidos.

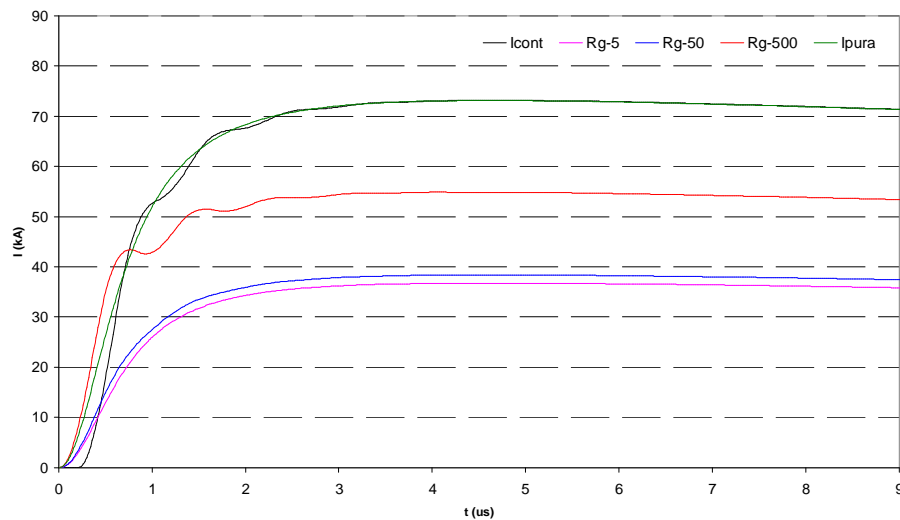


Figura 4.52. Corrente “contaminada”, corrente “pura” e correntes “descontaminadas” para resistência de terra de  $5 \Omega$ ,  $50 \Omega$  e  $500 \Omega$ . ( $h_t = 62,5$  m,  $h_s = 0$  m,  $Z_{ch} = 1000 \Omega$  e  $Z_l = 275 \Omega$ ). A corrente “pura” se refere ao caso base ( $R_g = 5 \Omega$ ).

Na Figura 4.52 tem-se:

- Icont: corrente “contaminada”;
- Rg-5: corrente “descontaminada” para  $R_g = 5 \Omega$ ;
- Rg-50: corrente “descontaminada” para  $R_g = 50 \Omega$ ;
- Rg-500: corrente “descontaminada” para  $R_g = 500 \Omega$ ;
- Ipura: corrente “pura” ( $R_g = 5 \Omega$ ).

A Figura 4.52 mostra que a resistência de terra  $R_g$  pode afetar de modo significativo as correntes “descontaminadas”, tanto na amplitude como na parte inicial da onda, onde podem ocorrer oscilações no caso de valores elevados de  $R_g$ . Deve-se ressaltar, contudo, que o efeito da resistência de terra no processo de “contaminação” das correntes é oposto, ou seja, as oscilações tendem a aumentar de intensidade à medida que o valor de  $R_g$  diminui.

## **5 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE “CONTAMINAÇÃO” E “DESCONTAMINAÇÃO” DA CORRENTE NO SISTEMA IEE/USP**

O desenvolvimento da metodologia do processo de “descontaminação” da corrente foi baseado no modelo proposto por Rachidi et al (2002), o qual descreve de uma forma mais genérica o comportamento da onda da corrente de descarga de retorno na presença de objetos elevados.

Como visto no Capítulo 4, no presente estudo foram desenvolvidos pacotes de programas computacionais para a avaliação das correntes “pura”, “contaminada” e “descontaminada”. É importante salientar, todavia, uma diferença fundamental para o programa de “descontaminação”, já que foi baseado para medições feitas na base da torre, diferentemente de Guerrieri et al (1998) e Bermudez et al (2003), com as devidas modificações feitas a partir do modelo proposto por Rachidi et al (2002), que consideram medições realizadas no topo.

Com os programas de “contaminação” (CONTAMINATORRE) e “descontaminação” (DESCONTAMINA) das correntes e o conhecimento dos parâmetros do sistema existente no IEE/USP para captação e medição de correntes de descargas atmosféricas, foram realizadas simulações para aplicação do procedimento apresentado no caso de uma situação real.

Este Capítulo é dedicado à descrição do sistema de medição IEE/USP, à determinação experimental da impedância de surto da torre e por fim a um estudo de caso referente a uma medição de corrente efetuada pelo sistema.

### **5.1. DESCRIÇÃO DO SISTEMA IEE/USP**

Uma parcela significativa das interrupções em redes de distribuição de energia se deve às sobretensões induzidas por descargas próximas às linhas. Apesar desse fenômeno vir sendo



estudado teórica e experimentalmente há muito tempo por pesquisadores de diversos países, sérias divergências são ainda verificadas entre as principais teorias existentes (PIANTINI; JANISZEWSKI, 2003).

Em (PIANTINI, 1991) foi desenvolvido um novo modelo, utilizando-se como base a teoria de Rusck (RUSCK, 1977), porém com modificações tais que permitiram que se levasse em conta tanto os efeitos de descargas em estruturas metálicas como os efeitos do comprimento do canal de descarga, do comprimento e configuração da linha e da presença do “leader” ascendente. Embora esse modelo tenha sido validado através de comparações com resultados de pesquisas experimentais realizadas no Japão, julgou-se conveniente avaliar o seu desempenho em outras situações. Dada a complexidade do fenômeno, tal avaliação só pode ser feita caso sejam conhecidos todos os parâmetros que afetam significativamente as tensões induzidas. A dificuldade na obtenção de dados nessas condições é certamente uma das razões para a existência, ainda hoje, de teorias conflitantes. Assim, a limitação do número de casos disponíveis e o desconhecimento de parâmetros como, por exemplo, a velocidade de propagação da corrente, o comprimento do canal da descarga e a ocorrência ou não do “leader” ascendente, nas pesquisas japonesas, motivaram o desenvolvimento de um modelo em escala reduzida, o qual permitiu uma análise bem mais abrangente do fenômeno (PIANTINI; JANISZEWSKI, 1992). Posteriormente foi desenvolvido um novo modelo matemático, a partir daquele proposto por Piantini (1991). Esse modelo, denominado ERM (“Extended Rusck Model”), possibilita a determinação das tensões induzidas em situações em que a linha encontra-se protegida através de cabo-guarda e/ou pára-raios, considerando também a presença de transformadores e do neutro multiterrado (PIANTINI; JANISZEWSKI, 1998 ;PIANTINI; JANISZEWSKI, 2003; PIANTINI et al, 2004).

Posteriormente foi desenvolvido e implementado, no campus da Universidade de São Paulo em São Paulo, um sistema para estudo de tensões induzidas em linhas de distribuição devido a descargas atmosféricas indiretas através da obtenção simultânea das formas de onda de tensões induzidas em duas linhas com diferentes configurações (PIANTINI et al, 2002; PIANTINI et al, 2003). Um dos objetivos do estudo diz respeito à avaliação da eficácia do pára-raios como dispositivo de proteção contra descargas atmosféricas. Destaca-se o pioneirismo desse trabalho, o primeiro a aplicar em um sistema em escala 1:1 a metodologia desenvolvida em (PIANTINI; JANISZEWSKI, 1992) para avaliação do efeito da utilização de pára-raios na redução das tensões induzidas (PIANTINI et al, 2004).

O sistema possibilita a obtenção de registros simultâneos das correntes de descargas atmosféricas incidentes em uma torre de captação e das correspondentes tensões induzidas em duas linhas de distribuição monofásicas situadas nas proximidades da mesma. A Figura 5.1 apresenta o esquema das linhas experimentais, que têm aproximadamente 2,7 km de comprimento e não estão energizadas. Na linha mais afastada da torre foram instalados pára-raios nos pontos indicados. As linhas são sustentadas pelos mesmos postes e instaladas nos dois extremos de cruzetas com aproximadamente 6 m de comprimento. Essa separação das linhas visa diminuir a influência de uma sobre a outra em função do acoplamento. Ambas as linhas possuem em suas extremidades resistores com valor de resistência igual ao da impedância característica, para minimizar a ocorrência de reflexões das ondas de tensão (CARVALHO et al, 2005).

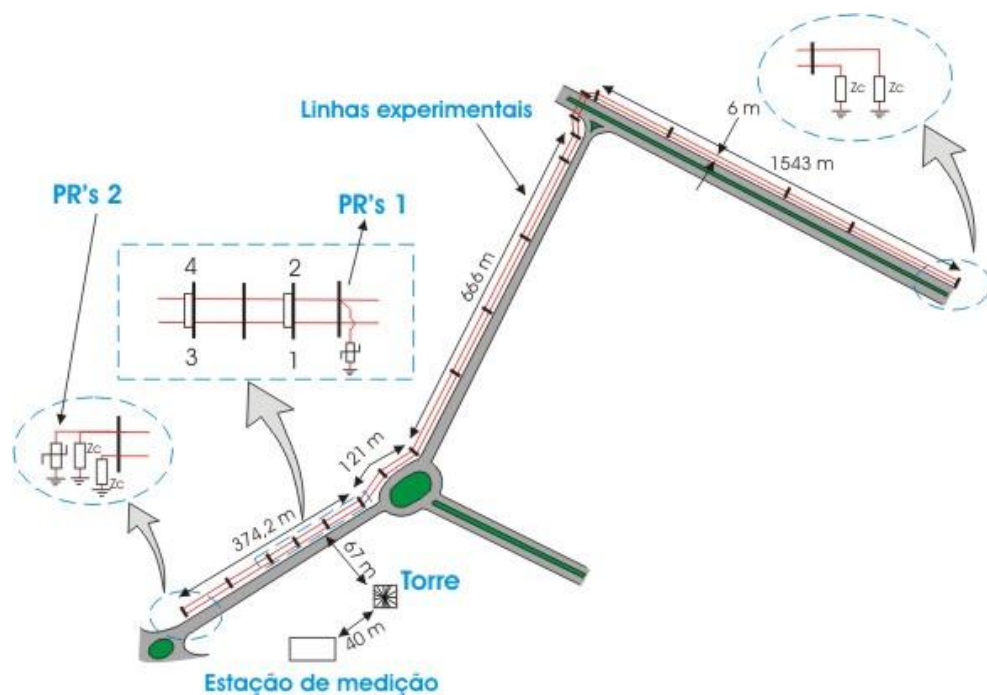


Figura 5.1. Visão geral do sistema desenvolvido no IEE/USP (CARVALHO et al, 2005). PR's: pára-raios;  $Z_c$ : impedância característica dos condutores; 1, 2, 3, 4: pontos de medição de tensões induzidas.

A torre na qual podem incidir as descargas é de aço galvanizado, com estais isolantes e altura de 62,5 m. A base é isolada da terra através de isoladores de porcelana tipo suporte cilíndrico, como ilustrado nas figuras 5.2 e 5.3. Para a medição das correntes das descargas, na base da torre foi instalado um resistor “shunt” por onde a corrente flui até atingir o sistema de

aterramento. O resistor “shunt” foi projetado com resistência de  $3,28 \text{ m}\Omega$ , possibilitando a medição direta das correntes das descargas pelo osciloscópio (CARVALHO et al, 2005). O resistor “shunt”, em aço inoxidável tipo 309 (material não magnético) suporta correntes de impulso de até 100 kA. Foram realizadas várias medições da resistência de terra na base da torre, sendo que o valor médio obtido foi igual a  $5 \Omega$ .

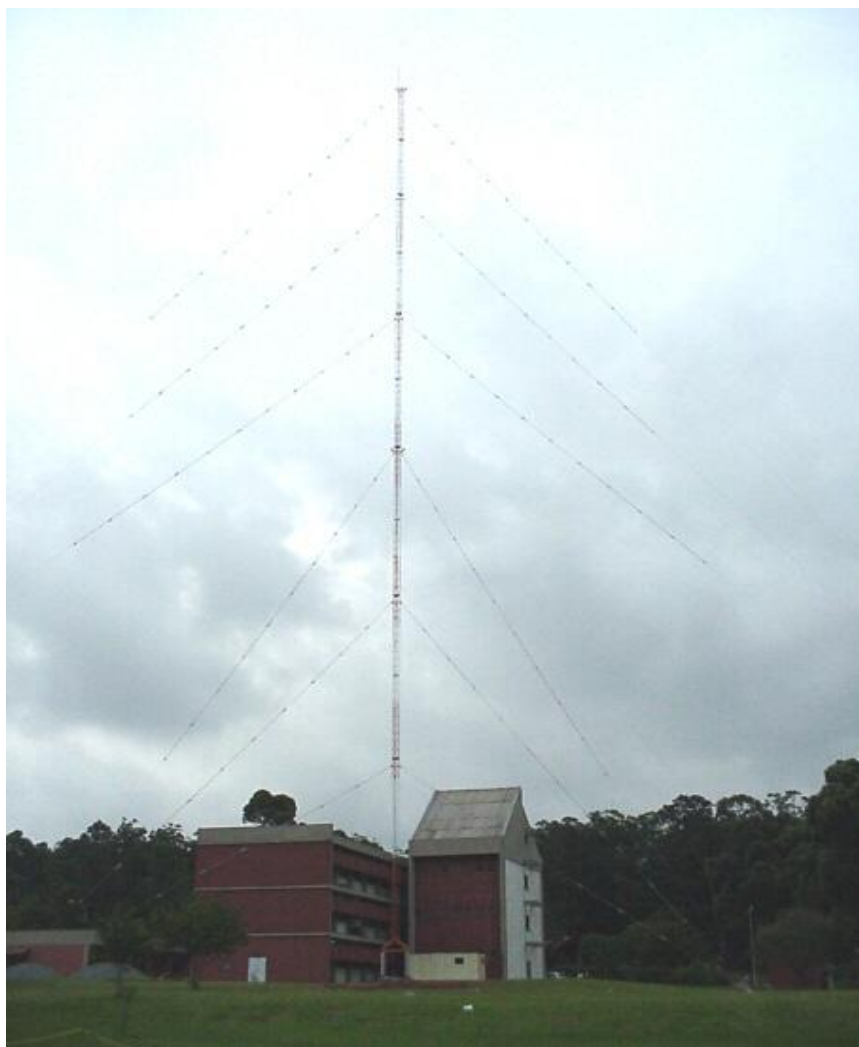


Figura 5.2. Mastro para captação de descargas.

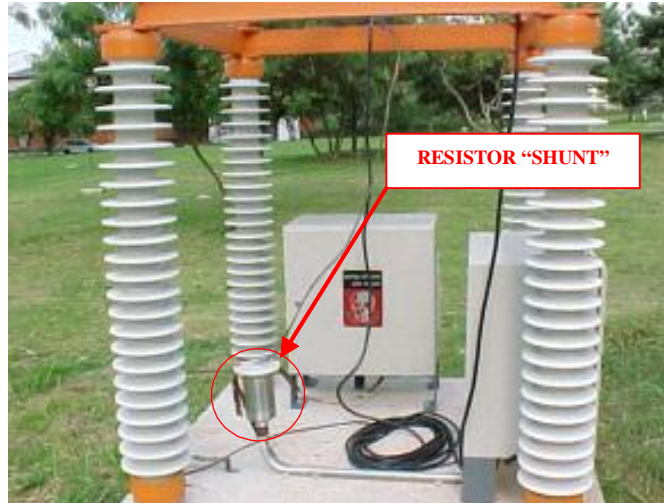


Figura 5.3. Detalhe da base da torre, com o resistor "shunt" para medição de correntes.

A Figura 5.4 mostra o interior da cabine onde se localiza a instrumentação relativa ao sistema que gerencia a aquisição e armazenamento dos dados advindos dos sensores de tensões induzidas e correntes de descargas. A Figura 5.5 apresenta dois dos pontos de medição de tensões induzidas na linha experimental (pontos 1 e 2 indicados na Figura 5.1) e a Figura 5.6 exibe um trecho da linha.



Figura 5.4. Estação de medição.



Figura 5.5. Pontos de medição 1 e 2 de tensões induzidas na linha experimental.



Figura 5.6. Trecho da linha experimental.

## 5.2. DETERMINAÇÃO DA IMPEDÂNCIA DA TORRE

A impedância de surto de uma estrutura é de grande importância para a avaliação do comportamento da corrente ao longo da mesma e para a determinação das sobretensões que resultam nas cadeias de isoladores em decorrência de descargas atmosféricas na torre ou em cabos-guarda de linhas de transmissão. Diversos pesquisadores (KAWAI, 1969; SARGENT; DARVENIZA, 1969; ISHII; BABA, 1997; BABA; ISHII, 1999; MOTOYAMA; MATSUBARA, 2000; GUTIÉRREZ R. et al, 2001; RAKOV, 2001; GRCEV; RACHIDI, 2004) têm desenvolvido modelos e métodos para avaliar a impedância de estruturas, tais como as torres de transmissão e de telecomunicações. Grcev e Rachidi (2004) descrevem um resumo das metodologias aplicáveis em torres para avaliação da impedância de surto.

A primeira formulação teórica da impedância de surto de torre foi proposta por Jordan (1934) e foi baseada na fórmula de indutância de Neumann. Posteriormente outros modelos baseados na teoria dos campos eletromagnéticos foram propostos (WAGNER; HILEMAN, 1960; SARGENT; DARVENIZA, 1969). Outras pesquisas com medição direta da impedância de surto na torre foram realizadas, como exemplo por Kawai (1969).

Ishii e Baba (1997) citam que os seguintes métodos são representativos para a investigação das características da impedância de surto de uma torre:

- medição em torres reais;
- medição em modelos em escalas reduzida;
- estudos analíticos ou em geometria simplificada;
- análise numérica baseada na teoria eletromagnética.

Grcev e Rachidi (2004) citam que os métodos de caracterização do comportamento transitório de torres atingidas por descargas atmosféricas podem ser classificados da seguinte forma:

- teóricas:
  - domínio do tempo;
  - domínio da frequência baseado em: teoria de circuitos e das linha de transmissão, teoria das guias de ondas e teoria dos campos eletromagnéticos;

- experimentais:
  - modelos em escala;
  - torres reais.

Kawai (1964) comenta as dificuldades de medição da impedância de torres pelo fato das mesmas consistirem em condutores verticais aterrados. Ele menciona que o tempo de propagação de uma onda entre o topo e a base é de  $0,2 \mu\text{s}$  ou menos para uma torre com 20 m de altura. Grcev e Rachidi (2004) mencionam que há diversas definições para a impedância de surto. Essa impedância depende não só da geometria da torre como também da forma de onda de corrente injetada (degrau unitário, rampa, dupla exponencial, etc.).

Para o presente trabalho, salienta-se a dificuldade inicial para a realização da medição, uma vez que uma torre funciona como uma antena de rádio, tipicamente de ondas médias. A frequência das ondas captadas na torre IEE/USP foram da ordem de 1,4 MHz conforme mostrado na Figura 5.7. Motoyama et al (1996) relatam a dificuldade de realizar medições na “CN Tower”, já que as medições de  $di/dt$  apresentam um sinal extra das ondas portadoras de rádio, cuja frequência é da ordem de 100 kHz. A Figura 5.8 mostra uma das ondas de  $di/dt$  associada à onda de rádio medida na “CN Tower”.

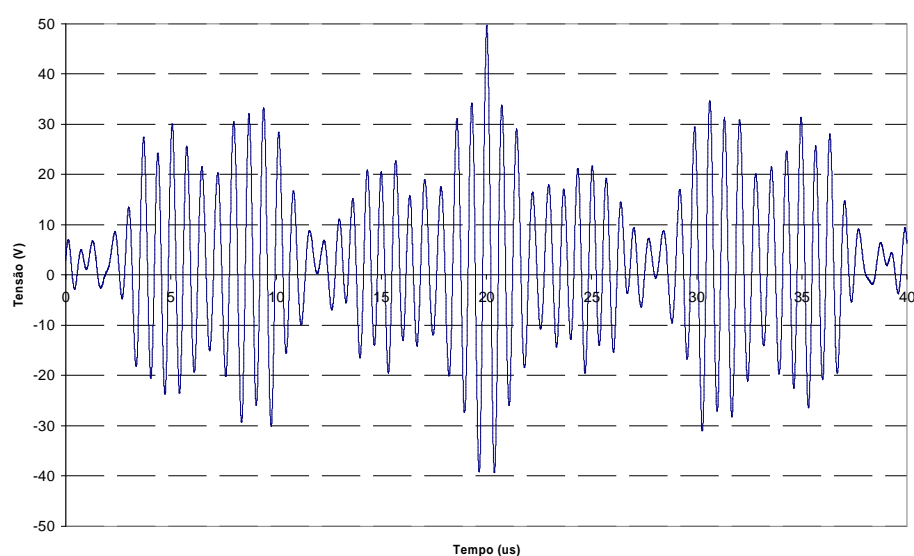


Figura 5.7. Oscilograma da tensão obtida na torre IEE/USP, estando ela totalmente isolada.

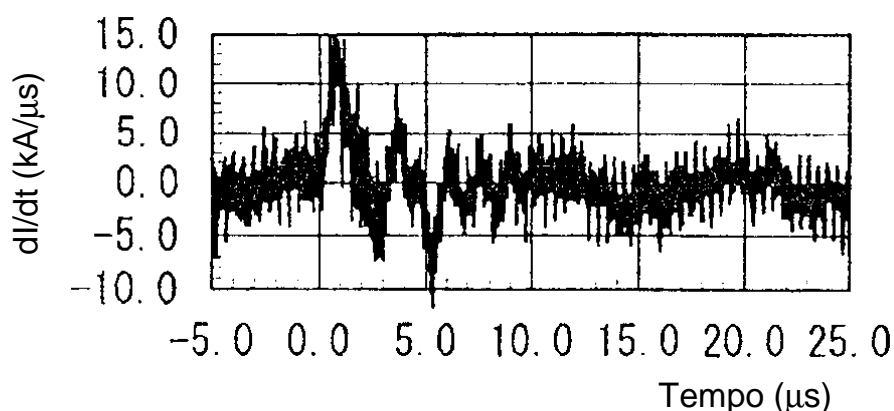


Figura 5.8. Relação  $dI/dt$  medida na “CN Tower” (adaptada de Motoyama et al, 1996).

A medição da impedância da torre IEE/USP foi realizada injetando-se um degrau de tensão na base (entre a parte metálica da base da torre e o ponto de aterramento), estando a torre isolada do solo e de demais equipamentos, adquirindo-se, assim, um oscilograma de tensão em regime transitório com um osciloscópio. A partir desse oscilograma foi calculado o valor da impedância de surto.

Para se amenizar o “efeito antena” da torre e, por conseguinte, a relação ruído/sinal, a tensão injetada na base foi a mais elevada possível, sendo para isso utilizado o sistema indicado na Figura 5.9.

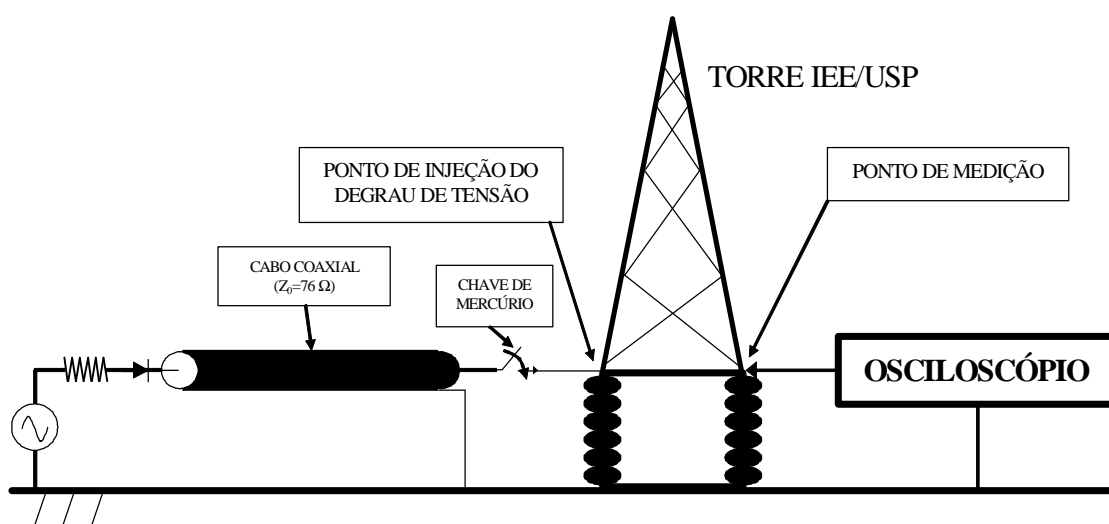


Figura 5.9. Esquema do circuito utilizado para determinação da impedância de surto da torre IEE/USP.



A fonte de tensão corresponde à tensão alternada em 60 Hz superior a 1 kV, seguida pela retificação em meia onda, através do conjunto de diodos e com corrente limitada pela inserção em série de um resistor. Essa tensão retificada em meia onda foi injetada no cabo coaxial (impedância característica  $Z_g$  de 76  $\Omega$ ). Após a estabilização da tensão no cabo, ocorre o fechamento da chave de mercúrio na base da torre isolada. Com o uso desse sistema foram obtidos diversos oscilogramas de tensão, um dos quais é apresentado na Figura 5.10.

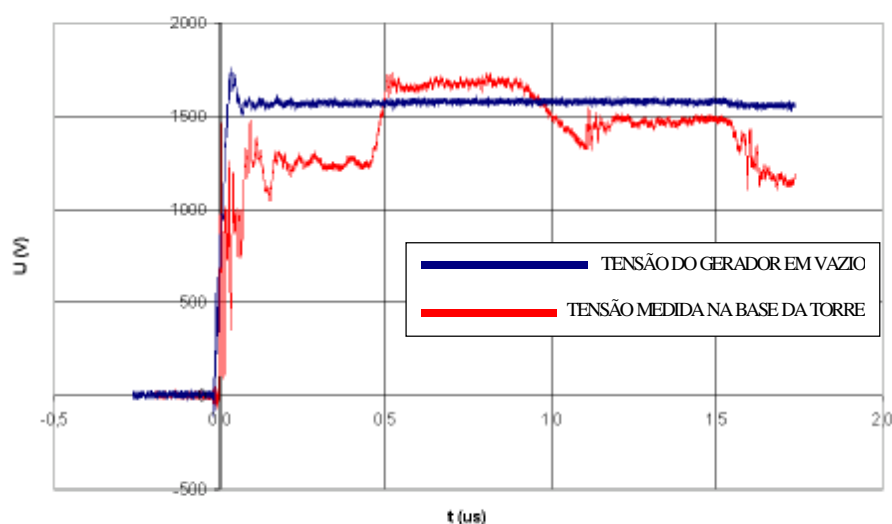


Figura 5.10. Exemplo de oscilograma obtido através do circuito indicado na Figura 5.9.

A chave de mercúrio foi escolhida pelo fato de apresentar um tempo de fechamento rápido, evitando-se assim ruídos no transitório. O tempo de subida do degrau de tensão foi de aproximadamente 10 ns. Através da análise de oscilogramas referentes a diversas medições, obteve-se para a torre valores de impedâncias de surto variando na faixa de 270  $\Omega$  a 280  $\Omega$ , com valor médio de 275  $\Omega$ . A impedância de surto foi determinada através da expressão:

$$V = \frac{Z_t}{Z_t + Z_g} \cdot E \quad (5.1),$$

onde  $V$  é a tensão medida na base da torre;

$E$  é a tensão do gerador em vazio;

$Z_t$  é a impedância da torre;

$Z_g$  é a impedância do cabo coaxial ( $76 \Omega$ ).

A expressão (5.1) foi aplicada antes da chegada, à base da torre, da primeira reflexão no topo da mesma.

Além da impedância de surto, foi estimada a velocidade de propagação da onda da tensão ao longo da torre. Pela Figura 5.10 tem-se que o tempo de chegada, à base da torre, da onda injetada neste ponto e refletida no topo, é de aproximadamente  $0,45 \mu\text{s}$ . Assim, sendo a distância percorrida pela onda igual a aproximadamente  $2 \times 61 \text{ m} = 122 \text{ m}$ , pode-se estimar a

velocidade de propagação  $v = \frac{122 \text{ m}}{0,45 \text{ ms}} = 2,71 \times 10^8 \text{ m/s}$ . Esse valor corresponde a cerca de

90% da velocidade da luz, o qual se mostra coerente com os valores obtidos por Motoyama e Matsubara (2000), que ficaram na faixa de 80% a 90% da velocidade da luz. Essa faixa de variação se deve aos elementos que compõem as torres, tais como as cruzetas, os elementos horizontais e os elementos inclinados. Em seus estudos, Motoyama e Matsubara (2000) analisaram três diferentes torres: uma em escala reduzida, com altura de 3 m, uma torre real de 500 kV com altura de 48,2 m e a última também real de UHV (“ultra-high-voltage”) com altura de 120 m.

### 5.3. ANÁLISE DE CASO

Este item por objetivo analisar o comportamento da corrente de uma descarga atmosférica que incidiu na torre IEE/USP em 06/04/2004 às 17:00:32. O osciloscópio utilizado para efetuar a medição da tensão entre os terminais do resistor “shunt” descrito no item 5.1 foi de fabricação Tektronix, modelo TDS3000, sendo a taxa de amostragem utilizada de 25 MS/s. A Figura 5.11 exibe o oscilograma da corrente medida na torre.

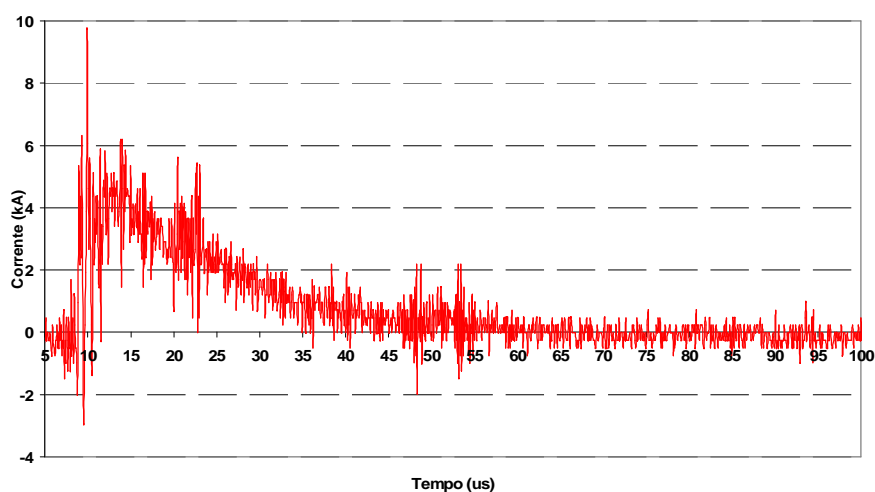


Figura 5.11. Corrente medida na torre IEE/USP em 06/04/2004 às 17:00:32.

A Figura 5.11 apresenta muitos ruídos sobrepostos à onda de corrente, sendo necessário, assim, a aplicação de uma metodologia para minimizar tais distúrbios. A existência desses ruídos se deve a várias razões, como a estrutura da torre funcionando como uma antena receptora de ondas de rádio, a amplitude relativamente baixa da corrente, etc.

Uma forma de se verificar a corrente com poucos ruídos está mostrada na Figura 5.12.

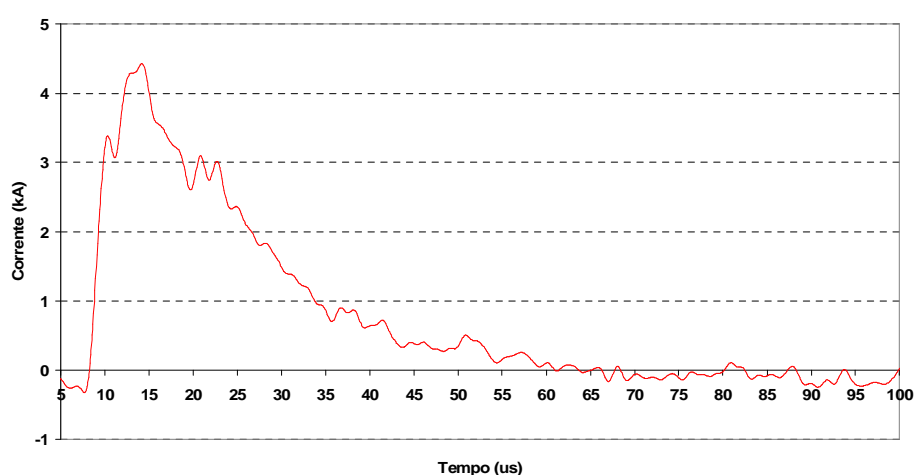


Figura 5.12. Corrente após a aplicação de “FFT smoothing”.

A corrente da Figura 5.12 foi obtida aplicando-se a ferramenta “FFT smoothing”, com base no programa computacional Origin, a partir dos dados da Figura 5.11, porém desde já é necessário salientar que o uso desse método pode eliminar informações importantes que não

se enquadram na categoria de ruídos. Salienta-se ainda que todos os métodos de minimização de distúrbios neste item foram feitos com a aplicação de “FFT smoothing”.

A técnica de “FFT smoothing”, ou filtro de Savitzki-Golay, consiste em um filtro de sinais analíticos (CERQUEIRA et al, 2000), particularmente do tipo passa-baixa (PRESS et al, 1992). Para realizar a suavização de um sinal utiliza-se a seguinte metodologia básica:

- define-se a origem do sinal;
- define-se a largura do intervalo;
- define-se o ponto central do intervalo;
- remove-se o ponto central do conjunto de pontos do intervalo;
- ajusta-se através do método de mínimos quadrados, um polinômio de grau variável aos pontos restantes;
- utiliza-se o polinômio para estimar o valor para o ponto removido;
- desloca-se o intervalo para o ponto seguinte do sinal original e repete-se o processo anterior.

A Figura 5.13 mostra as ondas das correntes medida e suavizada superpostas.

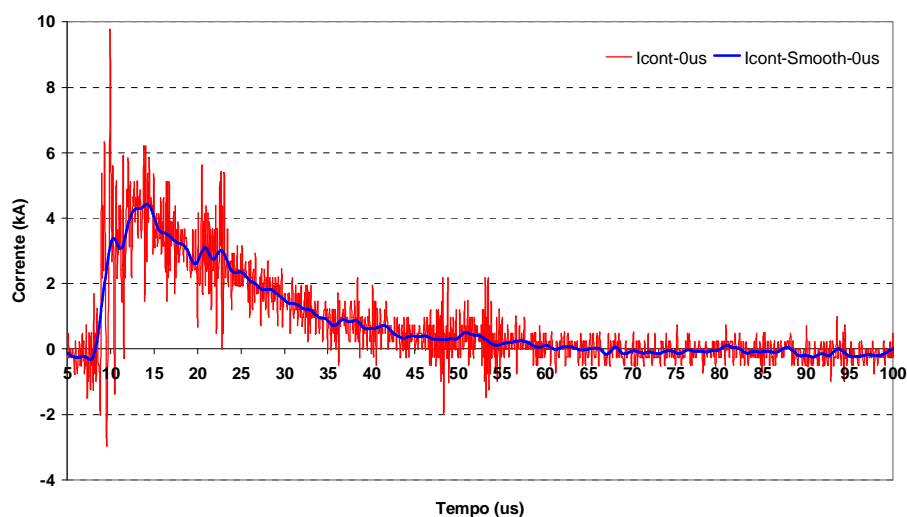


Figura 5.13. Correntes medida e suavizada superpostas.

Na Figura 5.13 tem-se:

- Icont-0us: corrente “contaminada” medida;

- Icont-Smooth-0us: corrente “contaminada” com aplicação de “FFT Smoothing”.

A Figura 5.14 mostra as correntes “contaminada” e “descontaminada” para o caso da corrente da Figura 5.11. Para a realização do processo de “descontaminação” foram feitas as seguintes considerações:  $h_t = 62,5$  m,  $h_s = 0$  m,  $Z_t = 275 \Omega$ ,  $Z_{ch} = 1$  k $\Omega$  e  $R_g = 5 \Omega$ .

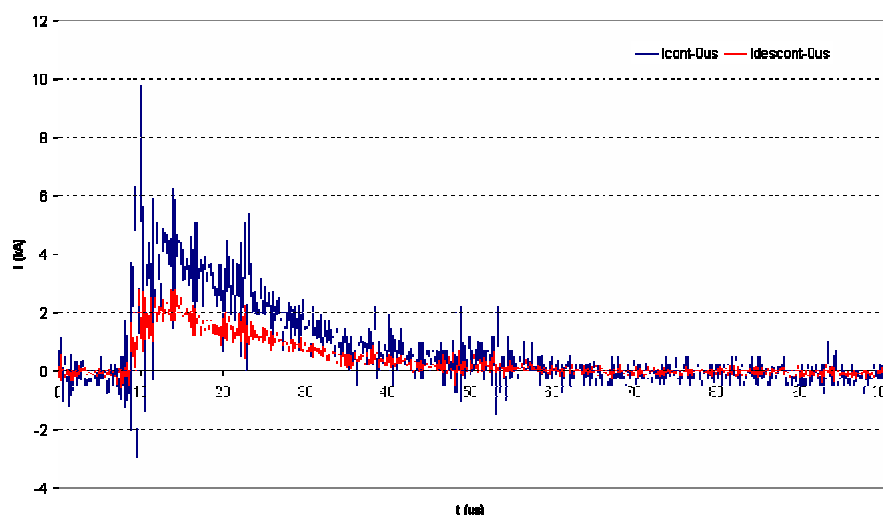


Figura 5.14. Correntes “contaminada” (sem aplicação de “FFT smoothing”) e “descontaminada” ( $h_t = 62,5$  m,  $h_s = 0$  m,  $Z_t = 275 \Omega$ ,  $Z_{ch} = 1$  k $\Omega$  e  $R_g = 5 \Omega$ ).

Na Figura 5.14 tem-se:

- Icont-0us: corrente “contaminada” medida;
- Idescont-0us: corrente “descontaminada”.

As correntes da Figura 5.14 mostram que o valor de pico da corrente “descontaminada” é consideravelmente menor que a corrente “contaminada”, fato já esperado segundo as simulações obtidas no Capítulo 4. Nota-se também que o tempo da frente da corrente medida Icont-0us é similar ao da corrente “descontaminada”.

A Figura 5.15 mostra as correntes “contaminada” e “descontaminada” considerando a aplicação de “FFT smoothing”.

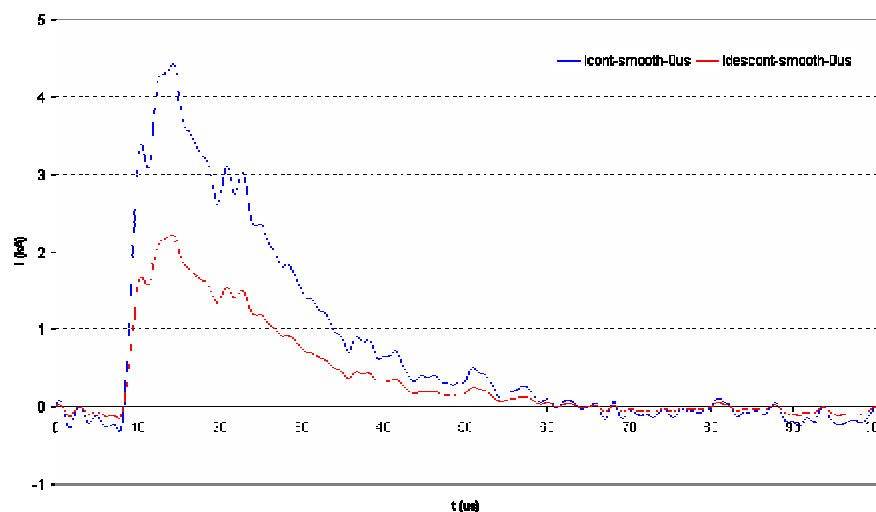


Figura 5.15. Correntes “contaminada” e “descontaminada” com aplicação de “FFT smoothing” ( $h_t = 62,5$  m,  $h_s = 0$  m,  $Z_t = 275 \Omega$ ,  $Z_{ch} = 1$  k $\Omega$  e  $R_g = 5 \Omega$ ).

Na Figura 5.15 tem-se que *Icont-smoth-0us* corresponde à corrente “contaminada” e *Idescont-smoth-0us* à corrente “descontaminada”, ambos com aplicação do filtro “FFT smoothing”. As ondas apresentam formas mais definidas, devido à inexistência de ruídos. Porém, pela forma da onda de corrente não é possível de saber quais são as transições de descontinuidade devido às diferenças entre as impedâncias da torre, do canal e do solo.

As Figuras 5.11 a 5.15 foram tratadas com a consideração de que a corrente de descarga se iniciou no mesmo instante em que se iniciou a aquisição do sinal. Porém, pela Figura 5.11 ou mais nitidamente na Figura 5.12 nota-se que o início da subida da corrente se estabelece em um valor da escala de tempo próximo a 8  $\mu$ s, assim se fez um conjunto de simulações, considerando um deslocamento na escala de tempo de 0  $\mu$ s para 8  $\mu$ s. Esse valor na escala de tempo é função do valor de “offset” da tensão ajustado no osciloscópio, sendo que a aquisição da tensão se inicia atualmente para valores maiores que 20 V, ou seja, em termos de corrente, para um valor mínimo de aproximadamente 6,1 kA.

A Figura 5.16 mostra uma comparação entre as correntes “descontaminadas” apresentadas nas Figuras 5.14 e 5.15. A Figura 5.17 compara a corrente “descontaminada” mostrada na Figura 5.15 com aquela obtida pela aplicação de “FFT smoothing” na onda *Idescont-0us* apresentada na Figura 5.14.

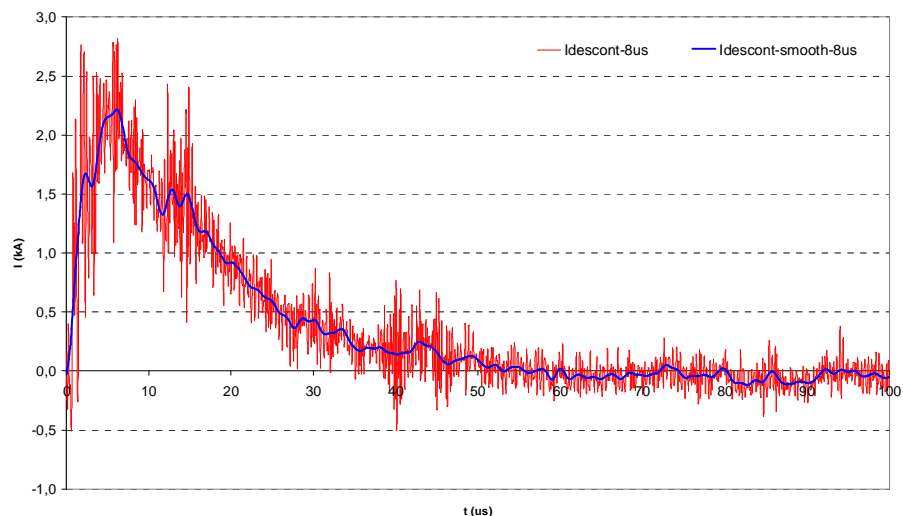


Figura 5.16. Correntes “descontaminadas” sem e com aplicação de “FFT smoothing”.

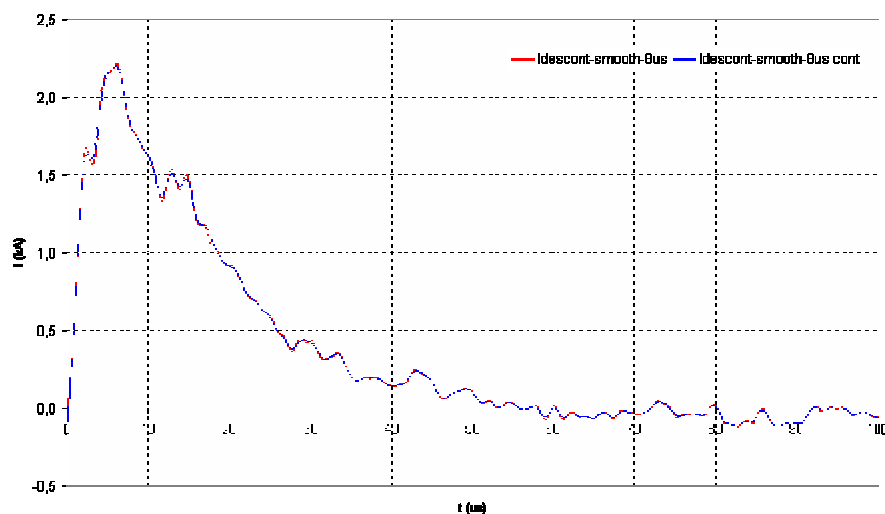


Figura 5.17. Correntes “descontaminadas” com aplicação de “FFT smoothing” (Idescont-smooth-8us) e suavizada após o processo de “descontaminação” (Idescont-smooth-8us cont).

A Figura 5.16 mostra que não existem diferenças significativas entre as correntes, a não ser pela presença de ruídos sobrepostos à corrente Idescont-8us. A Figura 5.17 mostra boa concordância entre as correntes Idescont-smooth-8us e Idescont-smooth-8us cont, ou seja, entre a corrente obtida através da “descontaminação” de dados com aplicação de “FFT smoothing” e a curva “descontaminada” com base em dados sem aplicação de “FFT smoothing”, seguida pela aplicação desse método de minimização dos ruídos após a “descontaminação”. Basicamente, para a Figura 5.17, notam-se diferenças muito pequenas, praticamente desprezíveis, entre as correntes.

A Figura 5.18 mostra as ondas de corrente “pura” com ruídos e suavizada.

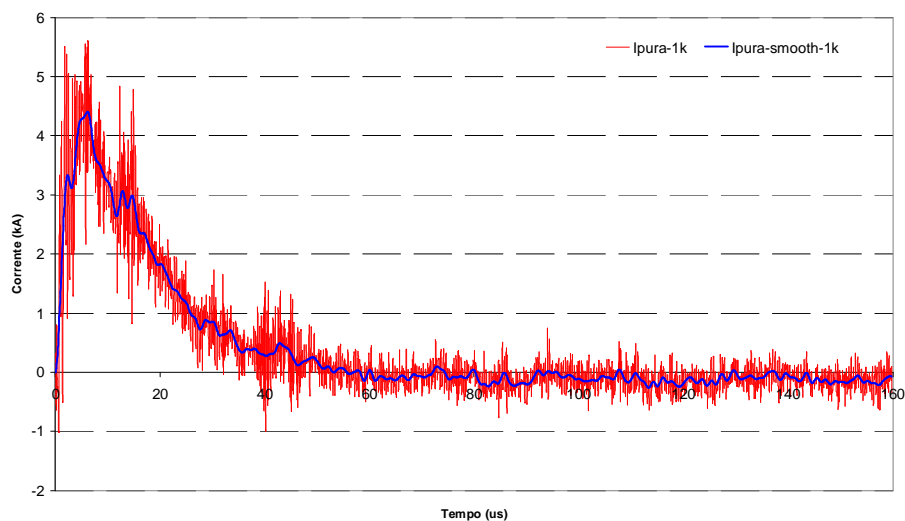


Figura 5.18. Correntes “puras” sem e com aplicação de “FFT smoothing”.

Na Figura 5.18 tem-se:

- $I_{pura-1k}$ : corrente “pura”;
- $I_{pura-smooth-1k}$ : corrente “pura” suavizada.

Para avaliar a influência da impedância do canal da descarga fez-se algumas simulações considerando os valores de  $500\ \Omega$  e  $50\ k\Omega$ . A Figura 5.19 mostra as ondas das correntes “contaminada” e “puras” para esses casos citados, nos quais se utilizou o “FFT smoothing”.

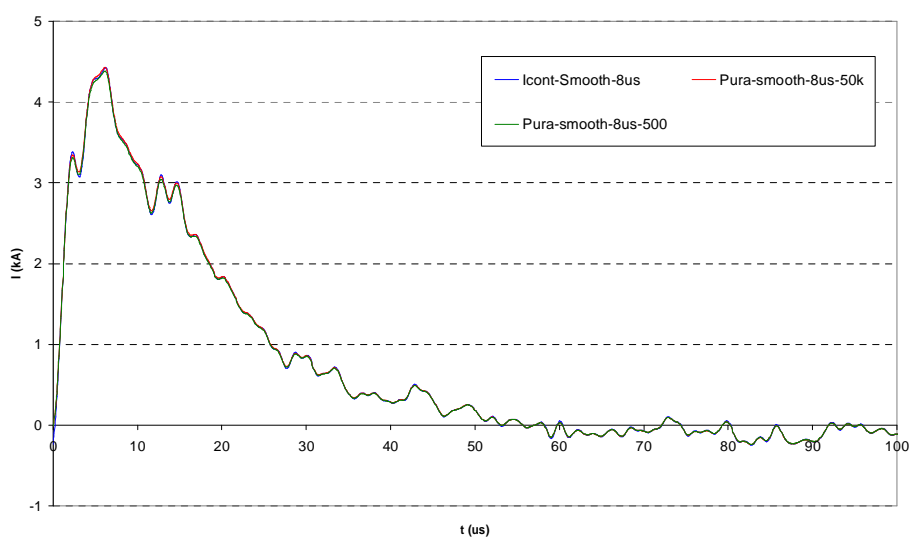


Figura 5.19. Correntes “puras” e corrente “contaminada”.



Na Figura 5.19 tem-se:

- Icont-smooth-8us: corrente “contaminada” medida;
- Pura-smooth-8us-500: corrente “pura” para  $Z_{ch} = 500 \Omega$ ;
- Pura-smooth-8us-50k: corrente “pura” para  $Z_{ch} = 50 \text{ k}\Omega$ ;

Na Figura 5.19 verifica-se que as diferenças entre as correntes “puras” obtidas para os dois valores considerados para a impedância do canal e a corrente medida não são significativas. Isso significa que, para esse caso, a impedância do canal praticamente não influencia a onda da corrente “pura”, visto que a faixa de valores considerada é bastante ampla.

A Figura 5.20 compara a corrente medida filtrada (na base da torre,  $h_s = 0 \text{ m}$ ) com a corrente calculada no topo da mesma ( $h_s = 62,5 \text{ m}$ ).

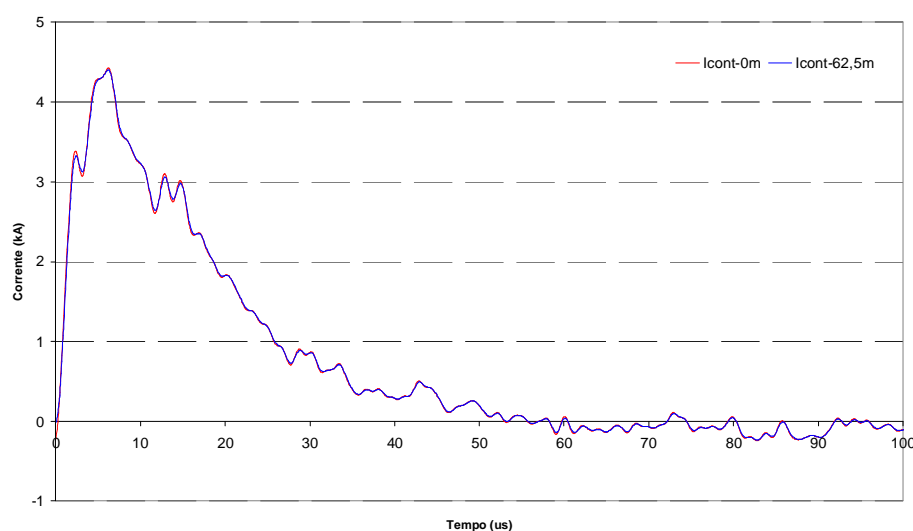


Figura 5.20. Correntes “contaminadas” para  $h_s$  de 0 m e 62,5 m.  
( $h_t = 62,5 \text{ m}$ ,  $Z_{ch} = 1 \text{ k}\Omega$ ,  $Z_t = 275 \Omega$  e  $R_g = 5 \Omega$ )

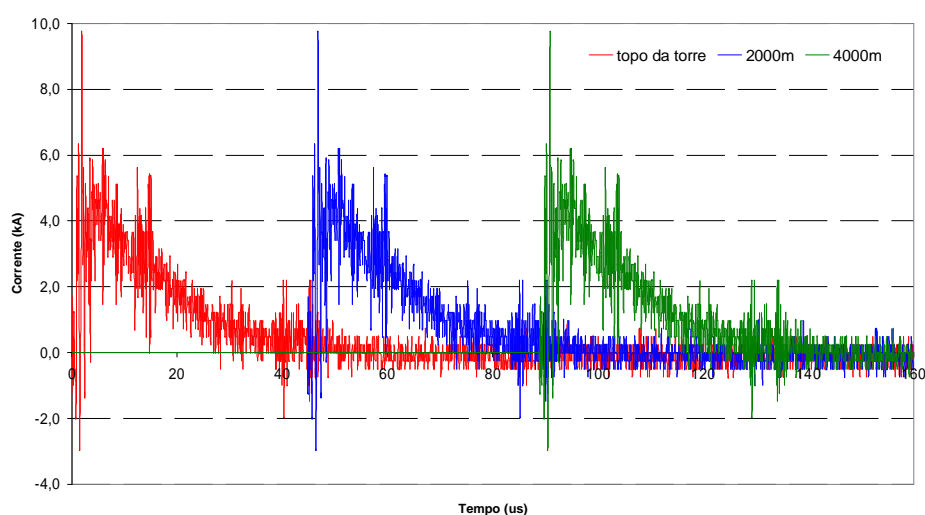
Na Figura 5.20 tem-se:

- Icont-0m: corrente “contaminada” a 0 m (medida na base da torre);
- Icont-62.5m: corrente “contaminada” a 62,5 m (topo da torre).

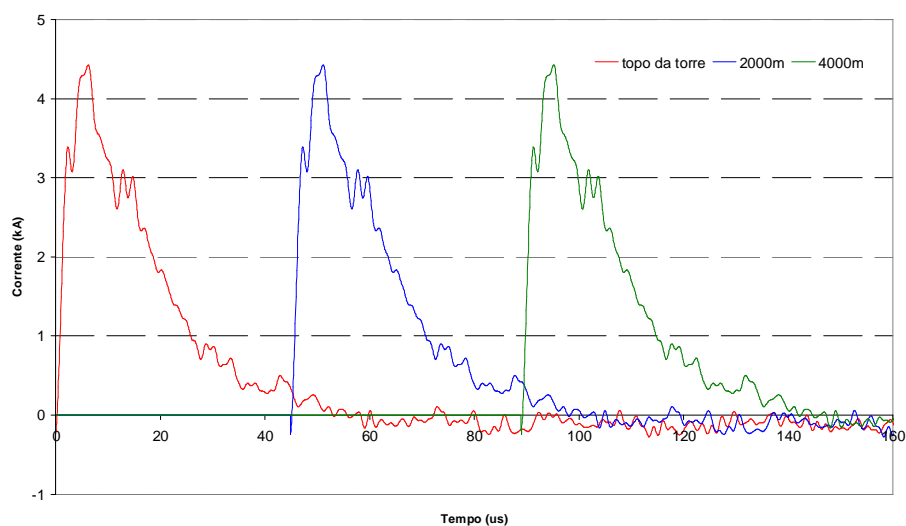
A Figura 5.20 mostra que as correntes “contaminadas” obtidas para diferentes pontos da torre praticamente não apresentam diferenças nas formas de onda, conforme observado também no

item 4.2.2. Esse resultado está de acordo com os estudos realizados por Guedes et al (2002, 2003).

As próximas figuras mostram o comportamento da onda de corrente no canal da descarga em função do espaço-tempo para alguns dos modelos de descarga de retorno da Tabela 2.7. Os valores da velocidade de propagação da frente da corrente utilizadas foram de  $0,15 \times c$  e  $0,30 \times c$ , onde  $c$  corresponde à velocidade da luz ( $300 \text{ m}/\mu\text{s}$ ). A Figura 5.21 mostra a onda de corrente no canal para o modelo TL, considerando a velocidade de propagação da frente da onda de corrente  $v = 0,15 \times c$  para três diferentes posições: topo da torre, 2 km e 4 km.



(a)



(b)

Figura 5.21. Correntes para modelo TL para três diferentes posições ( $v = 0,15 \times c$ ).  
 a) sem aplicação de “FFT smoothing”;  
 b) com aplicação de “FFT smoothing”.

Como o modelo considerado é do tipo TL, a corrente não sofre atenuação nem distorção, assumindo os mesmos valores em todos os pontos do canal, embora seja deslocada no tempo, conforme mostrado na Figura 5.21.

A Figura 5.22 mostra a corrente para o modelo MTLL para as posições no canal de  $z'$  no topo da torre,  $z' = 2$  km e  $z' = 4$  km. Para obter as correntes usou-se comprimento total do canal da descarga  $H_{tot}$  de 6 km e  $v = 0,15 \times c$ , além de utilizar dados da corrente suavizada Icont-smooth-8us. Uman (1984) cita valores de  $H_{tot}$  da ordem de 6 km, da mesma forma que Pinto Jr. e Pinto (2000).

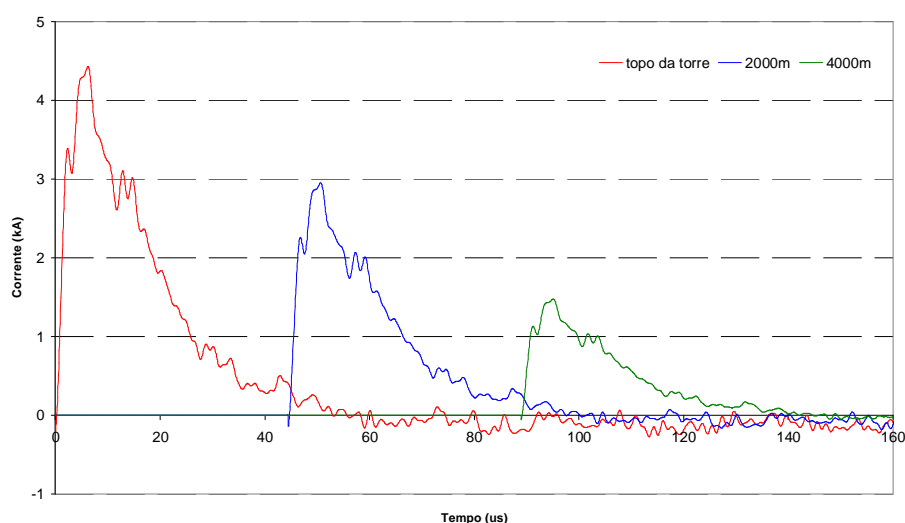


Figura 5.22. Correntes para modelo MTLL em três posições ( $v = 0,15 \times c$ ).

A Figura 5.22 mostra atenuação considerável da corrente em comparação ao caso mostrado na Figura 5.21b.

A Figura 5.23 exhibe as ondas de corrente calculadas pelo modelo MTLE. A constante de atenuação  $\lambda$  utilizada foi de 2 km, conforme sugerido por Nucci (RAKOV, 2003), sendo sido adotado para a velocidade  $v = 0,15 \times c$ . Para a realização dos cálculos foi utilizada a corrente suavizada Icont-smooth-8us.

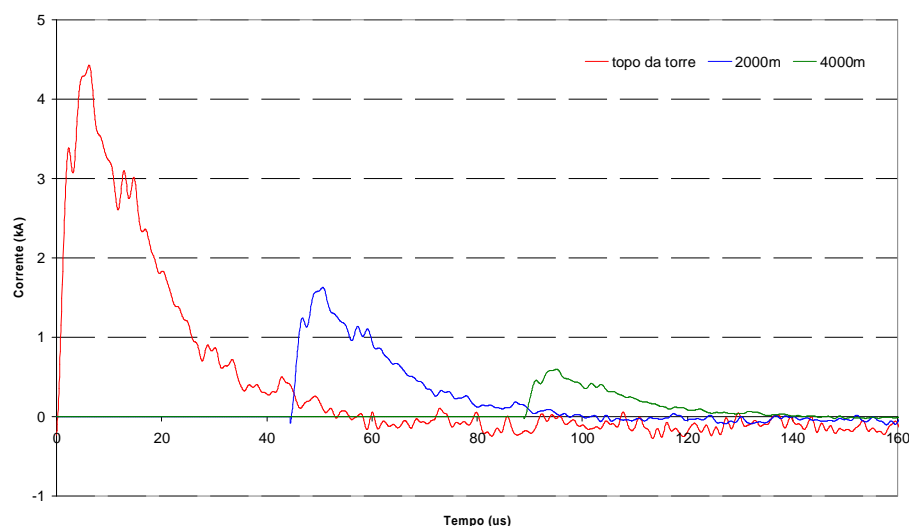


Figura 5.23. Corrente para modelo MTLE para três diferentes posições ( $v = 0,15 \times c$ ).

As correntes apresentadas na Figura 5.23 (alturas de 2 km e 4 km) sofrem atenuação mais forte que as correntes mostradas nas Figuras 5.21 e 5.22, que correspondem aos modelos TL e MTLL, respectivamente. A Figura 5.24 compara as correntes dos três modelos para as três alturas consideradas, lembrando que no topo da torre as correntes são iguais. No caso do modelo TL, as correntes são apresentadas sem aplicação de “FFT smoothing”, enquanto que as correntes relativas ao MTLL e MTLE são mostradas após a aplicação dessa ferramenta.

A Tabela 5 mostra os valores de pico das correntes apresentadas na Figura 5.24 no topo da torre e nas posições de 2 km e 4 km, conforme o modelo adotado para representação da descarga de retorno. No caso do modelo TL, embora a corrente apresentada na figura não tenha sido suavizada, o valor indicado na tabela se refere à corrente obtida após a aplicação de “FFT smoothing”.

Tabela 5 – Valores de pico das correntes apresentadas na Figura 5.25 conforme o modelo adotado para representação da descarga de retorno ( $v = 0,15 \times c$ ).

Modelo	topo da torre	$z' = 2 \text{ km}$	$z' = 4 \text{ km}$
TL	4,43 kA	4,43 kA	4,43 kA
MTLL	4,43 kA	2,95 kA	1,48 kA
MTLE	4,43 kA	1,63 kA	0,60 kA

Na Tabela 5 verifica-se para  $z' = 4$  km que o valor de pico da corrente para o modelo MTLL corresponde a 67% do valor de pico do modelo TL, enquanto que para o modelo MTLE esse valor corresponde a 37% do valor de pico do modelo TL.

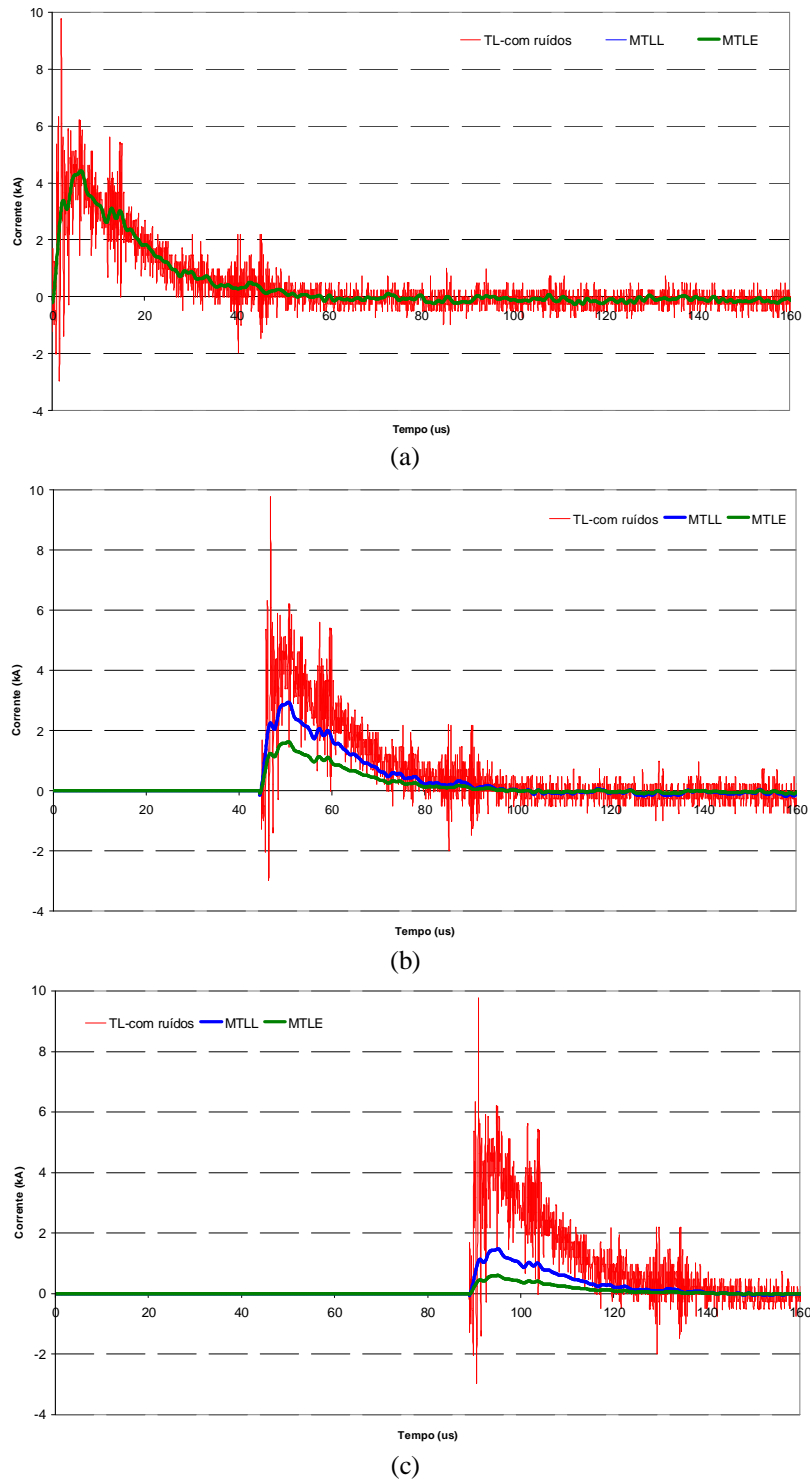


Figura 5.24. Comparação entre as correntes para os modelos TL, MTLL e MTLE para três diferentes posições ( $v = 0,15 \times c$ ).

a) topo da torre

b)  $z' = 2$  km

c)  $z' = 4$  km

A Figura 5.25 mostra as ondas de corrente para o modelo TL no topo da torre e às alturas  $z'$  de 2 km e 4 km, porém considerando  $v = 0,30 \times c$ .

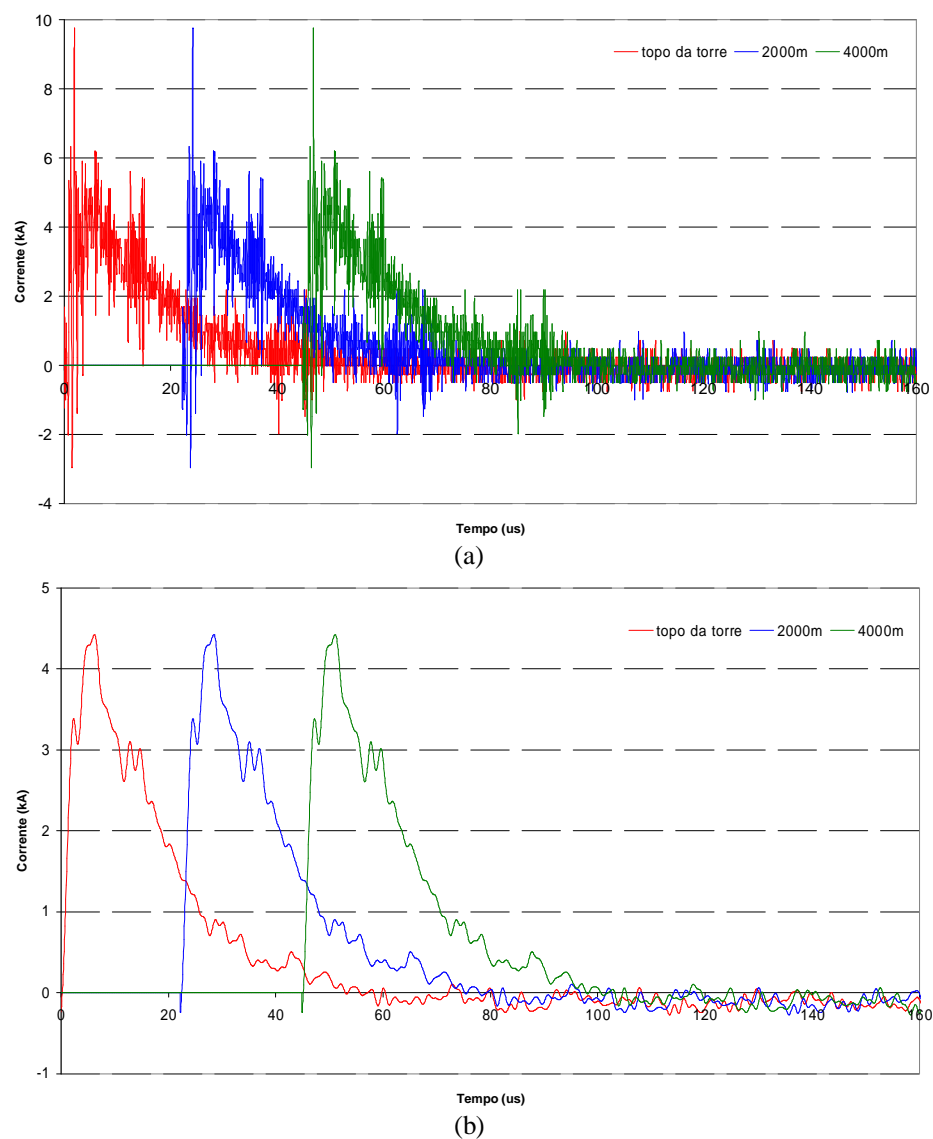


Figura 5.25. Correntes para o modelo TL para três diferentes posições ( $v = 0,30 \times c$ ).  
 a) sem aplicação de “FFT smoothing”;  
 b) com aplicação de “FFT smoothing”.

As correntes apresentadas na Figura 5.25 apresentam menor deslocamento no tempo em comparação às correntes mostradas na Figura 5.21, devido a maior velocidade  $v$  de propagação no canal. Para o ponto  $z' = 4$  km, se a velocidade  $v$  for de  $0,15 \times c$ , o tempo de deslocamento até essa posição é de aproximadamente  $88,9 \mu\text{s}$ , enquanto que para a velocidade  $v$  de  $0,30 \times c$ , o tempo correspondente é de aproximadamente  $44,4 \mu\text{s}$ .

A Figura 5.26 mostra as ondas de corrente para diferentes posições  $z$  para o modelo MTLL, considerando o mesmo valor de  $H_{tot}$  (6 km) e  $v = 0,30 \times c$ , além de utilizar dados de corrente suavizada como dado de entrada. Assim como no caso indicado na Figura 5.22 para  $v = 0,15 \times c$ , nota-se uma atenuação considerável da corrente em função de  $z'$ .

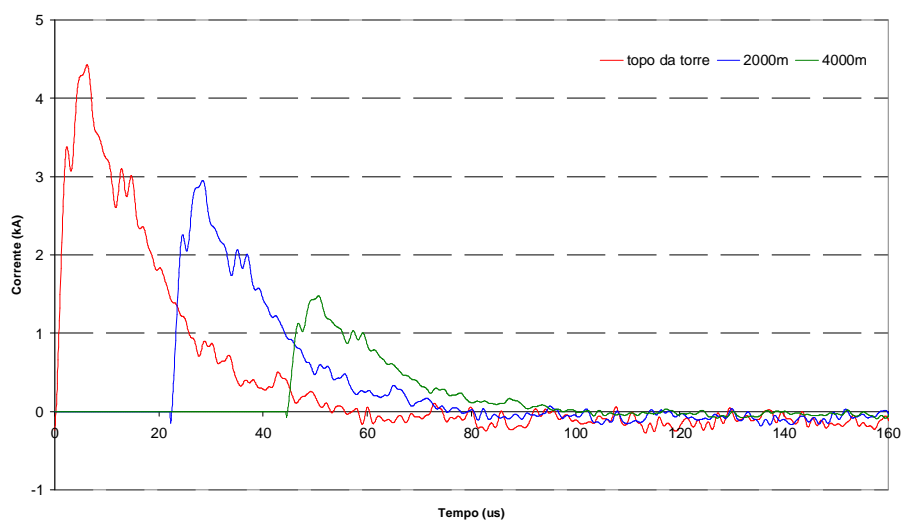


Figura 5.26. Corrente para o modelo MTLL para três diferentes posições ( $v = 0,30 \times c$ ).

A Figura 5.27 mostra as correntes em função de  $z'$  para o modelo MTLE, considerando  $\lambda$  igual a 2 km,  $v = 0,30 \times c$  e a corrente suavizada.

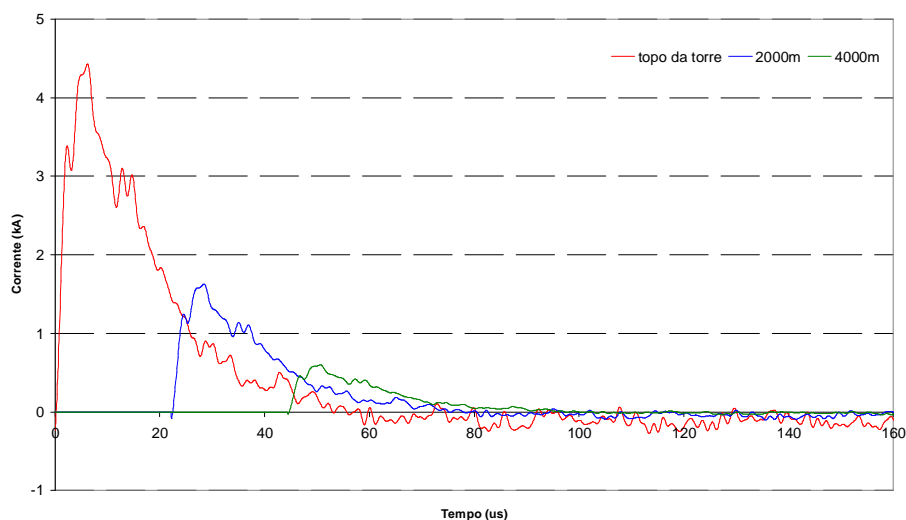


Figura 5.27. Corrente para o modelo MTLE em três diferentes posições ( $v = 0,30 \times c$ ).

Na Figura 5.27 verifica-se que, devido à forte atenuação, a amplitude no ponto  $z' = 2$  km é de aproximadamente 37% e no ponto  $z' = 4$  km é de aproximadamente 14%, ambos em relação à corrente na base do canal. A Figura 5.28 compara as ondas de corrente correspondentes aos três modelos e às duas velocidades de propagação considerados.

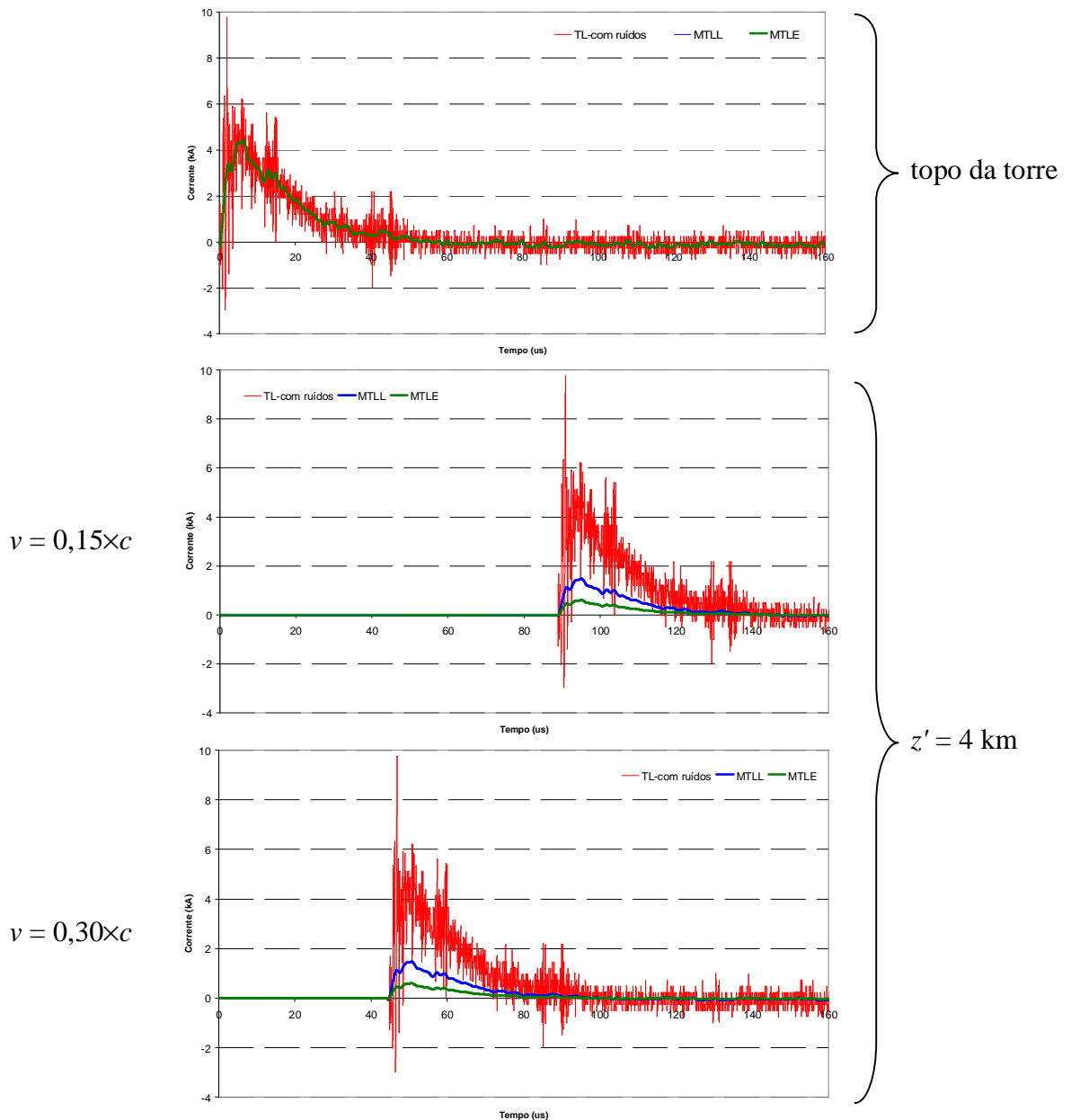


Figura 5.28. Correntes no topo da torre e à altura de 4 km para os modelos TL, MTL e MTLE.



A Figura 5.28 mostra que a distribuição da corrente no canal é fortemente influenciada pela velocidade  $v$  e pelo fator de atenuação.

Neste item verificou-se que, para o caso analisado, a corrente medida na base da torre é praticamente igual às correntes “pura” e “contaminada” no topo da torre. Verificou-se também que o valor da impedância do canal, na faixa de  $500 \Omega$  a  $50 \text{ k}\Omega$ , tem influência desprezível na onda de corrente “pura” para o caso analisado.

As simulações também mostraram que, para o caso analisado, a corrente no topo da torre é semelhante à corrente medida na base.

A distribuição das ondas de corrente ao longo do canal em função de  $z'$  e  $t$  mostram que a forma, bem como o valor de pico da onda de corrente são dependentes do tipo de modelo de descarga de retorno adotado, sendo que o modelo MTLE tende a apresentar menor valor de pico da onda de corrente se comparado aos modelos TL e MTLL.

## 6 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como principal objetivo o desenvolvimento de ferramenta computacional para avaliação da distribuição espaço-temporal da corrente no caso de incidência de descargas atmosféricas em estruturas elevadas.

As descargas atmosféricas são responsáveis por desligamentos e faltas em sistemas de transmissão e de distribuição, podendo ocasionar interrupções de fornecimento e fenômenos denominados “sags”, “swells”, etc., que afetam a qualidade da energia. Para minimizar esses efeitos, os projetistas normalmente utilizam os parâmetros das correntes das descargas atmosféricas obtidos pela CIGRE nos projetos de isolação e coordenação de isolamento de sistemas elétricos. Salienta-se que esses parâmetros são resultados de estudos de muitos anos e em diversos países, tendo sido adquiridos através de medições efetuadas em estruturas com alturas limitadas a 60 m.

Entretanto, estudos recentes mostram que as medições de correntes efetuadas em estruturas elevadas são afetadas pelas diferenças entre as impedâncias do sistema canal-objeto-solo. Esse efeito é perceptível principalmente nas medições realizadas em objetos muito elevados, por exemplo, de 500 m. Para objetos baixos, com alturas inferiores a 60 m, o fenômeno é visível para correntes com tempos de frente curtos, da ordem de 1  $\mu$ s, como é o caso das descargas subseqüentes. No caso de correntes com tempos de frente mais longos, embora o fenômeno não seja tão visível, as sucessivas reflexões no topo e na base do objeto podem afetar o valor de pico da corrente.

No presente trabalho, além das correntes “contaminada” (corrente influenciada pela diferença de impedâncias do sistema canal-torre-aterramento) e “descontaminada” (corrente que fluiria pelo canal considerando que as impedâncias do canal, da torre e do solo fossem iguais) foi também apresentada a corrente “pura”, que corresponde à corrente que incidiria diretamente no solo, na ausência do objeto elevado.

Para fins de análise, foram estudadas, em diferentes situações, as correntes resultantes dos processos de “contaminação” e de “descontaminação”, avaliando-se os efeitos dos principais parâmetros nas suas características.

Em relação às ondas de correntes “contaminadas”, os resultados das simulações mostraram que:

- a altura do objeto tem influência na corrente ao longo da estrutura, a qual apresenta oscilações mais acentuadas no caso de objetos com alturas mais elevadas;
- a corrente sofre influência considerável nos casos de objetos com altura superior a aproximadamente 125 m. Por outro lado, no caso de objetos baixos e correntes com tempos de frente superiores a aproximadamente 4  $\mu$ s, as diferenças entre as correntes no topo, na base ou em algum outro ponto do objeto geralmente não são significativas;
- os valores das impedâncias do canal e da torre não influenciam as ondas de corrente de modo tão significativo como a resistência de terra. Elevados valores de resistência de terra causam diminuição do valor de pico da corrente, enquanto que baixos valores da resistência de terra podem provocar oscilações na frente da onda;
- correntes com tempos de frente curtos, menores que aproximadamente 1  $\mu$ s, tendem a apresentar oscilações na frente, enquanto que correntes com tempos longos variam de modo significativo ao longo de objetos muito elevados;
- as correntes “contaminadas” avaliadas em objetos baixos apresentaram características similares às correntes “puras”.

Já para as ondas de corrente “descontaminadas”, as simulações mostraram que:

- as alturas do objeto e do ponto de medição afetam significativamente a onda de corrente no caso dos objetos elevados; entretanto, no caso de objetos baixos, essa influência não é tão significativa;
- as variações de impedância do canal e do objeto têm pequena influência nas ondas de corrente. Verificou-se que baixos valores de resistência de terra causam diminuição do valor de pico da corrente.

Além das simulações, foram realizadas diversas análises com base em uma amostra de corrente medida na torre IEE/USP, tendo-se verificado que:

- dentre os modelos de descarga de retorno considerados, o modelo MTLE (Modelo da Linha de Transmissão Modificado, com decaimento exponencial) é o que apresentou maior atenuação da corrente ao longo do canal;

- as diferenças entre as ondas de corrente “contaminada” (medida) e “pura” não foram significativas, evidenciando que as correntes medidas em objetos baixos são normalmente similares às correntes incidentes diretamente no solo.

Os resultados obtidos no presente trabalho mostraram que correntes “contaminadas” obtidas em estruturas com altura da ordem de 60 m, para a primeira descarga de retorno, apresentam formas de ondas de correntes similares no caso de medições na base e no topo da estrutura. Além disso, essas formas de onda de correntes são semelhantes às ondas de correntes correspondentes a descargas que incidem diretamente no solo. Esses resultados indicam que as curvas fornecidas pela CIGRE para os parâmetros da primeira descarga de retorno não seriam substancialmente alterados por correções por levar em conta a presença da estrutura nas medições.

Já para as descargas subseqüentes, devido ao curto tempo de frente equivalente, a corrente “contaminada” em objetos com altura da ordem de 60 m apresenta variações ao longo da estrutura, tanto em termos do valor de crista como na parte frontal da onda.

A partir da metodologia apresentada no presente estudo, outros trabalhos podem ser desenvolvidos. O trabalho pode ser estendido visando a elaboração de um programa computacional mais complexo, com interface para avaliação de campos eletromagnéticos e de tensões induzidas em linhas aéreas. Além disso, sugere-se a instalação de um sistema de medição de corrente no topo da torre do IEE/USP, bem como sensores de campos elétrico e magnético a diferentes distâncias da mesma tendo em vista a avaliação dos diferentes modelos para representação do comportamento da corrente ao longo do canal.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMERICAN NATIONAL STANDARD. **ANSI Standard C84.1**: informação e documentação: american national standard for electric power systems and equipment – voltage ratings (60 Hz), 1995.
2. ANDERSON, R. B.; ERIKSSON, A. J. A summary of lightning parameters for engineering application. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LARGE HIGH VOLTAGE ELECTRIC SYSTEMS, 1980. **Proceedings**. 1980.
3. ANDREOTTI, A.; DE MARTINS, U.; VEROLINO, L. An inverse procedure for the return stroke current identification. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 43, n. 2, p. 155-160, 2001.
4. ARRILLGA, J.; WATSON, N. R.; CHEN, S. **Power system quality assessment**. Jonh Wiley & Sons Ltda, 312 p., 2001
5. BABA, Y.; ISHII, M. Lightning return-stroke model incorporating current distortion. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 44, n. 3, p. 476-478, 2002.
6. BABA, Y.; ISHII, M. Numerical electromagnetic field analysis on measuring methods of tower surge impedance. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 14, n. 2, p. 630-635, 1999.
7. BABA, Y.; RAKOV, V. A. On the use of lumped sources in lightning return stroke models. **Journal of Geophysical Research**, v. 110, n. D3, D03101, 2005.
8. BABA, Y.; RAKOV, V. On the transmission line model for lightning return stroke representation. **Geophysical Research Letters**, v. 30, n. 24, p. 13-1 – 13-4, 2003.

9. BEIERL, O. Front shape parameters of negative subsequent strokes measured at the Peissenberg Tower. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 21, 1992. **Proceedings.ICLP**. Berlin, 1992. p. 19-24.
10. BERGER, K.; ANDERSON, R. B.; KRÖNINGER, H.; PALVA, V. Parameters of lightning flashes. **Electra**, n. 41, p. 23-37, 1975.
11. BERMUDEZ, J. L.; RACHIDI, F.; CHISHOLM, W. A.; RUBINSTEIN, M.; JANISCHEWSKYJ, W.; HUSSEIN, A. M.; SHOSTAK, V.; CHANG, J. S. On the use of transmission line theory to represent nonuniform vertically-extended object struck by lightning. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, 2003. **Proceedings**. 2003. v. 2, 2003, p. 501-504.
12. BERMUDEZ, J. L.; RACHIDI, F.; RUBINSTEIN, M.; JANISCHEWSKYJ, W.; SHOSTAK, V. O.; PAVANELLO, D.; CHANG, J. S.; HUSSEIN, A. M.; NUCCI, C. A.; PAOLONE, M. Far-field-current relationship based on the TL model for lightning return strokes to elevated strike objects. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 47, n. 1, p. 146-159, 2005.
13. BERMUDEZ, J. L.; RUBINSTEIN, M.; RACHIDI, F.; HEIDLER, F.; PAOLONE, M. Determination of reflection coefficients at the top and bottom of elevated strike objects struck by lightning. **Journal of Geophysical Research**, v. 108, n. D14, p. 4-1 – 4-13, 2003.
14. BERNARDI, M.; DELLERA, L.; GARBAGNATI, E. Lightning parameters for protection: an update approach. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 24, Birmingham, 1998. **Proceedings.ICLP**. Birmingham, 1998. p. 60-65.
15. BORGHETTI, A.; NUCCI, C. A.; PAOLONE, M. Effect of tall instrumented towers on the statistical distributions of lightning current parameters and its influence on the power systems lightning performance assessment. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, VII, Curitiba, 2003. **Proceedings.SIPDA**. Curitiba, 2003. p. 561-572.

16. BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. **Resolução N° 24**, 27 de Janeiro de 2000.
17. BRUCE, C. E. R.; GOLDE, R. H. The lightning discharge. **The Journal of the Institution of Electrical Engineers**, v. 88, n. 6, p. 487-505, 1941.
18. CARVALHO, T. O. **Desenvolvimento de sistema para estudo de tensões induzidas em linhas de média tensão por descargas atmosféricas**. 2004. 158 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
19. CHERINGTON, M.; OLSON, S.; YARNELL, P. R. Lightning and Lichtenberg figures. **International Journal of the Care of the Injured**, 34, p. 367-371, 2003.
20. CHOWDHURI, P. Parameters of lightning strokes and their effects on power systems. In: TRANSMISSION AND DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION, 2001. **Proceedings.IEEE/PES**. 2001. p. 1047-1051.
21. COORAY, V. On the concepts used in return stroke models applied in the engineering practice. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 45, n. 1, p. 101-108, 2003.
22. COORAY, V.; RAKOV, V. Effect of ground conducting on the peak current derivative of lightning return stroke. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, VIII, São Paulo, 2005. **Proceedings.SIPDA**. São Paulo, 2005. p..
23. COUVREUR, L.; BOUQUEGNEAU, C. MOREGA-BARAN, I. A new statistical approach to the analysis of lightning current parameter. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 24, Birmingham, 1998. **Proceedings.ICLP**. Birmingham, 1998. p. 123-127.
24. DARVENIZA, M. Some lightning parameters revisited. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 25, Rhodes, 2000. **Proceedings.ICLP**. Rhodes, 2000. p. 881-886.
25. DAWALIBI, F. P.; RUAN, W.; FORTIN, S.; MA, J.; DAILY, W. K. Computation of power line structures surge impedances using the electromagnetic field method.

- IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition**, v. 2, p. 663-668, 2001.
26. DIENDORFER, G.; MAIR, M.; SCHULZ, W.; HADRIAN, W. Lightning current measurements in Austria – experimental setup and first results. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 25, Rhodes, 2000. **Proceedings.ICLP**. Rhodes, 2000. p. 44-47.
  27. DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; BEATY, H. W. **Electrical power systems quality**. United States of America: McGraw-Hill, 265 p., 1996.
  28. ELECTRICITY SUPPLIER'S LIAISON COMMITTEE. **NRS-048** (NRS-048-1/1996, NRS-048-2/1996, NRS-048-3/1997 e NRS-048-4/1996): informação e documentação: standard for the quality of supply for the southern african power pool.
  29. ELETROBRÁS. **Conservação de energia: eficiência energética de instalações e equipamentos**. PROCEL/EFEI, Itajubá: Editora da EFEI, 467 p., 2001.
  30. ERIKSSON, A. J.; MEAL, D. V. Lightning performance and overvoltage surge studies on a rural distribution line. **IEE Proceeding**, v. 129, Pt. C, n. 2, p. 59-69, 1982.
  31. FUCHS, F. On the transient behavior of the telecommunication tower at the mountain Hoher Peissenberg; In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 24, Birmingham, 1998. **Proceedings.ICLP**. Birmingham, 1998. p. 36-41.
  32. FUCHS, F.; LANDERS, E. U.; SCMID, R.; WIESINGER, J. Lightning current and magnetic field parameters caused by lightning strikes to tall structures relating to interference of electronic systems. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 40, n. 4, p. 444-451, 1998.
  33. GELDENHUYS, H. J.; ERIKSSON, A. J.; BOURN, G. W. Fifteen years' data of lightning current measurement on a 60 m mast. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 19, Graz, 1988. **Proceedings.ICLP**. Graz, 1988. p. 451-456.



34. GIN, R. B. B.; PINTO, I. R. C. A.; PINTO Jr., O.; MENDES Jr., O. Descargas atmosféricas no sudeste do Brasil. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, XIV, Belém, 1997. **Anais.SNPTEE**. Belém, 1997. paper GSI/01.
35. GOMES, C; COORAY, V. Concepts of lightning return stroke models. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 42, n. 1, p. 82-96, 2003.
36. GRCEV, L.; RACHIDI, F. On tower impedance for transient analysis. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 19, n. 3, p. 1238-1244, 2004.
37. GUEDES, D. G.; PINTO Jr., O. ; VISACRO F., S. Effect on the distribution of current along the Morro do Cachimbo tower in terms of current sources distributed along the lightning channel. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, VII, Curitiba, 2003. **Proceedings.SIPDA**. Curitiba, 2003. p. 411-414.
38. GUEDES, D. G.; PINTO Jr., O; VISACRO F., S. A theoretical estimation of the lightning current on the bottom of an instrumented tower from the measured value on the top. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUNDING AND EARTHING & 3<sup>rd</sup>. BRAZILIAN WORKSHOP ON ATMOSPHERIC ELECTRICITY, Rio de Janeiro, 2002. **Proceedings.GROUND'2002 and 3<sup>rd</sup> WAE**. Rio de Janeiro, 2002. p. 129-132.
39. GUERRIERI, S.; KRIDER, E. P.; NUCCI, C. A. Effects of traveling-wave of current of the initial response a tall Franklin rod. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 25, Rhodes, 2000. **Proceedings.ICLP**. Rhodes, 2000. p. 94-99.
40. GUERRIERI, S.; NUCCI, C. A.; RACHIDI, F.; RUBINSTEIN, M. On the influence of elevated strike objects on directly measured and indirectly estimated lightning currents. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 13, n. 13, p. 1453-1555, 1998.
41. GUTIÉRREZ R., J. A.; MORENO V., P.; NAREDO V., J. L. GUARDADO Z. Non uniform line tower model for lightning transient studies. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEMS TRANSIENTS, 4, Rio de Janeiro, 2001. **Proceedings.IPST**. Rio de Janeiro, 2001. p. 535-540.

42. HAGENGUTH, J. H.; ANDERSON, J. G. Lighting to the Empire State Building part III. **AIEE Transactions**, 71 (pt3), p. 641-649, 1952.
43. HEIDLER, F. Lightning current measurements at the Peissenberg telecommunication tower. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUNDING AND EARTHING & 3<sup>rd</sup>. BRAZILIAN WORKSHOP ON ATMOSPHERIC ELECTRICITY, Rio de Janeiro, 2002. **Proceedings.GROUND'2002 and 3<sup>rd</sup> WAE**. Rio de Janeiro, 2002. p. 117-122.
44. HEIDLER, F.; CVETIC, J. M.; STANIC, B. V. Calculation of lightning current parameters. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 14, n. 2, p. 399-404, 1999.
45. HEIDLER, F.; HOPF, C. Lightning current and lightning electromagnetic impulse considering current reflection at the earth's surface. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 22, Budapest, 1994. **Proceedings.ICLP**. Budapest, 1994. paper R4-05.
46. HUSSEIN, A. M.; JANISCHEWSKYJ, W.; MILEWSKI, M.; SHOSTAK, V.; RACHIDI, F.; CHANG, J. S. Comparison of current characteristics of lightning strokes measured at the CN Tower and at other elevated objects. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, 2003. **Proceedings**. 2003. v. 2, 2003, p. 495-500.
47. INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std. 1159**: informação e documentação: monitoring electric power quality, 1995.
48. INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std. 1250**: informação e documentação: IEEE guide for service to equipment sensitive to momentary voltage disturbances, 1995.
49. INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std. 1346**: informação e documentação: electric power system compatibility with electronic process equipment, 1998.

50. INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std. 493**: informação e documentação: IEEE recommended practice for the design of reliable industrial and commercial power systems, 1997.
51. INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std. P1564**: informação e documentação: voltage sag indices, 2001.
52. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61000 Series**: informação e documentação: electromagnetic compatibility, 2002.
53. ISHII, M.; BABA, Y. Numerical electromagnetic field analysis of tower surge response. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 12, n. 1, p. 483-488, 1999.
54. JANISCHEWSKYJ, W.; HUSSEIN, A. M.; SHOSTAK, V.; RUSAN, I.; LI, J. X.; CHANG, J.-S. Statistics of lightning strikes to the Toronto Canadian National Tower. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 12, n. 3, p. 1210-1221, 1996.
55. 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: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 24, Birmingham, 1998. **Proceedings.ICLP**. Birmingham, 1998. p. 245-251.
56. JANISCHEWSKYJ, W.; SHOSTAK, V.; HUSSEIN, A. M. Lightning electric field characteristics of first and subsequent strokes to a tall tower. In: HIGH VOLTAGE ENGINEERING SYMPOSIUM, 11, London, 1999. **Proceedings**. London, 1999. v. 1, n. 467, p. 270-274.
57. JORDAN, C. A. Lightning computations for transmission lines with overhead ground wires – Part I. **General Electric Review**, v. 37, n. 3, p. 130-137, 1934a.
58. JORDAN, C. A. Lightning computations for transmission lines with overhead ground wires – Part II. **General Electric Review**, v. 37, n. 3, p. 180-185, 1943b.
59. JORDAN, C. A. Lightning computations for transmission lines with overhead ground wires – Part III. **General Electric Review**, v. 37, n. 3, p. 243-250, 1934c.

60. KANASHIRO, A. G. **Modelagem de transformadores de distribuição para altas frequências**. 2001. 174 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.
61. KANASHIRO, A. G.; PIANTINI, A.; BURANI, G. F. A methodology for transformer modeling concerning high frequency surges. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, VI, Santos, 2001. **Proceedings.SIPDA**. Santos, 2001. p. 275-280.
62. KAWAI, M. Studies of the surge response on a transmission line tower. **IEEE Transaction Power Apparatus and Systems**, v. 83, p. 30-34, 1964.
63. KORDI, B.; MOINI, R.; RAKOV, V. A. Comment on “Return stroke transmission line model for stroke speed near and equal that of light” by R. Thottappillil, J. Schoene and M. A. Uman. **Geophysical Research Letters**, v. 29, n. 10, p. 7-1 – 7-3, 2002.
64. LETEINTURIER, C.; WEIDMAN, C.; HAMELIN, J. Current and electrical field derivatives in triggered lightning return strokes. **Journal of Geophysical Research**, v. 95, n. D1, p. 811-828, 1990.
65. MATTOS, M. A. F.; CHRITOPoulos, C. A nonlinear transmission line model of the lightning stroke model. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 30, n. 3, p. 401-406, 1988.
66. MAZUR, V. Physical processes during development of lightning flashes. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUNDING AND EARTHING & 3<sup>rd</sup>. BRAZILIAN WORKSHOP ON ATMOSPHERIC ELECTRICITY, Rio de Janeiro, 2002. **Proceedings.GROUND’2002 and 3<sup>rd</sup> WAE**. Rio de Janeiro, 2002. p. 79-84.
67. MOINI, R.; KORDI, B. B.; RAFI, G. Z.; RAKOV, V. A. A new lightning return stroke model based on antenna theory; **Journal of Geophysical Research**, v. 105, n. D24, p. 29693-29702, 2000.
68. MONTANDON, E. Lightning positioning and lightning parameter determination experiences and results of the Swiss PTT Research Project. In: INTERNATIONAL

- CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 21, Berlin, 1992. **Proceedings.ICLP**. Berlin, 1992. p. 307-312.
69. MOTOYAMA, H.; MATSUBARA, H. Analytical and experimental study on surge response of transmission tower. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 15, n. 2, p. 812-819, 2000.
70. MOTOYAMA, H; JANISCHEWSKYJ, W; HUSSEIN, A. 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, n. 3, p. 1624-1632, 1996.
71. OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Estado da Arte de Indicadores para fundamentos de tensão**: informação e documentação: ONS-2.1-022/2001, 44 p., 2001.
72. PAVANELLO, D.; RACHIDI, F.; RUBINSTEIN, M.; BERMUDEZ, J. L.; NUCCI, C. A. Electromagnetic field radiated by lightning to tall towers: treatment of the discontinuity at the return stroke. **Journal of Geophysical Research**, v. 109, n. D6, paper D06114, 2004.
73. PIANTINI, A. **Contribuição ao estudo das tensões induzidas em linhas de distribuição por descargas atmosféricas indiretas**. 1991. 205 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.
74. PIANTINI, A. **Tensões induzidas por descargas atmosféricas indiretas em linhas aéreas rurais e urbanas, considerando diferentes métodos de proteção – modelagens teórica e experimental e aplicação ao cálculo de interrupções**. 1997. 316 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.
75. PIANTINI, A.; CARVALHO, T. O.; SILVA N., A.; JANISZEWSKI, J. M.; ALTAFIM, R. A. C.; RONCOLATTO, R. A. A full-scale system for lightning data acquisition, with special reference to induced voltages on distribution lines. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUNDING AND EARTHING & 3<sup>rd</sup>.

- BRAZILIAN WORKSHOP ON ATMOSPHERIC ELECTRICITY, Rio de Janeiro, 2002. **Proceedings.GROUND'2002 and 3<sup>rd</sup> WAE**. Rio de Janeiro, 2002. p. 111-116.
76. PIANTINI, A.; CARVALHO, T. O.; SILVA N., A.; JANISZEWSKI, J. M.; ALTAFIM, R. A. C.; NOGUEIRA, A. L. T. A system for lightning induced voltages data acquisition – preliminary results. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, VII, Curitiba, 2003. **Proceedings.SIPDA**. Curitiba, 2003. p. 156-161.
77. PIANTINI, A.; CARVALHO, T. O.; SILVA N., A.; JANISZEWSKI, J. M.; ALTAFIM, R. A. C.; NOGUEIRA, A. L. T. A system for simultaneous measurements of lightning induced voltages on lines with and without arresters. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 27, Avignon, 2004. **Proceedings.ICLP**. Avignon, 2004. p. 297-302.
78. PIANTINI, A.; CARVALHO, T. O.; SILVA N., A.; JANISZEWSKI, J. M.; ALTAFIM, R. A. C.; NOGUEIRA, A. L. T. Desenvolvimento de sistema para estudo de tensões induzidas em linhas de média tensão por descargas atmosféricas. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO SOBRE QUALIDADE DE ENERGIA, VI, Belém, 2005. **Anais.SBQEE**. Belém, 2005. (trabalho aprovado em fase de publicação).
79. PIANTINI, A.; JANISZEWSKI, J. M. An experimental study of lightning induced voltages by means of a scale model. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 21, Berlin, 1992. **Proceedings.ICLP**. Berlin, 1992. p. 4/195-4/199.
80. PIANTINI, A.; JANISZEWSKI, J. M. An improved model for lightning induced voltages calculations. In: IEEE/PES TRANSMISSION & DISTRIBUTION LATIN AMERICA 2004, 2004, São Paulo, 2004. **2004 Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America**. São Paulo: SONOPRESS R Indústria e Comércio Fonográfico Ltda, 2004.
81. PIANTINI, A.; JANISZEWSKI, J. M. Induced voltages on distribution lines due to lightning discharges on nearby metallic structures. **IEEE Transactions on Magnetics**. v. 34, p. 2799-2802, 1998.

82. PIANTINI, A.; JANISZEWSKI, J. M. Lightning induced voltages on distribution lines close to buildings. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 25, Rhodes, 2000. **Proceedings.ICLP**. Rhodes, 2000. p. 558-563.
83. PIANTINI, A.; JANISZEWSKI, J. M. The extended rusk model for calculation lightning induced voltages on the overhead lines. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, VII, Curitiba, 2003. **Proceedings.SIPDA**. Curitiba, 2003. p. 151-155.
84. PIANTINI, A.; KANASHIRO, A. G.; OBASE, P. F. Lightning surges transferred to the low-voltage network. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, VII, Curitiba, 2003. **Proceedings.SIPDA**. Curitiba, 2003. p. 216-221.
85. PINTO Jr., O.; PINTO, I. R. A. C. **Tempestades e relâmpagos no Brasil**. São José dos Campos: INPE, 194 p., 2000.
86. PINTO, I. R. C. A.; PINTO Jr., O. Cloud-to-ground lightning distribution in Brazil. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, 65, p. 733-737, 2003.
87. PINTO, I. R. C. A.; PINTO Jr., O. Lightning distribution in Brazil from 1998 to 2001 based on LIS data. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUNDING AND EARTHING & 3<sup>rd</sup>. BRAZILIAN WORKSHOP ON ATMOSPHERIC ELECTRICITY, Rio de Janeiro, 2002. **Proceedings.GROUND'2002 and 3<sup>rd</sup> WAE**. Rio de Janeiro, 2002. p. 71-73.
88. PORTELLA, C. Determinação da distribuição estatística de parâmetros de descargas atmosféricas incidentes em torres, edifícios e instalações. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, XV, Foz do Iguaçu, 1999. **Anais.SNPTEE**. Foz do Iguaçu, 1999. paper GSI/14.
89. RACHIDI, F.; JANISCHEWSKYJ, W.; HUSSEIN, A. M.; NUCCI, C. A.; GUERRIERI, S.; CHANG, J. S. Electromagnetic fields radiated by lightning return strokes to high towers. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 24, Birmingham 1998. **Proceedings.ICLP**. Birmingham 1998. p. 23-28.

90. RACHIDI, F.; JANISCHEWSKYJ, W.; HUSSEIN, A. M.; NUCCI, C. A.; GUERRIERI, S.; KORDI, B.; CHANG, J. S. Current and electromagnetic field associated with lightning – return stroke to tall towers. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 43, n. 3, p. 356-367, 2001.
91. RACHIDI, F.; RAKOV, V. A.; NUCCI, C. A.; BERMUDEZ, J. L. Effect of vertically extended strike object on the distribution of current along the lightning channel. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. D23, p. 16-1 – 16-6, 2002.
92. RAKOV, V. A. Engineering models of the return stroke. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, VII, Curitiba, 2003. **Proceedings.SIPDA**. Curitiba, 2003. p. 511-530.
93. RAKOV, V. A. Lightning and tall structures. In: INTERNATIONAL LIGHTNING DETECTION CONFERENCE, Tucson, 2002. **Proceedings.ILDC**. Tucson, 2002. 7 p.
94. RAKOV, V. A. Transient response of a tall object to lightning. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**. v. 43, n. 4, p. 654-661, 2001.
95. RAKOV, V. A.; MATA, C. T.; UMAN, M. A.; RAMBO, K. J.; MATA, A. G. Review of triggered-lightning experiments at the ICLRT at Camp Blanding, Florida. In: IEEE BOLOGNA POWERTECH CONFERENCE, Bologna, 2003. **Proceedings**. Bologna, 2003. v. 3, 8 p.
96. RAKOV, V. A.; THOTTAPILLIL, R.; SCHOENE, J. Comments on “On the concepts used in return stroke models applied in the engineering practice”. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 45, n. 3, p. 567, 2003.
97. RAKOV, V. A.; THOTTAPPILLIL, R.; UMAN, M. A. On the empirical formula of Willett et al relating lightning return-stroke peak current and current and peak electric field. **Journal of Geophysical Research**, v. 97, n. D11, p. 11527-11533, 1992.
98. RAKOV, V. A.; UMAN, M. Review and evaluation of lightning return stroke models including some aspects of their application. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, v. 40, n. 4, p. 403-426, 1998.



99. RIZK, F. A. M. Modeling of lighting incidence to tall structures – Part I: theory. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 9, n. 1, p. 162-171, 1994a.
100. RIZK, F. A. M. Modeling of lighting incidence to tall structures – Part II: application. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 9, n. 1, p. 172-178, 1994.
101. RUSK, S. **Protection of distribution lines**. In: GOLDE, R. H., ed. *Lightning*. Academic Press, v.2, chapter 23, p. 747-71, 1977.
102. SARGENT, M A; DARVENIZA, M. Tower surge impedance, **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-98, n. 5, p. 680-687, 1969.
103. SARGENT, M. A. The frequency distribution of current magnitudes of lightning strokes to tall structures. **IEEE Transactions Power Apparatus Systems**, 91, p. 2224-2229, 1972.
104. SCHOENE, J.; UMAN, M. A.; RAKOV, V. A.; RAMBO, K. J.; JERAULD, J.; SCHNETZER, G. H. Test of the transmission line model and the traveling current source model with triggered lightning return stroke at very close range. **Journal of Geophysical Research**, v. 108, v. D23, p. ACL10-1 – ACL10-14, 2003.
105. SCHROEDER, M. A. O. **Modelo eletromagnético para descontaminação de ondas de corrente de descargas atmosféricas: aplicação às medições da estação do Morro do Cachimbo**. 2001. 212 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.
106. SCHROEDER, M. A. O.; CHERCHIGLIA, L. C. L. Influência da torre nos resultados de medição de descargas atmosféricas. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, XV, Foz do Iguaçu, 1999. **Anais.SNPTEE**. Foz do Iguaçu, 1999. paper GSI/11.
107. SCHROEDER, M. A. O.; CHERCHIGLIA, L. C. L. Lightning current statistical analysis: measurements of Morro do Cachimbo Station-Brazil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 26, Cracow, 2002. **Proceedings.ICLP**. Cracow, 2002. p. 20-23.

108. SCHROEDER, M. A. O.; SOARES Jr., A.; VISACRO F. S. The Brazilian experience on measurement of lightning parameters by means of instrumented towers. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUNDING AND EARTHING & 3<sup>rd</sup>. BRAZILIAN WORKSHOP ON ATMOSPHERIC ELECTRICITY, Rio de Janeiro, 2002. **Proceedings.GROUND'2002 and 3<sup>rd</sup> WAE**. Rio de Janeiro, 2002b. p. 123-127.
109. SCHROEDER, M. A. O.; SOARES Jr., A.; VISACRO F., S. Caracterização de parâmetros de corrente de descarga atmosférica no Brasil: descontaminação do sinal medido. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, XVI, Campinas, 2001. **Anais.SNPTEE**. Campinas, 2001. paper GSC/002.
110. SCHROEDER, M. A. O.; SOARES Jr., A.; VISACRO F., S. Contamination of lightning current waves for short towers: electromagnetic model versus TEM approaches. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 26, Cracow, 2002. **Proceedings.ICLP**. Cracow, 2002a. p. 60-64.
111. SCHROEDER, M. A. O.; SOARES Jr., A.; VISACRO F., S.; CHERCHIGLIA, L. C. L.; DE SOUZA, V. J. Influence of the tower on measurement of lightning parameters. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, São Paulo, 1999. **Proceedings.SIPDA**. São Paulo, 1999. p. 26-30.
112. SHINDO, T.; YOKOYAMA, S. Lightning occurrence data observed with lightning location system in Japan. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 13, n. 4, p. 1468-1474, 1998.
113. SHOSTAK, V.; JANISCHEWSKYJ, W.; HUSSEIN, A. M. Expanding the modified transmission line model to account for reflections within the continuously growing lightning return stroke channel. In: IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY SUMMER MEETING, Piscataway, 2000. **Proceedings**. Piscataway, 2000. v. 4, p. 2589-2602.
114. SHOSTAK, V.; JANISCHEWSKYJ, W.; HUSSEIN, A. M.; KORDI, B. Characteristics of return stroke current and electromagnetic field waveforms observed in multistroke lightning flashes to a tall tower. In: HIGH VOLTAGE ENGINEERING

- SYMPOSIUM, 11, London, 1999. **Proceedings**. London, 1999. v. 1, n. 467, p. 389-392.
115. SMIDT, E. R. Lightning analysis in a high-voltage transmission environment. **Vaisala News**, United States, 162, 2003.
116. SUETA, H. E.; BRAZ, C. P.; D'ÁVILA, R. S.; LEITE, D. M. Lightning protection in pré-stressed concrete tiles covered buildings. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, VII, Curitiba, 2003. **Proceedings.SIPDA**. Curitiba, 2003. p. 185-190.
117. THOTTAPPILLIL, R.; RAKOV, V. A.; UMAN, M. 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, n. D6, p. 6987 – 7006, 1997.
118. THOTTAPPILLIL, R.; SCHOENE, J.; UMAN, M. A. Return stroke transmission line model for stroke speed near and equal that of light. **Geophysical Research Letters**, v. 28, n. 18, p. 3593 – 3596, 2001.
119. THOTTAPPILLIL, R.; UMAN, M. Comparison of lightning return-stroke models. **Journal of Geophysical Research**, v. 98, n. D12, p. 22903 – 22914, 1993.
120. TORRES, H. Variations of lightning parameter magnitudes within space and time. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 24, Birmingham, 1998. **Proceedings.ICLP**. Birmingham, 1998. p. 180-186.
121. TORRES, H.; RONDON, D.; BRICEÑO, W.; BARRETO, L. Lightning peak current estimation analysis from field measurements in tropical zones. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 23, Firenze, 1996. **Proceedings.ICLP**. Firenze, 1996. p. 181-185.
122. UMAN, M. A. **Lightning**. Dover Publications Inc. New York, 298 p. 1984.
123. UMAN, M. A.; McLAIN, K. Magnetic field of lightning return stroke. **Journal of Geophysical Research**, v. 74, n. 28, p. 6899 – 6910, 1962.
124. UMAN, M. **The lightning discharge**. Academic Press, Inc. 377 p. 1987.

125. VISACRO F., S. A proteção dos consumidores de energia. Editorial. **Lumière**, n. 18, p. 34-37, 1999.
126. VISACRO F., S. A representative curve for lightning current waveshape of first negative stroke. **Geophysical Research Letters**, v. 31, n. 7, paper L07112, 2004.
127. VISACRO F., S.; PORTELA, C. M. Modelling of earthing systems for lightning protection. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 21, Berlin, 1992. **Proceedings.ICLP**. Berlin, 1992. p. 129-132.
128. VISACRO, S.; SILVEIRA, F. H. A return stroke model based on a hybrid field-circuit approach. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 27, Avignon, 2004. **Proceedings.ICLP**. Avignon, 2004a.
129. VISACRO, S.; SILVEIRA, F. H. Evaluation of current distribution along the lightning discharge channel by a hybrid electromagnetic model. **Journal of Electrostatics**, v. 60/2, p. 111-120, 2004b.
130. VISACRO, S.; SILVEIRA, F. H.; OLIVEIRA, R.; FELIPE, M.; SILVA, A.; VALE, M. H. M. The influence of sensor position on contamination of lightning current waves for measurements taken at short towers. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION, 27, Avignon, 2004. **Proceedings.ICLP**. Avignon, 2004.
131. WAGNER, C. F.; HILEMAN, A. R. A new approach to the calculation of the lightning performance of transmission lines, III – a simplified method: stroke to tower. **AIEE Transactions**, p. 589-603, 1960.
132. WEIDMAN, C. D.; KRIDER, E. P. The fine structure of lightning return stroke wave forms. **Journal of Geophysical Research**, v. 83, n. C12, p. 6239-7351, 1978.
133. ZANNETA Jr, L. C. **Transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência**. São Paulo: Edusp, 712 p. 2003.