



**GRUPO X  
SOBRETENSÕES, COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO E INTERFERÊNCIAS (GSI)**

**INFLUÊNCIA DA TORRE NOS RESULTADOS DE MEDIÇÃO DE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

Marco Aurélio de O. Schroeder  
Amilton Soares Júnior  
Silvério Visacro F.

Luiz Carlos Leal Charchiglia  
Vander José de Souza

UFMG - Universidade Federal de Minas Gerais      CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais  
LRC - Lightning Research Center - CEMIG-UFMG

**RESUMO**

Este trabalho apresenta resultados preliminares de investigação dos autores com relação à medição das ondas de corrente de descargas atmosféricas que atingem a torre da Estação do Morro do Cachimbo. A pesquisa analisa o efeito de alguns elementos sobre a onda registrada, tais como o mastro da torre, o aterramento e o canal de descarga, na perspectiva de definição de procedimentos necessários para "descontaminação" do sinal medido.

**PALAVRAS-CHAVE**

Descargas Atmosféricas - Medição de Correntes de Descarga - Ondas de Corrente de Descargas Atmosféricas

**1.0 - INTRODUÇÃO**

O conhecimento dos parâmetros das ondas de corrente características de descargas atmosféricas é fundamental para a definição apropriada de práticas de proteção. A maior parte destes parâmetros são obtidos por medição direta de correntes de descargas atmosféricas, em estações providas de torres nas quais estão instalados dispositivos de medição. Por outro lado, a presença do sistema de medição de corrente pode modificar a forma e a amplitude da onda registrada, corrompendo o sinal. Esta modificação resulta de reflexões de onda nos pontos de descontinuidade de impedância ao longo do percurso da corrente. Contribuem para tal as descontinuidades

entre o mastro da torre e o aterramento, entre o canal de descarga e a torre e, ainda, o acoplamento eletromagnético entre o canal e a torre. Em alguns casos, o posicionamento do equipamento de medição ao longo do mastro pode, também, influenciar.

Recentemente, como resultado de um projeto cooperativo envolvendo as instituições nas quais trabalham os autores deste trabalho, foi constituído um centro de excelência em descargas atmosféricas, o LRC (Lightning Research Center). O objetivo almejado no projeto é o desenvolvimento de tecnologia, produtos e conhecimento relativos à Engenharia de Proteção contra Descargas Atmosféricas. Para alcançar tais objetivos será realizado um amplo espectro de atividades no local, envolvendo treinamento especializado na área e a parceria com o setor industrial e energético para desenvolvimento de projetos de pesquisa e produtos. Os recursos deste centro envolvem uma estação para medição direta dos parâmetros da corrente de descarga (Estação de Morro do Cachimbo, Figura 1), o Sistema de Localização de Tempestade (LPATS) da empresa e um conjunto de laboratórios especializados, sediados em prédio próprio no Campus da Universidade, capacitados à realização de pesquisas e desenvolvimentos na área. Nestes laboratórios estarão, também, concentrados diversos equipamentos e dispositivos de aplicação específica na área, tais como, contadores de descarga e elos magnéticos. Além disto, o Centro conta, como recursos humanos, com equipe de sete especialistas da Universidade (de formação multidisciplinar) e engenheiros da empresa e, dada a sua localização junto à sede do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade, os alunos deste curso podem

se envolver nas investigações do centro, através das atividades de suas teses de doutorado e mestrado. Atualmente, encontra-se em desenvolvimento, no LRC, justamente uma investigação específica sobre a recuperação da forma e da amplitude da onda de corrente original das descargas atmosféricas que atingem a torre da Estação do Morro do Cachimbo, a partir das ondas medidas. O objetivo deste artigo é apresentar os resultados preliminares desta pesquisa, complementando duas publicações anteriores dos autores (6,7).



FIGURA 1

Estação do Morro do Cachimbo, com sua torre de 60m de altura. Situada nas proximidades de Belo Horizonte, a 1430m de altitude, a estação já registrou 79 "flashes".

A constatação de existência de significativa diferença dos parâmetros de descarga no ambiente brasileiro em relação àqueles divulgados na literatura internacional, justifica os investimentos na Estação para caracterização dos parâmetros da forma e de amplitude da onda de corrente locais, bem como o tratamento estatístico dos dados obtidos por medição, na perspectiva de definição de práticas de engenharia para proteção dos sistemas elétricos brasileiros contra os efeitos de descargas atmosféricas. A figura 2 ilustra um detalhe de uma onda medida na Estação do Morro do Cachimbo, bem como a indicação de alguns parâmetros derivados da mesma.

A investigação para recuperação da onda original de corrente (descontaminação das ondas medidas) tem merecido a atenção de alguns pesquisadores. Um trabalho recente apresentou alguns aspectos interessantes com relação a esta questão [1]. Assumindo algumas simplificações e determinados coeficientes de reflexão para os pontos de descontinuidade no topo da torre (interface canal - torre) e em sua base (interface torre - aterramento) os autores propuseram uma formulação para a tarefa de descontaminação.

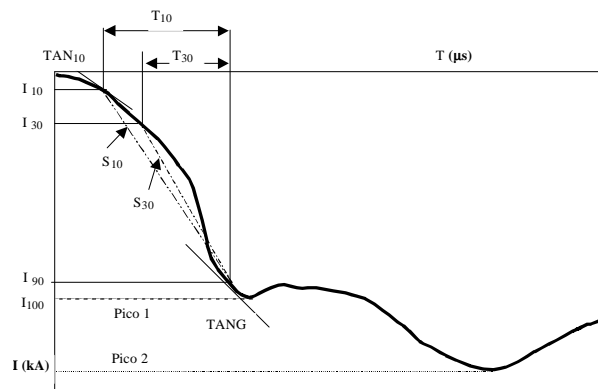


FIGURA 2

Onda de corrente de descarga registrada em Morro do Cachimbo (primeira de um conjunto de 3 descargas subsequentes, negativas e escudentes)

A formulação do problema por meio de coeficientes de reflexão constitui-se em prática efetiva para análise de sensibilidade. Contudo, nos casos práticos, permanecem sem solução algumas questões fundamentais necessárias para recuperação do sinal original, sobretudo a definição de modelos apropriados para a torre, para o aterramento e para a representação do canal de descarga (incluindo o acoplamento entre este e a torre). A literatura técnica sugere diferentes modelos para representação destes elementos, gerando considerável incerteza. Ademais, pode ser necessário o conhecimento específico das condições ambientais no momento da medições, pois estas podem influenciar no modelo (por exemplo, a umidade do solo pode definir variações da ordem de 4 para 1 no valor da resistividade do solo e, portanto, no valor da impedância do aterramento). Tais observações implicam a conclusão de que a modelagem dos componentes envolvidos no percurso da corrente (canal, torre e aterramento), incluindo o suporte de avaliações experimentais, é essencial para realização precisa da tarefa de descontaminação da onda de corrente.

No próximo tópico são considerados aspectos preliminares da investigação desenvolvida pelos autores.

## 2.0-MODELAGEM DO SISTEMA DE MEDIÇÃO

### 2.1 Introdução

Os dispositivos para medição da corrente de descarga estão instalados na base da torre de 60m da Estação do Morro do Cachimbo. Os transdutores envolvem o condutor que leva a corrente aos eletrodos de aterramento.

## 2.2 O sistema de aterramento

A figura 3 ilustra a configuração e as dimensões dos eletrodos que estão enterrados a uma profundidade de 0,5m. O valor da resistividade do solo varia entre 7000 e 2000  $\Omega\cdot m$ , dependendo da umidade do solo local.

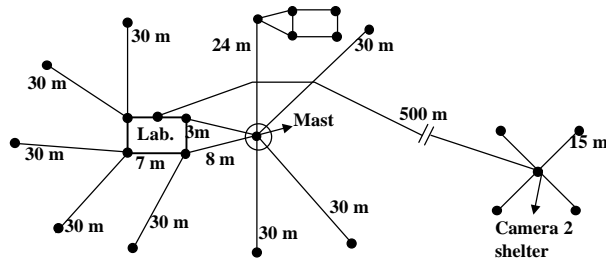


FIGURA 3  
Configuração dos eletrodos de aterramento.

Com o objetivo de determinar um modelo representativo para o sistema de aterramento, os autores empregaram sistematicamente um elaborado modelo computacional [2,3] considerando-se, de forma conservadora, a faixa de valores de resistividade no local (8, 4, 2 e 1k $\Omega\cdot m$ ). Em cada caso, a injeção de 3 diferentes ondas de corrente (dupla exponencial: 1,2/50 $\mu s$ , 7/60 $\mu s$  e 10/60 $\mu s$ ) com a mesma amplitude (valor de pico igual a 1kA) foi simulada. A figura 4 mostra as ondas de tensão resultantes para a onda de corrente 7/60 $\mu s$ .

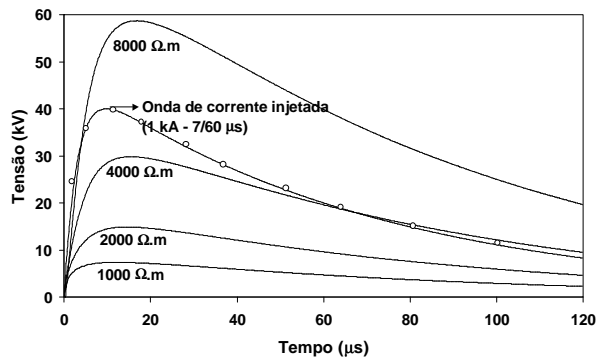


FIGURA 4

Ondas de tensão e corrente no sistema de aterramento.

Os autores consideram a impedância impulsiva de aterramento (relação entre os valores de pico das ondas de tensão e corrente:  $Z_p = V_p / I_p$ ) como um modelo representativo para tal tipo de ocorrência. As simulações mostraram que as diferenças nos resultados para os outros tipos de ondas de corrente não foram significativas. Como pode ser visto na Tabela 1, a impedância impulsiva de aterramento permanece praticamente constante para os 3 casos.

## 2.3 A torre

No momento, os autores estão desenvolvendo uma formulação, baseada em teoria de campo, para computar o comportamento eletromagnético da torre através da avaliação das ondas de tensão e corrente ao longo de sua extensão. Considerando a relação entre ambas as ondas é possível determinar um modelo, o qual aproxima a torre como uma seqüência de diferentes impedâncias de surto. No presente estágio desta investigação, considerando os primeiros resultados, parece uma suposição preliminar razoável aproximar o modelo da torre por uma impedância de surto de 480 $\Omega$  ( $Z_T$ ). Tal valor foi adotado neste trabalho.

TABELA 1  
Valor da impedância impulsiva de aterramento (diferentes resistividades do solo e ondas de corrente)

Resistividade do solo ( $\Omega\cdot m$ )	Parâmetros das ondas tempo de frente e cauda ( $\mu s$ )		
	1,2/50	7/60	10/60
	$Z_p$ ( $\Omega$ )	$Z_p$ ( $\Omega$ )	$Z_p$ ( $\Omega$ )
1000	10,4	7,4	7,5
2000	14,9	14,9	15,3
4000	27,1	29,8	30,6
8000	53,2	58,7	60,4

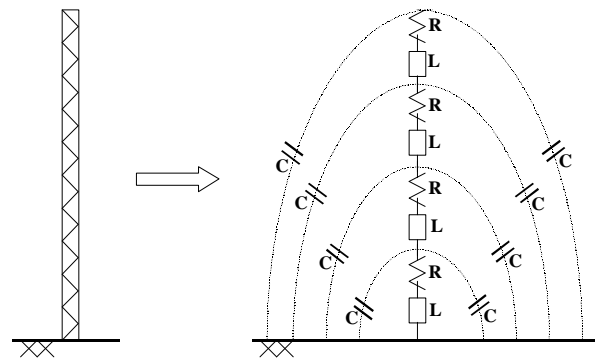


FIGURA 5  
Representação da torre.

## 2.4 O canal de descarga

A modelagem deste componente parece ser a tarefa mais difícil. Diferentes aproximações são encontradas na literatura e, até o momento, este assunto não foi suficientemente investigado pelos autores. Portanto, neste trabalho, somente para fins de análise, decidiu-se aproximar o canal de descarga por 3 diferentes valores de impedância de surto, como um múltiplo da impedância de surto assumida para a torre ( $Z_C = 2xZ_T$ ,  $3xZ_T$  e  $10xZ_T$ ).

### 3.0 – RESULTADOS PRELIMINARES

#### 3.1 Introdução

No caso de torres muito altas (várias centenas de metros), devido ao longo tempo de tráfego da onda, as reflexões nos pontos de descontinuidade de impedância são percebidas nitidamente na onda medida. Este aspecto faz com que a identificação dos coeficientes de reflexão se torne uma tarefa relativamente fácil e, da mesma forma, o trabalho de descontaminação. Entretanto, no caso de torres curtas, como aquela da Estação do Morro do Cachimbo, isto não acontece e os efeitos de contaminação são expressos por diferenças no valor de pico da onda e por moderadas mudanças na frente da onda, ambas de difícil percepção.

Os autores empregaram o programa EMTP para simular a onda de corrente que seria medida na base da torre quando uma "onda limpa" é injetada em seu topo. Os resultados são apresentados nas figuras seguintes. As suposições adotadas foram aquelas referidas nos itens anteriores.

#### 3.2 Resultados e análises

As figuras 6, 7 e 8 referem-se a uma onda de corrente original de 1,2/50 $\mu$ s, considerando 4 valores diferentes para a impedância do aterramento,  $Z_p$  (aqueles indicados na tabela 1). Cada figura corresponde a um valor diferente para a impedância do canal ( $Z_c$ ).

As figuras 9 a 11 ilustram os mesmos resultados para uma onda de corrente original de 7/60 $\mu$ s.

Todas as figuras denotam a significativa corrupção do sinal medido. O valor de pico excede em mais de 25% o valor correspondente à onda original. Por outro lado, os parâmetros de tempo da frente da onda não parecem ser afetados acentuadamente para a onda lenta (7/60 $\mu$ s).

A influência da variação dos valores da impedância de aterramento dentro de sua faixa usual é moderada para todas as ondas. Devido ao valor muito reduzido da impedância de aterramento em relação à impedância admitida para a torre, a variação do seu valor, na faixa considerada, praticamente não altera o coeficiente de reflexão e, portanto, exerce pouca influência na modificação do sinal medido.

As oscilações observadas para as ondas rápidas (figura 8) são associadas ao valor relativamente pronunciado assumido para a impedância do canal de descarga.

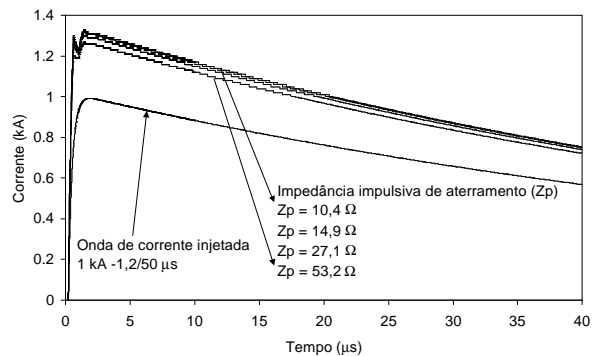


FIGURA 6

Resultados simulados para a onda de corrente medida (onda de corrente: 1,2/50 $\mu$ s,  $Z_c = 960\Omega$ ,  $Z_p$  variável).

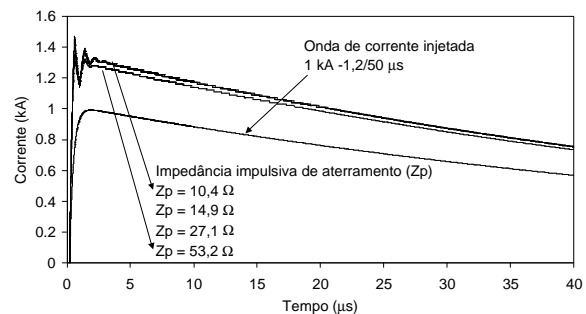


FIGURA 7

Resultados simulados para a onda de corrente medida (onda de corrente: 1,2/50 $\mu$ s,  $Z_c = 1440\Omega$ ,  $Z_p$  variável).

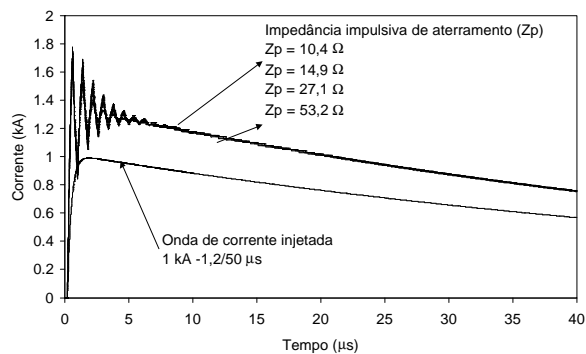


FIGURA 8

Resultados simulados para a onda de corrente medida (onda de corrente: 1,2/50 $\mu$ s,  $Z_c = 4800\Omega$ ,  $Z_p$  variável).

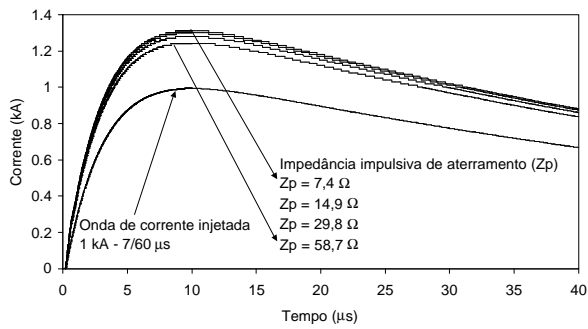


FIGURA 9

Resultados simulados para a onda de corrente medida (onda de corrente:  $7/60\mu\text{s}$ ,  $Z_C=960\Omega$ ,  $Z_P$  variável).

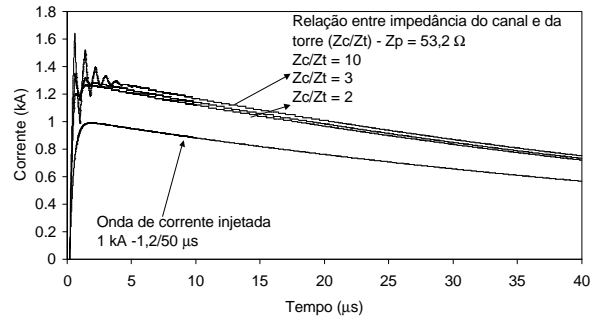


FIGURA 12

Resultados simulados para a onda de corrente medida (onda de corrente:  $1,2/50\mu\text{s}$ ,  $Z_P = 53,2\Omega$ ,  $Z_C$  variável).

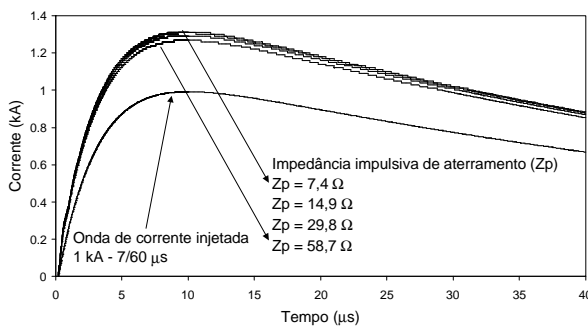


FIGURA 10

Resultados simulados para a onda de corrente medida (onda de corrente:  $7/60\mu\text{s}$ ,  $Z_C=1440\Omega$ ,  $Z_P$  variável).

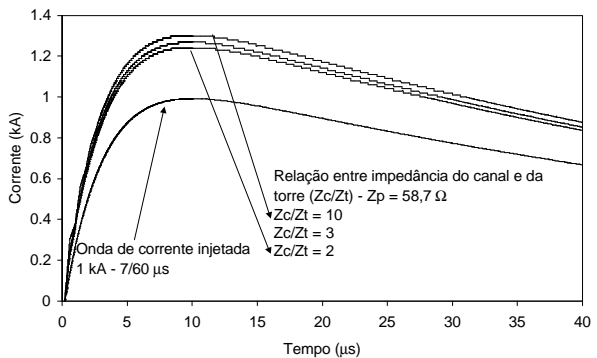


FIGURA 13

Resultados simulados para a onda de corrente medida (onda de corrente:  $7/50\mu\text{s}$ ,  $Z_P = 58,7\Omega$ ,  $Z_C$  variável).

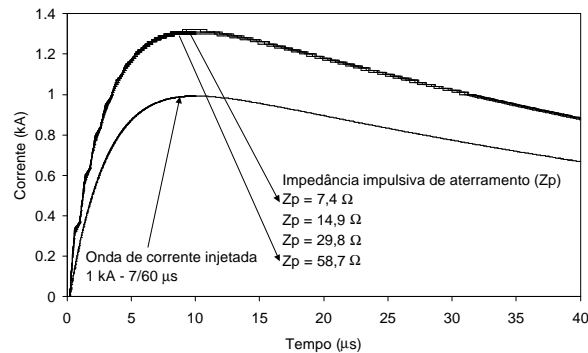


FIGURA 11

Resultados simulados para a onda de corrente medida (onda de corrente:  $7/60\mu\text{s}$ ,  $Z_C = 4800\Omega$ ,  $Z_P$  variável).

As figuras 12 e 13 resumem os resultados considerando um valor constante para a impedância de aterramento e impedância do canal de descarga variável. O coeficiente de reflexão (canal-torre) não influencia significativamente nos resultados.

Todos os resultados para as ondas de  $7/60\mu\text{s}$  e  $10/60\mu\text{s}$  foram muito similares.

A análise de todo o quadro apresentado sugere que a principal razão para o aumento no valor de pico da onda de corrente medida está associada à significativa diferença entre os valores de impedância de surto da torre e do aterramento ( $Z_P < 0,13 Z_T$ ).

Para ilustrar o procedimento necessário para recuperação da onda original de corrente, a partir de uma onda registrada, decidiu-se realizar um caso exemplo. Aplicou-se a uma onda real medida (onda da figura 2), uma correção idêntica àquela que seria necessária para recuperar (descontaminar) uma onda de  $10/60\mu\text{s}$ , dos efeitos ocasionados pelo sistema de medição, nas condições assumidas neste trabalho ( $Z_P=58,7\Omega$ ,  $Z_C = 1440\Omega$ ). A figura 14 mostra não apenas a onda medida, como também a corrigida. Ficam evidentes as diferenças, sobretudo, aquela referente aos valores de pico.

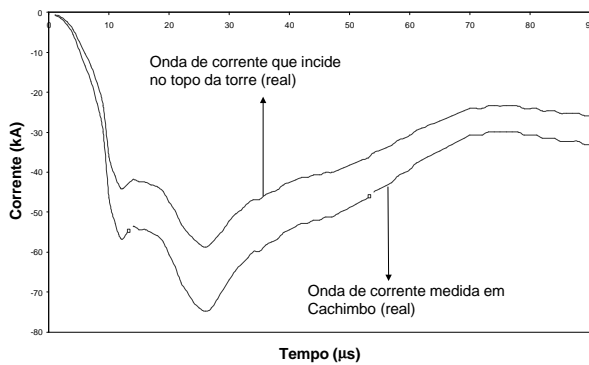


FIGURA 14  
Resultado de "descontaminação" de onda

#### 4.0 – CONCLUSÕES

Os resultados preliminares desta pesquisa denotaram alguns aspectos importante com relação às ondas de corrente medidas, os quais são de interesse prático, a despeito das aproximações e simplificações adotadas.

Em uma primeira aproximação, dependendo do tempo de frente da onda, é possível estimar o excesso no valor de pico medido (em torno de 25% ou mais).

O modelo desenvolvido para representar o comportamento do aterramento é considerado satisfatório. De qualquer forma, a ampla variação da impedância de aterramento, consoante a condição de umidade, sugere a necessidade de monitorar a resistividade do solo na Estação, com o objetivo de se associar um valor desta impedância a cada novo registro de onda de corrente de descarga atmosférica que incide na torre. Esta tarefa será realizada brevemente.

Contudo, como o efeito de contaminação é muito sensível ao modelo adotado para a torre e mais moderadamente para o canal, tornam-se necessárias investigações adicionais para prover tais modelos. Também, o efeito do acoplamento entre o canal de descarga e a torre, o qual pode ser muito influenciado pelo percurso do canal, deve ser contemplado. Atualmente, os autores estão trabalhando para obter um modelo preciso para a torre por meio de uma aproximação baseada em teoria de campo eletromagnético. Eles acreditam que a modelagem do canal é uma questão mais complexa, à qual concentrarão seus esforços em futuro próximo.

#### 5.0 – BIBLIOGRAFIA

- (1) GUERRIERI S., NUCCI C. A. et al. On the Influence of Elevated Strike Objects on Direct Measured and Indirectly Estimated Lightning Currents"; IEEE Transactions on Power Delivery, v.3, n.4, October 1998.
- (2) VISACRO S. F. An Overview on Grounding Modeling; Proceedings of GROUND'98 - International Conference on Grounding and Earthing, Belo Horizonte, Brazil, April 1998.
- (3) VISACRO S. F. , PORTELA C. M. Modeling of Earthing Systems for Lightning Protection Applications, Including Propagation Effects; Proceedings of XXI ICLP, Berlin, Germany, September 1992.
- (4) VISACRO S. F., SOARES JR. A., SARAIVA A.C., SCHROEDER M.A.O. Evaluation of Communication Tower Grounding Behavior on the Incidence of Lightning; Proceedings of International Conference on Lightning Protection - 23<sup>rd</sup> ICLP, Birmingham, England, September 1998.
- (5) VISACRO S. F., SOARES JR. A. Simplified Models for Transmission Line Tower-footing; Proceedings of the International Conference on Lightning Protection - 22<sup>nd</sup> ICLP, Florence, Italy, September, 1996.
- (6) SCHROEDER M.A.O., SOARES A. Jr., VISACRO S.F. et al. Evaluation of Directly Measured Lightning Parameter, Proceedings of V SIPDA, São Paulo, May, 1999.
- (7) SCHROEDER M.A.O., SOARES A. Jr., VISACRO S.F. et al. LRC - Programa de Investigação de Descargas Atmosféricas e de suas Influências na Operação dos Sistemas Elétricos Brasileiros; Anais do ERLAC, Foz do Iguaçu, Junho, 1999.