



MODELOS DE MONTE CARLO PARA LINHAS AÉREAS DE DISTRIBUIÇÃO EM MÉDIA TENSÃO, URBANAS E RURAIS, FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

M. A. M. Saran*

M. L. B. Martinez*

H. R. P. M. de Oliveira**

* Laboratório de Alta Tensão – Universidade Federal de Itajubá

** AES Sul Distribuidora Gaúcha de Energia

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo analisar e direcionar o estudo do desempenho de redes de distribuição aéreas em média tensão frente a descargas atmosféricas diretas e induzidas. Identificando os principais fatores geradores de falhas e desligamentos da rede, no sentido de definir ações para a mitigação dos mesmos.

Algumas simplificações foram consideradas, levando a uma condição de análise crítica, com resultados superestimados. No entanto, os resultados mostram que é possível direcionar o estudo para a solução econômica de uma série de problemas que representam a grande maioria das ocorrências envolvendo descargas atmosféricas.

Resultados da análise de pára-raios convencionais retirados de campo são apresentados e comentados.

PALAVRAS-CHAVE

Descargas Atmosféricas, Desempenho de Linhas, Redes Aéreas de Distribuição.

1. INTRODUÇÃO

As descargas atmosféricas são uma das principais causas de interrupções e desligamentos de linhas aéreas de distribuição de energia elétrica em média tensão, sendo motivo de grande preocupação para as concessionárias.

Os efeitos para a rede de uma descarga atmosférica, direta ou através de um surto induzido, geralmente são destrutivos e freqüentemente se estendem aos equipamentos e as instalações conectadas, com possibilidade de causar danos pessoais e materiais, além de perdas em faturamento, possíveis indenizações aos clientes e multas por quebra de metas como pactuado pela ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica.

A partir da flexibilização e regulamentação do fornecimento de energia elétrica, várias medidas vêm sendo tomadas pelas concessionárias para a prevenção e minimização dos danos associados às descargas atmosféricas. No entanto, como as descargas atmosféricas são eventos aleatórios e de difícil previsão, a maioria dessas medidas nem sempre são tomadas com o devido cuidado e estudos necessários, sendo que muitas além de apresentarem custos elevados não são efetivas.

Deste modo, em grande parte dos casos as providências são tomadas com base no conhecimento do engenheiro responsável, ou ainda com bases definidas em regras sem nenhuma comprovação efetiva, quer



por meio de estudos ou ensaios. Portanto nem sempre os resultados são os mais satisfatórios e não se consegue obter qual a ordem correta em termos de custo x benefício destas ações.

Entre outros fatores, a confiabilidade de uma linha de distribuição depende diretamente de sua exposição a descargas atmosféricas. Para se determinar o nível de exposição da linha, o projetista precisa saber o número anual de descargas por unidade de área e por unidade de tempo, as características topológicas da rede, topográficas da área e se existem estruturas elevadas nas proximidades da linha.

Uma vez que estes fenômenos são de origem aleatória este trabalho considera que a geração dos parâmetros das descargas atmosféricas e sua posição seguem os dados estatísticos de Anderson e Eriksson, o Método de Monte Carlo para o sorteio das incidências de descargas e o Modelo Eletro-Geométrico para a verificação do ponto de interceptação.

2. REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE MÉDIA TENSÃO

As redes aéreas de distribuição de média tensão padrão estão sujeitas a incidência de descargas atmosféricas diretas e também a surtos induzidos. As descargas diretas são as que causam maiores danos, porém podem ser desviadas por estruturas elevadas, tais como torres, prédios, construções altas e árvores. Ao atingir a rede elas comumente causam danos permanentes, pois são descargas de alta intensidade e de alta taxa de crescimento, fazendo com que a rede permaneça desligada até o seu reparo.

Porém, mesmo quando a descarga não atinge diretamente a rede, elas induzem sobretensões que, pelo processo de ondas viajantes, circulam nos dois sentidos da linha a partir do ponto de indução. Podendo causar vários danos, logo este trabalho apresenta a relação entre surtos induzidos e descargas indiretas.

Os resultados obtidos mostram que para a análise da rede um fator de grande influência é a sua topologia, pois a sua densidade e distribuição na área possibilitam uma maior ou menor probabilidade de incidência de descargas diretas.

3. DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Para a verificação do desempenho das redes foi estabelecida uma análise anual da área em estudo, onde é utilizada a taxa média anual de descargas atmosféricas ao solo por quilômetro quadrado para se fazer uma análise dos pontos de início das descargas utilizando-se o Método de Monte Carlo.

As intensidades das descargas são sorteadas aleatoriamente, segundo o método de cálculo das correntes do Modelo de Anderson, que introduz uma aproximação conveniente à distribuição log-normal das correntes de pico dadas por Anderson e por Eriksson. Uma corrente mediana de 31kA resulta em um valor de probabilidade $P=0.5$, com valores maiores de intensidade de corrente I [kA] as probabilidades se tornam mais reduzidas.

A equação é invertida facilmente para corresponder a um nível desejado de probabilidade P , como a seguir:

$$I = 31 \left(\frac{1-P}{P} \right)^{1/2,6} \quad (1)$$

Estabelecido o ponto de início da descarga e sua intensidade, é necessário fazer a verificação do ponto de incidência da mesma, observando se esta atinge diretamente ou se gera um surto induzido na rede. Diversos métodos são possíveis para esta tarefa, porém o mais comum é o Modelo Eletro-Geométrico.

O Modelo Eletro-Geométrico foi desenvolvido a partir do Modelo de Wagner, da velocidade da descarga de retorno, e foi aperfeiçoado por Armstrong, Whitehead e Love, e se caracteriza por um conceito de esfera rolante com raio baseado na intensidade de corrente da descarga atmosférica, segundo a fórmula baseada na norma IEEE - Std 1410 [6]:

$$SD = 10.I^{0,65} \quad (2)$$

Depois de calculada as dimensões e os limites de atração é verificado se a descarga intercepta os condutores da rede. Deste modo, é obtido, por ano e no período de estudo, o número de vezes que a rede foi atingida e, por conseguinte, o correspondente número de vezes que a rede foi solicitada por surtos induzidos, bem como todos os parâmetros associados com as descargas incidentes ao solo.

4. SIMPLIFICAÇÕES E APROXIMAÇÕES

Este estudo considera algumas simplificações, como a adoção de uma superfície plana, pela dificuldade na obtenção de informações de níveis em meio digital, um solo perfeitamente condutor para o cálculo da amplitude das tensões induzidas, e a inclusão manual de estruturas elevadas, como torres, prédios e árvores. Estas simplificações levam a uma condição crítica para a análise, sendo que todos os resultados são superestimados.

Contudo é possível incluir manualmente pontos situados em um plano mais elevado que o solo na topologia do sistema. Estes pontos interceptam as descargas diretas, fazendo o papel das estruturas elevadas. Isto reduz o número de descargas diretas a valores, provavelmente, mais próximos aos obtidos quando da observação dos relatórios de ocorrência das equipes de manutenção das concessionárias de energia elétrica.

5. PROCESSO DE ANÁLISE

O processo de análise é anual, ou seja, são sorteadas todas as descargas atmosféricas em um ano com base na taxa anual de descargas ao solo por quilômetro quadrado, que pode ser assumida como aleatória, ao longo do período de análise. As descargas são distribuídas aleatoriamente ao longo da área em estudo. A intensidade e a taxa de crescimento da corrente de descarga também são obtidas de forma aleatória com base nos dados estatísticos da IEEE – Std 1410.

A Figura 1 apresenta a distribuição das probabilidades de ocorrência das correntes de descargas diretas uma rede rural de média tensão.

Com a posição e intensidade escolhidas passa-se ao Método Eletro-Geométrico para verificar se a descarga atinge a rede de distribuição. Deste modo, é calculado para a rede o número e a porcentagem de descargas diretas interceptadas, o valor da corrente média e o desvio padrão associado. Este processo pode ser repetido automaticamente para um período de análise de 100 anos, gerando dados para o valor médio e desvio padrão para a porcentagem de descargas que atingem a rede e os valores correspondentes de intensidade de corrente que a atingiu.

6. RESULTADOS

Serão apresentados aqui três resultados de análise de descargas atmosféricas em redes de distribuição de média tensão, respectivamente um sistema de distribuição rural, um urbano sem considerar estruturas elevadas e também simulando as estruturas elevadas.

Todas as análises estão baseadas em redes de distribuição reais da concessionária AES Sul.

6.1 Rede de Distribuição Rural

A grande maioria das redes rurais possui uma relação entre o comprimento total do alimentador pela área total reduzida. Deste modo, possuem uma menor probabilidade de serem atingidas por descargas atmosféricas diretas.

A Figura 2 apresenta a curva de permanência das correntes de descarga que atingiram diretamente a rede rural. São indicados os valores de corrente com 50% de probabilidade – Mediana, a probabilidade para uma corrente de descarga de 100kA e a menor intensidade de descarga, corrente com probabilidade de 100% de ser excedida.

A rede sob análise possui uma área de 323,64 km² e um comprimento total de 138,83 km. Nas simulações foi obtida, em relação ao número total de descargas ao solo, uma taxa média de descargas diretas aos condutores, ao longo de 100 anos, de 4,02% com um desvio padrão de 0,48%. Neste caso o valor médio da amplitude da corrente de descarga direta, a partir do valor da mediana, conforme Figura 3, é de 41 kA. Estes dados foram obtidos com uma taxa de 6 descargas ao solo/km²/ano.

Deste modo, para uma densidade de descargas ao solo de 1 descarga ao solo/km²/ano, isto corresponde a uma densidade de 9,28 descargas/100 km de rede/ano. Logo, de acordo com a Figura 3, a cada 100 km de rede, para 6 descargas ao solo/km²/ano, 27,84 descargas apresentam amplitude superior a 41 kA, bem como 6,68 descargas ultrapassam a amplitude de 100 kA. Apesar de possuir capacidade para indicar qual a porcentagem dos pára-raios da rede experimentaram correntes de descarga com amplitude superior a sua corrente de descarga nominal, isto não é objeto do presente estudo.

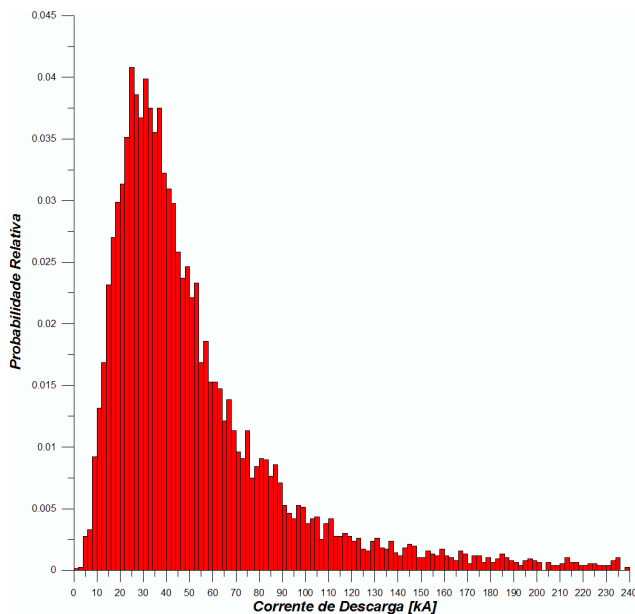


Figura 1 – Distribuição das Probabilidades das Correntes de Descargas

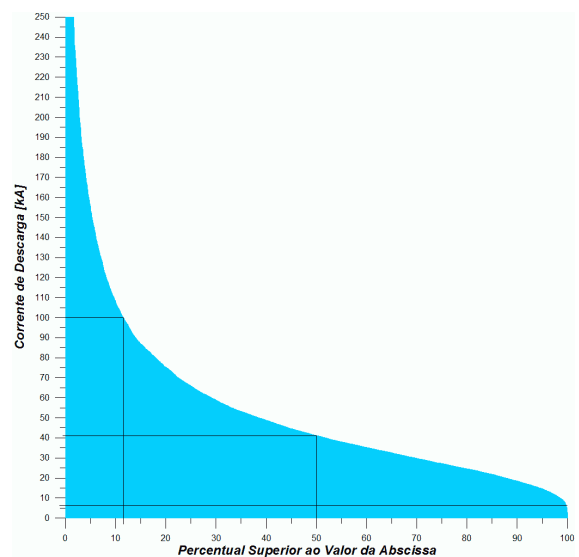


Figura 2 – Curva de Permanência das Correntes de Descarga para a Rede Rural

6.2 Rede de Distribuição Urbana – Sem Considerar Estruturas Elevadas

A grande maioria das redes urbanas possui uma relação entre o comprimento total da rede de distribuição pela área total elevada. Deste modo possuem maior probabilidade de serem atingidas por descargas atmosféricas diretas. Porém em áreas urbanas a presença de estruturas elevadas, como construções com maior altura que a rede, árvores, torres, entre outros, desviam das redes de distribuição muitas das descargas que deveriam atingi-las.

Como a obtenção de dados indicando a localização das estruturas elevadas é complexa e trabalhosa, no momento, o programa de análise não as considera automaticamente. Portanto, em termos de uma primeira aproximação para o estudo, a rede urbana, objeto deste estudo foi analisada desconsiderando presença de estruturas elevadas.

De modo similar ao aplicado às redes rurais, a Figura 3 apresenta a curva de permanência das correntes de descarga que atingiram diretamente a rede urbana sob análise. São indicados os valores de corrente com 50% de probabilidade – Mediana, a probabilidade para uma corrente de descarga de 100kA e a menor intensidade de descarga, corrente com probabilidade de 100% de ser excedida.

Esta rede possui uma área de 22,28 km² e um comprimento total de 100,62 km. Nas simulações foi obtida, em relação ao número total de descargas ao solo, uma taxa média de descargas diretas aos condutores, ao longo de 100 anos, de 30,87% com um desvio padrão de 4,14%. Neste caso o valor médio da amplitude da corrente de descarga direta, a partir do valor da mediana, conforme Figura 3, é de 39 kA. Estes dados foram obtidos com uma taxa de 6 descargas ao solo/km²/ano.

Deste modo, para uma densidade de descargas ao solo de 1 descarga ao solo/km²/ano, isto corresponde a uma densidade de 6,82 descargas/100 km de rede/ano. Logo, de acordo com a Figura 3, a cada 100 km de rede, para 6 descargas ao solo/km²/ano, 20,44 descargas apresentam amplitude superior a 39 kA, bem como 3,27 descargas ultrapassam a amplitude de 100 kA.

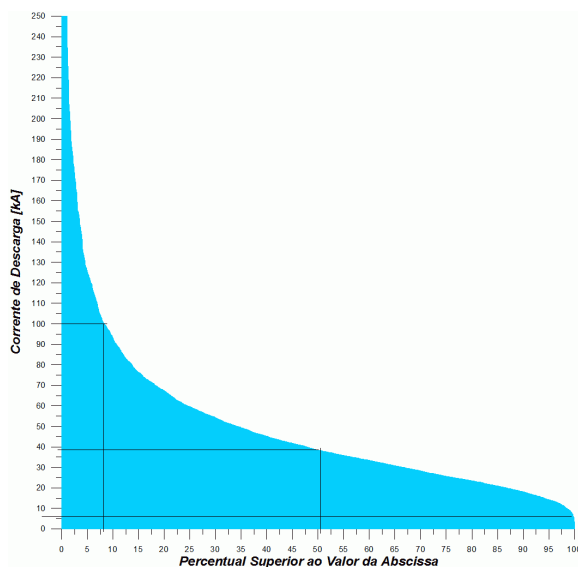


Figura 3 – Curva de Permanência das Correntes de Descargas Diretas para a Rede Urbana

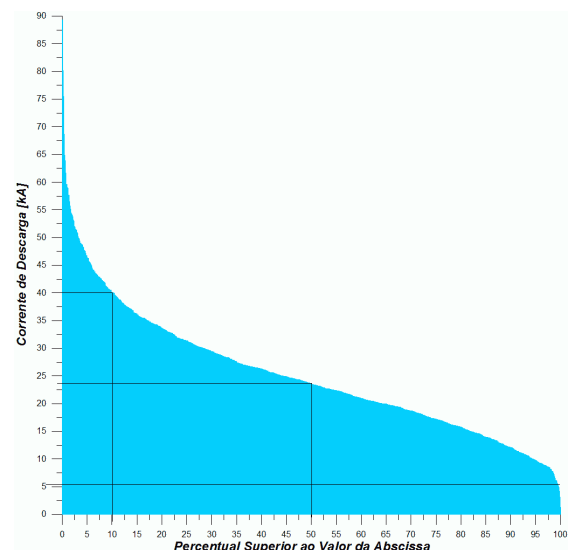


Figura 4 – Curva de Permanência das Correntes de Descargas Diretas para a Rede Urbana Simulando as Estruturas Elevadas

6.3 Rede de Distribuição Urbana – Simulando Estruturas Elevadas

A simulação da presença de estruturas elevadas implica na inclusão manual de diversos pontos ao longo da rede. Com este artifício os resultados obtidos aproximam-se dos casos reais. Isto tem por objetivo incorporar a blindagem natural fornecida por árvores, construções elevadas, torres, entre outros, nas simulações e resultados.

Em um primeiro caso, as estruturas elevadas foram inseridas com espaçamento médio de 10m para as linhas de distribuição e de 40 m entre duas estruturas consecutivas, com altura pouco superior à rede de média tensão, em torno de 15 m. Caso este em que as estruturas fornecem uma blindagem relativamente alta à rede, onde somente descargas de baixa intensidade atingem a rede. Um outro caso com estruturas mais próximas à rede, entre 3 a 5 m, porém mais espaçadas entre si, entre 80 e 200 m, dependendo de sua posição na topologia da rede, também foi simulado para corresponder a uma área urbana com menor densidade de construções e estruturas.

Esta rede possui a mesma área e comprimento da simulada anteriormente, no entanto, considera a presença de estruturas elevadas. Deste modo, nas simulações foi obtida, em relação ao número total de descargas ao solo, uma taxa média de descargas diretas aos condutores, ao longo de 100 anos, de 2,24% com um desvio padrão de 1,17%. Neste caso o valor médio da amplitude da corrente de descarga direta, a partir do valor da mediana é de 12 kA. Estes dados foram obtidos com uma taxa de 6 descargas ao solo/km²/ano. Para uma densidade de descargas ao solo de 1 descarga ao solo/km²/ano, isto corresponde a uma densidade de 0,24 descargas/100 km de rede/ano.

Logo a cada 100 km de rede, para 6 descargas ao solo/km²/ano, 0,73 descargas apresentam amplitude superior a 12 kA, bem como não foram encontradas descargas que ultrapassam a amplitude de 100 kA. Neste caso, a eficácia da blindagem no desempenho frente a surtos atmosféricos das redes de média tensão é perfeitamente evidenciada.

A Figura 4 apresenta a curva de permanência das correntes de descarga que atingiram diretamente a rede urbana, para o segundo caso de simulação de estruturas elevadas, o de menor blindagem. São indicados os valores de corrente com 50% de probabilidade – Mediana, a probabilidade para uma corrente de descarga de 100kA e a menor intensidade de descarga, corrente com probabilidade de 100% de ser excedida.

Neste caso, nas simulações foi obtida, em relação ao número total de descargas ao solo, uma taxa média de descargas diretas aos condutores, ao longo de 100 anos, de 15,43% com um desvio padrão de 3,36%. Neste caso o valor médio da amplitude da corrente de descarga direta, a partir do valor da mediana, conforme Figura 4, é de 23 kA. Estes dados foram obtidos com uma taxa de 6 descargas ao solo/km²/ano. Para uma densidade de descargas ao solo de 1 descarga ao solo/km²/ano, isto corresponde a uma densidade de 2,22 descargas/100 km de rede/ano.



Figura 5 – Resultados de Descargas Atmosféricas em Eletrodos de Pára-Raios Convencionais

Logo, conforme a Figura 4, a cada 100 km de rede, para 6 descargas ao solo/km²/ano, 6,68 descargas apresentam amplitude superior a 23 kA, bem como não foram encontradas descargas que ultrapassam a amplitude de 100 kA. Neste caso, a eficácia da blindagem no desempenho frente a surtos atmosféricos das redes de média tensão é perfeitamente evidenciada.

7. CONCLUSÃO

Neste estudo, com as simplificações adotadas, as redes urbanas sem blindagem sofreram com uma maior quantidade de descargas, tanto diretas como induzidas, pois apresentam um adensamento superior ao das redes rurais. Porém como não foram consideradas construções e estruturas elevadas, é necessário observar que o número de descargas diretas nestes casos é superestimado.

De acordo com as simulações, um baixo número de descargas diretas atinge as redes urbanas, principalmente quando os circuitos são blindados naturalmente por estruturas elevadas. Nas análises realizadas entre 2% a 16% das descargas atingem diretamente as redes urbanas. Para uma densidade de 1 descarga ao solo/km²/ano, isto implica entre 0,24 e 2,22 descargas/100 km de rede/ano. De modo complementar, a amplitude das correntes médias que atingem as redes fica entre 12 e 23 kA. Logo, para as redes urbanas o principal fator de estudo no desempenho frente às descargas atmosféricas são os surtos induzidas.

Os estudos demonstram que a amplitude da maior parte das correntes de descarga direta em ambientes urbanos é inferior a 40 kA que, por sua vez tem 10% de probabilidade de ser superada. Conforme a Figura 4, a amplitude média das correntes de descarga é da ordem de 25 kA. Isto implica na possibilidade de utilização de pára-raios dimensionados para estas grandezas logo, de menor custo.

A figura 5 mostra os resultados de descargas em eletrodos de pára-raios convencionais. As áreas danificadas “*etchings*” refletem as correntes descarregadas. Ressalta-se que o número de pára-raios com áreas compatíveis com correntes inferiores a 20 kA é elevado, atingindo, em resultados preliminares, a ordem de 66,4% dos pára-raios analisados, de um total de 372 pára-raios removidos da rede.

Em termos das redes rurais e urbanas com baixa densidade de blindagem natural ou estruturas elevadas 10% das correntes de descarga possuem amplitude superior a 100 kA. Isto não implica que os pára-raios para estas redes devem ter capacidade de suportar correntes superiores a 100 kA, uma vez que para 1 descarga ao solo/km²/ano em torno de 1,1 descargas/100 km, com amplitude superior a 100 kA, atingem a rede.

Esta corrente é dividida igualmente nas duas direções do condutor e o processo de ondas viajantes assim estabelecido é responsável por uma série de falhas de isolamento antes que um conjunto de pára-raios seja alcançado. Já a amplitude média das correntes de descarga é de 40 kA conforme mostram as Figuras 2 e 3, o que confirma em parte os valores de corrente de descargas utilizados nos ensaios de tipo, rotina e recebimento dos pára-raios para sistemas de média tensão.

Nestes casos, a presença de pára-raios e transformadores deve ser cuidadosamente investigada antes de se recomendar práticas padrão de proteção dos consumidores, principalmente quando se tem em mente que a proteção de “melhor qualidade” é individual por equipamento.

Com base nos valores de corrente média observados, é possível afirmar que a presença de descargas diretas implica em falha dielétrica do sistema e quando se considera a qualidade do isolamento dos transformadores também na falha destes.



Quando se observa a redução nas amplitudes das correntes de descarga imposta pela presença de estruturas elevadas considera-se inadequado à aplicação de políticas de indenização indiscriminadas sem a ausência de firme comprovação através de eventos correlatos nas redes.

IBLIOGRAFIA

- [1] NUCCI, Carlo Alberto; PAOLONE, Mario; BORGHETTI, Alberto. Effect of tall instrumented towers on the statistical distributions of lightning current parameters and its influence on the power system lightning performance assessment. VII SIPDA, Curitiba, Novembro, 2003.
- [2] METWALLY, I. A.; HEIDLER, F. H.; NICKEL, R. Computation of collection area and probability of lightning strikes to structures using the Electrogeometric model. VIII SIPDA, São Paulo, Novembro, 2005.
- [3] GRZYBOWSKI, S.; RODRIGUEZ-MEDINA, B. Striking distance dependence on rod height and impulse polarity: A system identification approach. VIII SIPDA, São Paulo, Novembro, 2005.
- [4] TORRES, Horacio. Statistical evaluation of lightning induced overvoltages in distribution lines in the presence of transformers and surge arresters. VII SIPDA, Curitiba, Novembro, 2003.
- [5] MARTINEZ, Manuel L. B.; MENDONÇA DOS SANTOS, Pedro H. Estudo de Tensões Induzidas em Redes de Distribuição, Guia para Melhoria do Desempenho de Linhas Aéreas de Distribuição quanto a Descargas Atmosféricas. Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá, Março, 2004.
- [6] IEEE Guide for Improving the lightning performance of electric power overhead distribution lines, IEEE Standard 1410-1997, Junho, 1997.
- [7] Anderson R.B., Eriksson A.J., "Lightning parameters for engineering application", Electra, No. 69, 1980.