



COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DE PROJETOS DE LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO PARA MÉDIA TENSÃO FRENTE A SURTOS INDUZIDOS

M. A. M. Saran*

M. L. B. Martinez*

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

C. A. Nucci *** M. Paolone ***

* Laboratório de Alta Tensão – Universidade Federal de Itajubá

** AES Sul Distribuidora Gaúcha de Energia

*** Universidade de Bologna, Itália

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo analisar e comparar o desempenho de possíveis projetos de redes de distribuição aéreas de média tensão sob descargas atmosféricas. Sendo realizado em uma parceria entre o Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá, a concessionária AES Sul e a Universidade de Bologna. Os resultados são apresentados em termos de falhas esperadas para 100 km de linha para uma densidade de descargas ao solo de 1 descarga/km².ano. Comentários sobre o desempenho relativo e comparações são apresentados.

PALAVRAS-CHAVE

Descargas Atmosféricas, Desempenho de Linhas, Redes de Distribuição, Surto Induzidos.

1. INTRODUÇÃO

A coordenação de isolamento das linhas de média tensão frente a impulsos atmosféricos é executada por meio de métodos estatísticos baseados nos cálculos de risco de falha de isolamento [1]. Este último pode ser estimado quando a distribuição estatística de sobretensões e a suportabilidade do isolamento são conhecidas.

Devido à altura limitada das linhas de distribuição em média e baixa tensões comparadas às estruturas em sua vizinhança, surtos atmosféricos induzidos são mais frequentes que descargas diretas como demonstrado em [28]. Por esta razão, este artigo é focado na avaliação do desempenho de uma linha padrão de distribuição em média tensão, classe 25kV, da AES Sul frente a surtos atmosféricos induzidos.

A avaliação do desempenho das linhas de distribuição frente a surtos induzidos por descargas atmosféricas envolve um modelamento preciso dos mecanismos de indução que resultam nas sobretensões. Adicionalmente, para conseguir uma coordenação de isolamento apropriada, é necessário levar em conta a presença de dispositivos de proteção, constituídos basicamente de pára-raios e/ou cabo guarda/neutro aterrado. A conseqüente complexidade dos fenômenos envolvidos e o número elevado de não linearidades resultam em uma dificuldade na estimativa das tensões induzidas. Além de modelar precisamente as linhas aéreas, o desenvolvimento de modelos completos das linhas de distribuição são necessários, isto permite, em princípio, otimizar o número e localização de dispositivos de proteção e minimizar o número de falhas e desligamentos.



Nos últimos anos modelos mais precisos [2-6], comparados aos propostos na literatura da primeira parte do último século [6], tem sido apresentados. No que concerne à estimativa do desempenho da linha de distribuição, esta é executada usando os métodos estatísticos apresentados em [8] e estendidos em [9-10]. Tal procedimento é baseado em modelos avançados, permitindo assim uma descrição mais precisa do mecanismo de indução de sobretensões por descargas atmosféricas, e no Método de Monte Carlo.

2. CÁLCULO DO DESEMPENHO DE LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO FRENTE SURTOS INDUZIDOS

O procedimento estatístico para inferir o desempenho de uma linha de distribuição aérea frente a uma descarga induzida é baseado no cálculo da tensão induzida por meio dos modelos implementados no Código LIOV [2-5] e no Método de Monte Carlo.

O Código LIOV permite o cálculo de tensões induzidas ao longo de uma linha aérea de multicondutores como função da forma de onda da corrente da descarga atmosférica (amplitude, tempo de frente e duração), velocidade da descarga de retorno, geometria da linha (altura, comprimento, quantidade e posição dos condutores), valores das resistências terminais, resistividade do solo e permissividade relativa.

Em particular, o código LIOV é baseado na formulação do acoplamento entre campo e linha de transmissão de Agrawal et al. [2], apropriadamente adaptado para o caso de uma linha aérea sobre um solo com perdas. As equações são numericamente resolvidas pela abordagem de diferenças finitas no domínio do tempo (FTDT) [2, 11]. O código LIOV calcula o campo eletromagnético originado por uma descarga atmosférica indireta [12] adotando o modelo de engenharia da descarga de retorno MTLE [13, 14] e usando a fórmula de Cooray-Rubinstein [15-17], aperfeiçoada de acordo com as observações de Wait [18], para levar em consideração, no cálculo do campo, o valor finito da resistividade do solo.

Com relação ao efeito da resistividade do solo no cálculo dos parâmetros da linha, com referência particular à impedância do solo, a expressão de Carson [19] é utilizada. Como todos os modelos acima mencionados são implementados no domínio do tempo, a fórmula transitória da resistência do solo de Timotin [20], que corresponde à fórmula de Carson, é utilizada. Recentemente, a expressão proposta por Rachidi et al. em [21] foi introduzida no código LIOV, o qual corresponde à expressão geral de Sunde para a impedância do solo [22].

A distância lateral de atração adotada pelo Grupo de Trabalho de Desempenho de Linhas de Transmissão sobre Descargas Atmosféricas do IEEE foi utilizada para distinguir descargas diretas de induzidas [1], sendo que somente as descargas induzidas são consideradas neste estudo.

Os parâmetros adotados para a corrente de pico e a distribuição estatística log-normal do tempo de frente são os propostos por Anderson e Eriksson [23], com um coeficiente de correlação igual a 0,47 como proposto em [24]. Estas distribuições estatísticas foram obtidas usando dados experimentais coletados por estruturas elevadas. Embora a presença de uma estrutura elevada resulte em uma influência nos parâmetros da distribuição estatística [25], esta foi desprezada e as distribuições estatísticas de Anderson e Eriksson são consideradas como aquelas de descargas diretas ao solo. Isso permite, posteriormente, uma melhor comparação dos resultados obtidos com outros apresentados na literatura sobre o assunto.

A localização da descarga é suposta uniformemente distribuída sobre a área ao redor da linha, ampla o suficiente para incluir todos os eventos de descargas que causam tensões induzidas com amplitude superior à tensão mínima suportável pelo isolamento da linha, considerada 50 kV, neste estudo.

3. GEOMETRIA DAS SIMULAÇÕES

Os dispositivos pára-raios foram adotados como sendo o padrão médio normalizado para redes aéreas de distribuição de média tensão. De acordo com [26] a característica U-I não-linear média destes pára-raios é a apresentada na Figura 1. As condutividades do solo sugeridas como base foram 0,01 S/m e 0,0033 S/m; as resistências de aterramento associadas a estes solos são de 10Ω e 40Ω , respectivamente o valor padrão e o máximo admissível.

Todas as simulações descritas neste trabalho referem-se a uma linha de 2 km de comprimento com uma distância de 100 m entre dois postes subseqüentes. A geometria dos condutores, apresentada na Figura 2, é um dos padrões, adotados pela AES Sul, onde a posição do condutor aterrado é a do condutor neutro – N, condutor superior da baixa tensão, outras configurações com condutores nus apresentam tensões induzidas, em modo comum, próximas aos valores obidos para o caso padrão analisado.

As posições de um conjunto de descargas geradas aleatoriamente na área ao redor da linha, de 80.10^3 eventos. A área é de 24 km² e foi considerado um número de descargas por km² por ano de $NG=1$. No procedimento estatístico a velocidade da descarga de retorno pode se considerada como uma variável aleatória, dependente da corrente da descarga [8] ou assumida como sendo de valor fixo. Nestas simulações ela foi considerada constante e igual a $1,5.10^8$ m/s.

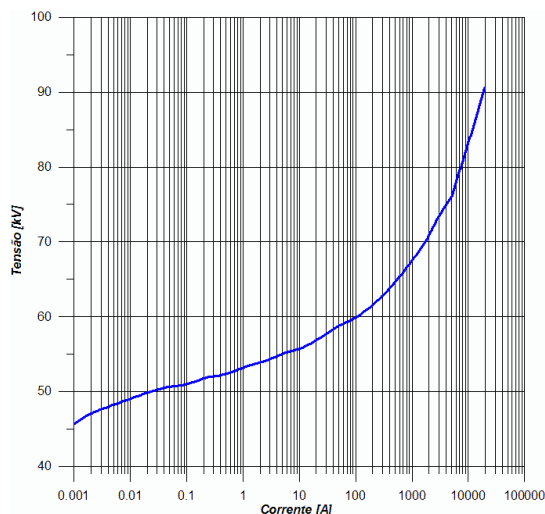


Figura 1 - Característica U-I para os pára-raios de média tensão adotados neste estudo

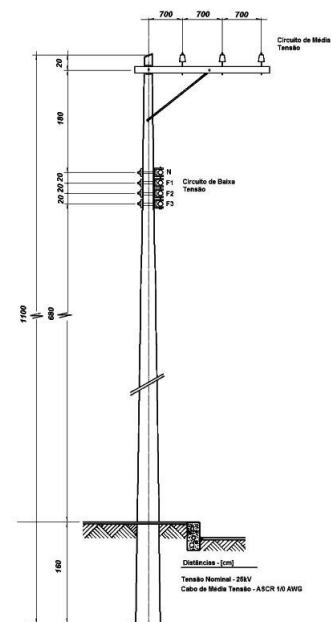


Figura 2 - Geometria dos condutores da linha aérea considerada.

4. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Diferentes configurações de construção da linha foram simuladas, todas baseadas na mesma estrutura padrão com 2 km de comprimento de linha. Os casos diferem na condutividade do solo, resistência de aterramento, número e posicionamento de pára-raios e pontos de aterramento, presença de cabo neutro aterrado e condições de contorno da linha.

A Tabela 1 mostra um resultado típico de cálculo de sobretensões induzidas para as redes de média tensão estudadas, onde é apresentado o número de tensões induzidas que superou um valor estabelecido de NBI, nível básico de isolamento. É possível observar que o número de descargas superiores ao NBI entre as

fases é praticamente igual, sendo assim as amplitudes das tensões induzidas para as três fases podem ser consideradas iguais. O que reflete o efeito de modo comum do fenômeno de indução aliado à proximidade entre os condutores, o que é válido para as demais configurações com condutores nus. Nestes casos a variável mais importante é a altura do condutor em relação ao solo. Deste modo, todos os cálculos de coordenação de isolamento podem ser realizados para uma única fase, e estendidos para o número de fases do circuito sob análise. Logo, para um determinado valor de NBI, uma linha trifásica apresenta um risco de falha de 3 vezes o risco calculado para uma monofásica.

Tabela 1 – Número de Descargas Superiores ao Nível Básico de Impulso – NBI para GDF = 1 Descarga ao Solo por km² por Ano.

Número de Descargas Superiores ao NBI			
NBI [kV]	Fase – A	Fase – B	Fase – C
50	49,62	48,84	49,62
75	24,72	24,48	24,72
100	15,00	14,64	15,00
125	9,12	9,00	9,12
150	5,58	5,52	5,58
175	2,88	2,88	2,88
200	1,74	1,56	1,74
225	0,78	0,72	0,78

Os ensaios de laboratório têm demonstrado que não existe nenhum ganho dielétrico efetivo com a utilização de cruzetas de madeira [27]. Logo, a Figura 3 apresenta a relação entre o risco de falha, calculado como sendo a integral da curva de suportabilidade, em função do nível básico de isolamento – NBI do conjunto de isoladores da estrutura, para a condição onde não há presença de pára-raios, cabo neutro ou guarda e para uma condutividade do solo de 0,0033 S/m.

A Figura 3 mostra que o risco de falha de uma linha de distribuição, considerando uma distância a partir do ponto da descarga de 10 ou 20 postes em cada sentido da linha, é virtualmente o mesmo. Já a Figura 4 apresenta os resultados dos cálculos de risco de falha para todos os casos simulados, para linhas infinitas, uma distância de influência de 20 postes e uma condutividade de solo de 0,01 S/m, condição estudada que impõe a menor sollicitação.

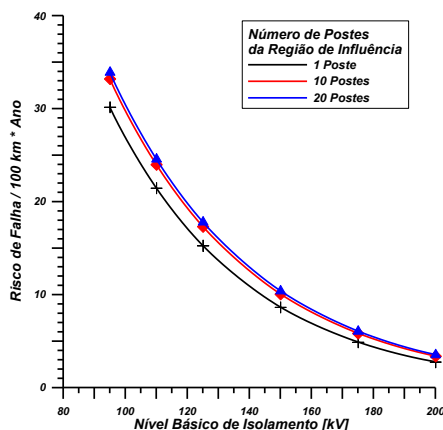


Figura 3 – Risco de Falha por Fase x Nível Básico de Isolamento para uma Linha de Distribuição sem Cabo de Neutro e Pára-raios com Solo de 0.0033 Siemens/metro, para GDF=1 Descarga ao Solo por km² por Ano.

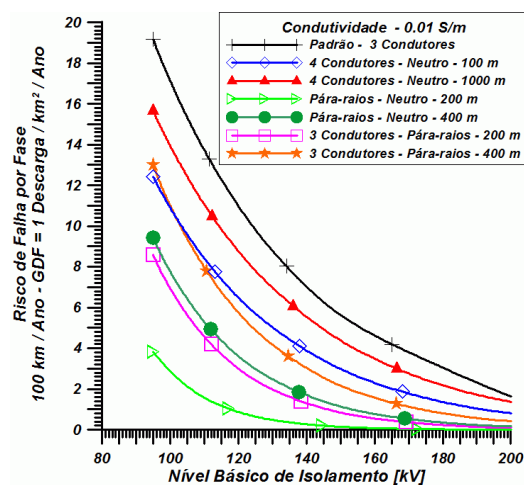


Figura 4 – Risco de Falha para uma Distância de Influência de 20 Postes, Condutividade do Solo = 0,01 S/m e GDF = 1 Descarga ao Solo por km² por Ano.

Os resultados apresentados na Figura 4 mostram que configurações de linha equivalentes, em termos de risco de falha, podem ser obtidas. Por exemplo, para uma linha com isoladores com NBI igual a 100 kV e pára-raios a cada 400 m possui desempenho semelhante à construção com condutor neutro aterrado a cada 100m.

De modo complementar a Figura 4 também permite comparar diferentes configurações de construção de linha adotando-se um valor aceitável de risco de falha. Deste modo, por exemplo, para um risco de falha de 4 falhas por 100 km por ano é possível trabalhar com as seguintes configurações:

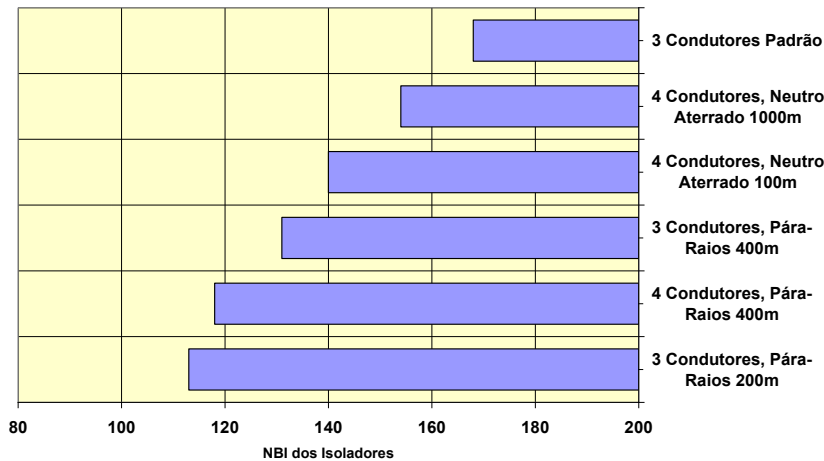


Figura 5 – Comparativo de configurações de construção de linhas versus NBI dos isoladores.

Como mostrado, a elevação do nível de isolamento do sistema implica na possibilidade de redução da complexidade da rede, uma vez que o risco de falha é o mesmo. Logo, a escolha de uma configuração de construção da rede se reduz a uma análise econômica, relacionando os custos de instalação e manutenção.

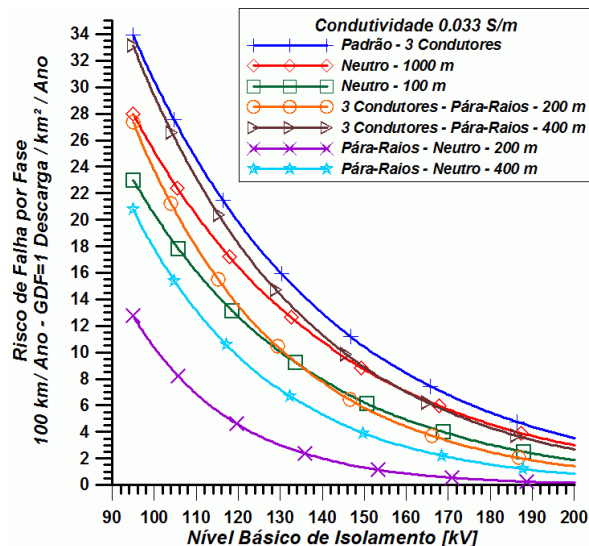


Figura 6 – Risco de Falha para uma Distância de Influência de 20 Postes, Condutividade do Solo = 0,0033 S/m e GDF = 1 Descarga ao Solo por km² por Ano.

A Figura 6 apresenta os resultados dos cálculos de risco de falha para todos os casos simulados, para linhas infinitas, considerando uma distância de influência de 20 postes e uma condutividade de solo de 0,0033 S/m, condição estudada que impõe a maior solicitação.



A análise da Figura 6 mostra que as soluções envolvendo a utilização de isoladores com nível básico de impulso superior a 200kV apresentam, como esperado, riscos de falha, frente a impulsos induzidos, razoavelmente reduzidos. Nestes casos, mesmo as construções mais complexas, como a que envolve a utilização de pára-raios a cada 200m e cabo neutro aterrado, não apresentam diferenças significativas em relação ao caso de construção sem a utilização de cabo neutro aterrado ou pára-raios.

Também é possível observar que a utilização de pára-raios a cada 400 metros e a construção com neutro aterrado a cada 1 km, possuem risco de falha muito próximos, principalmente quando da utilização de isoladores com nível básico de impulso superior a 150kV. Portanto, é possível concluir que, para solos com alta resistividade e alta resistência de aterramento, os sistemas a 4 condutores, com neutro aterrado somente nos pontos com transformadores são equivalentes aos sistemas a 3 condutores e pára-raios espalhados a cada 400 metros, incluindo-se neste caso os pára-raios dos transformadores.

Como se observa na Figura 6, nos sistemas a 3 fios, com nível básico de isolamento inferior a 200kV, o aumento da eficiência só é possível com a instalação de pára-raios a cada 200 metros. O mesmo tipo de comentários e observações pode ser elaborado para linhas construídas com pára-raios a cada 200 metros e com neutro aterrado a cada 100 metros. Logo, sistemas a 3 condutores com pára-raios a cada 200 metros são equivalentes a sistemas a 4 condutores com aterramento a cada poste ou no máximo a cada 100 metros.

7. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou os resultados estatísticos visando comparar o desempenho das diferentes configurações das linhas aérea da distribuição frente à surtos induzidos por descargas atmosféricas.

As simulações apresentadas permitem determinar relações entre os níveis de falha esperados para os sistemas de distribuição e o nível básico de isolamento das estruturas, no caso dos isoladores.

Uma vez que se estabelece um nível de risco aceitável frente às sobretensões induzidas, é possível, com o auxílio de gráficos simplificados, escolher quais alternativas podem ser consideradas e associar às mesmas os custos de instalação e manutenção. Isto permite a tomada de decisões que levem em conta importantes aspectos técnicos e econômicos.

Como demonstrado, a instalação de pára-raios a cada 400 metros de rede não é uma solução eficaz, principalmente quando confrontada com soluções onde os isoladores apresentam níveis de isolamento superiores a 170kV. Deste modo, sistemas onde o nível de isolamento é inferior a 125 kV protegidas por pára-raios a cada 400 metros apresentam risco de falha mais elevado que os sistemas construídos sem pára-raios e isoladores com nível de isolamento superior a 170 kV.

Sempre é possível argüir que os pára-raios instalados nas redes atuam no sentido de reduzir o número de falhas por descargas diretas. No entanto, cabe ressaltar que isto tem significado para a primeira componente da descarga que apresenta tempo de crescimento relativamente reduzido, tempo médio de frente da ordem de 5.5 μ s. O mesmo não é válido para as componentes subseqüentes que apresentam tempo médio de frente da ordem de 1.1 μ s. Isto implica que para as descargas subseqüentes os fenômenos de reflexão nos pára-raios não possuem tempo hábil para se fazerem presentes.

Deste modo, como primeiro resultado deste estudo, é possível concluir que a solução para a construção de linhas com 3 condutores, sem pára-raios ou cabo neutro aterrado e nível básico de isolamento igual ou superior a 200kV é uma alternativa bastante válida e deve ser estudada. Esta alternativa apresenta potencial econômico tanto na questão de equipamentos como na de ferragens, porém com um custo maior com relação aos isoladores utilizados de forma padrão. Finalmente, como não utiliza cabos de neutro e



aterramentos passíveis de furto, bem como pára-raios, estes passíveis de falha, a solução a 3 condutores também apresenta baixos custos de operação.

BIBLIOGRAFIA

- [1] IEEE working group on the lightning performance of distribution lines, "Guide for improving the lightning performance of electric power overhead distribution lines", IEEE Std 1410, 2004.
- [2] Agrawal A.K., Price H.J., Gurbaxani S.H., "Transient response of a multiconductor transmission line excited by a nonuniform electromagnetic field", IEEE Trans. on EMC 22-2 (1980) 119-129.
- [3] Nucci C.A., Rachidi F., Ianoz M. and Mazzetti C., "Lightning-induced voltages on overhead power lines", IEEE Trans. on EMC, Vol. 35, February 1993.
- [4] Rachidi F., Nucci C.A., Ianoz M., Mazzetti C., "Influence of a lossy ground on lightning-induced voltages on overhead lines", IEEE Trans. on EMC, Vol. 38, No. 3, pgs. 250-263, August 1996.
- [5] Rachidi F., Nucci C.A., Ianoz M., "Transient analysis of multiconductor lines above a lossy ground", IEEE Trans. on PWRD, Vol.14, No.1, pgs. 294-302, January 1999.
- [6] Meliopoulos A. P. S., Cokkinides G., Kennedy J., "An integrated model for lightning performance evaluation of overhead distribution lines", Proc. 25th International Conference on Lightning Protection, Rhodes, Greece, 2000.
- [7] S. Rusck, "Induced lightning overvoltages on power transmission lines with special reference to the overvoltage protection of low voltage networks", Transactions of the Royal Institute of Technology, Stockholm, No. 120, 1958.
- [8] Borghetti A., Nucci C.A., "Estimation of the frequency distribution of lightning induced voltages on an overhead line above a lossy ground: a sensitivity analysis", in Proc. International Conference on Lightning Protection, Birmingham, United Kingdom, September, 1998.
- [9] Borghetti A., Nucci C.A., Paolone M., "Statistical Evaluation of Lightning Performances of Distribution Lines", Proc. of the International Conference on Power System Transient 24-28 June 2001, Rio de Janeiro Brazil.
- [10] Borghetti A., Nucci C.A., Paolone, "An Improved Procedure for the Assessment of Overhead Line Indirect Lightning Performance and its Comparison with the IEEE Std. 1410 Method" in press on IEEE Trans. on PWRD.
- [11] Paolone M., Nucci C.A., Rachidi F., "A New Finite Difference Time Domain Scheme for the Evaluation of Lightning Induced Overvoltage on Multiconductor Overhead Lines", Proc. 5th Int. Conf. on Power System Transient, vol. 2, Rio de Janeiro, Brazil, 2001, pgs. 596-602.
- [12] Uman M.A., McLain D.K., Krider E.P., "The electromagnetic radiation from a finite antenna", American Journal of Physics, 1975, Vol. 43, pgs. 33-38.
- [13] Nucci C.A., Mazzetti C., Rachidi F., Ianoz M., "On lightning return stroke models for LEMP calculations", Proc. 19th International Conference on Lightning protection, Graz, Austria, April 1988.



- [14] Rachidi F., Nucci C.A., “On the Master, Lin, Uman, Standler and the Modified Transmission Line lightning return stroke current models”, *Journal of Geophysical Research* 95 (1990) 20389-20394.
- [15] Cooray V., “Horizontal fields generated by return strokes”, *Radio Science* 27-4 (1992) 529-537.
- [16] Rubinstein M., “An approximate formula for the calculation of the horizontal electric field from lightning at close, intermediate, and long range”, *IEEE Trans. on EMC* 38-3 (1996) 531-535.
- [17] Cooray V., “Some consideration on the ‘Cooray-Rubinstein’ approximation used in deriving the horizontal electric field over finitely conducting ground”, in: *Proc. 24th Int. Conf. on Lightning Protection, Birmingham, United Kingdom, 1998*, pgs. 282-286.
- [18] Wait J.R., Concerning the horizontal electric field of lightning, *IEEE Trans. on EMC* 39-2 (1997) 186.
- [19] Carson J.R., Wave propagation in overhead wires with ground return, *Bell System Technical Journal* 5 (1926) 539-554.
- [20] Timotin A.L., “Longitudinal transient parameters of a unifilar line with ground return”, *Rev. Roum. Sci. Techn. Electrotechn. et Energ.* 12-4 (1967) 523-535.
- [21] Rachidi F., Loyka S.L., Nucci C.A., Ianoz M., “A new expression for the ground transient resistance matrix elements of multiconductor overhead transmission lines”, *Electric Power Systems Research* 65 (2003) 41-46.
- [22] Sunde E.D., “Earth Conduction Effects in Transmission Systems”, New York, Dover, 1968.
- [23] Anderson R.B., Eriksson A.J., “Lightning parameters for engineering application”, *Electra*, No. 69, 1980.
- [24] Chowdhuri P., “Estimation of flashover rates of overhead power distribution lines by lightning strokes to nearby ground”, *IEEE Transactions on PWDR*, Vol. 4, No. 3, pgs. 1982-1988, July 1989.
- [25] 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 system lightning performance assessment”, *European Transactions on Electrical Power*, Vol. 13, No. 6, November/December 2003, pgs. 365-372.
- [26] IEEE Fast Front Transients Task Force, “Modeling guidelines for fast front transients”, *IEEE Trans. on PWRD*, Vol. 11, No. 1, pgs. 493 – 506, Jan. 1996.
- [27] De Salles, C., Figueira, A. D., Violin, A., Martinez, M. L. B., Oliveira, H. R. P. M., Oling, R., “Insulation Coordination for a 23 kV Medium Voltage Distribution”, *Powertech*, Bologna, Italy, June, 2003.
- [28] Saran, M. A. M., Martinez, M. L. B., Oliveira, H. R. P. M., “Performance of Medium Voltage Urban and Rural Distribution Lines Front Lightning Discharges and Induced Surges”, *Ground’2006 & 2º LPE*, Maceió, Novembro, 2006.