

PROTEÇÃO DE LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EM MACEIÓ-AL ATRAVÉS DE SUPRESSORES DE SURTO E SISTEMAS DE ATERRAMENTO

JOSÉ M. GURGEL NETO¹, ALEXSANDRO A. P. DA SILVA¹

¹*Departamento de Engenharia Elétrica – DEE, Universidade Federal de Pernambuco
Av. Prof. Moraes Rego, 1235 - Cidade Universitária, Recife - PE - 50670-901
Recife, Pernambuco, Brasil*

E-mails: neto.gurgel.moraes@gmail.com, alexsandro.aleixo@yahoo.com

REGINA M. LIMA NETA², DANIEL L. G. ARAÚJO², LUCAS C. S. SANTOS²

²*Centro Universitário CESMAC - AL
Rua Cônego Machado, 918, Farol CEP: 57051-160, Maceió, Alagoas
E-mails: regina.mlmeta@gmail.com, daniel.araujo@sinfra.ufal.br,
lucas.carloman@gmail.com*

Abstract— The research evaluates the transient generated by lightning in a distribution line in Maceió, State of Alagoas. The occurrence of this phenomenon creates surges traveling along the line, causing unexpected shutdowns in the electrical system. A protection system based on use of surge suppressors and guard cable with multi-grounded. To validate the occurrence of faults on the line, a pilot system was implemented in software ATPDraw from computational modeling of real components.

Keywords— ATP, High Frequency, Atmospheric Discharge, Outbreak Atmospheric, Ray, Distribution Line.

Resumo— A pesquisa avalia os transitórios gerados por descargas atmosféricas numa linha de distribuição em Maceió, no estado de Alagoas. A ocorrência desse fenômeno cria surtos de tensão que viajam ao longo da linha, ocasionando desligamentos inesperados no sistema elétrico. É apresentado um sistema de proteção baseado em utilização de supressores de surto e cabo para-raios multi-aterrados. Para validar a ocorrência de faltas na linha, um sistema piloto foi implementado no software ATPDraw, a partir da modelagem computacional dos componentes reais.

Palavras-chave— ATP, Alta Frequência, Descargas Atmosféricas, Surto Atmosférico, Raio, Linha de Distribuição.

1 Introdução

Dados estatísticos apontam que em torno de 50 a 60% dos desligamentos das linhas de distribuição estão associados a descargas atmosféricas e outras causas diversas classificadas como fenômenos naturais, que podem estar associadas também a descargas atmosféricas (JUNIOR, 2003).

Levando-se em conta que os índices cerâmicos no país são crescentes, a fim de mitigar o problema de saída de linha diante de uma descarga atmosférica, foram desenvolvidos estudos com simulações dos componentes elétricos existentes em uma linha de 69 kV na cidade de Maceió-AL. Espera-se estabelecer critérios de proteção que assegurem a operação satisfatória de todo o sistema elétrico.

Em um dos trabalhos relacionados à melhoria do desempenho de linhas de transmissão frente às descargas atmosféricas foi proposto um método simplificado que se baseava na incorporação de informações sobre as características das descargas atmosféricas verificadas, tomando como referência o desempenho das linhas existentes (CABRAL, 2016). Neste, trabalho a simulação computacional mostra ser uma importante ferramenta para estudar o desempenho de SEP com base na análise de flashover e back-flashover provocado por descargas atmosféricas (CABRAL, 2016).

No decorrer deste artigo propõe-se uma metodologia de proteção contra descargas atmosféricas em

linhas de distribuição de 69 kV. Algumas propostas são obtidas a partir da avaliação dos elementos da linha, como blindagem, isolamento, utilização de supressores de surto, cabos guardas e sistemas de aterramento. A metodologia fornece uma estrutura pela qual podemos analisar o comportamento de uma linha frente à sobretensões causadas por raios, utilizando a ferramenta *ATPDraw* para simulação de três cenários associados aos tipos de falhas.

Inicialmente o cenário é de avaliar os impactos gerados por uma falha de blindagem (*shielding failure*), ou seja, a incidência direta de uma descarga atmosférica sobre uma fase da linha. As quais podem ser corrigidas através do cálculo presente no modelo eletrogeométrico de EPRI (JUNIOR, 2003). Posteriormente, se analisam os efeitos da incidência das descargas atmosféricas nos condutores dos cabos para-raios, os quais geram nos condutores de fase, por indução, sobretensões diretamente proporcionais à magnitude da corrente de descarga e a resistência de pé de torre da linha. O último cenário de simulação inclui a opção da utilização dos para-raios de linha (*surge arresters*) perto do local da descarga atmosférica, para posterior análise e comparação no que diz respeito às características de isolamento da linha.

Desta maneira, em cada um dos três cenários a serem analisados, os mesmos valores de descarga atmosférica são utilizados em simulação. Assim, torna-se possível determinar os valores críticos de para ocorrência de falhas na linha em estudo.

Esta metodologia aponta soluções para a distribuição de energia local através de um modelo através da ferramenta de simulação *ATPDraw*, a fim de facilitar a análise e a detecção de deficiências nos sistemas de distribuição além de diminuir a taxa de saída de linhas.

2 Considerações Básicas

2.1 Fundamentos Teóricos

O fenômeno das descargas atmosféricas pode ser compreendido como a ruptura da rigidez dielétrica do ar entre duas superfícies carregadas eletricamente com polaridades opostas, podendo ocorrer entre nuvens e/ou entre uma nuvem e a terra, consistindo em um ou mais impulsos da ordem de kA (JUNIOR, 2003).

A Figura 1 ilustra o processo mais comum da ocorrência de uma descarga atmosférica, a partir de uma descarga preliminar, de um acúmulo de cargas negativas na base da nuvem em direção ao solo. Quando a descarga preliminar alcança o solo, ocorre uma corrente de retorno (*return stroke*) extremamente brilhante, que se propaga da terra em direção à nuvem, através do caminho criado pela descarga preliminar, ou seja, através dos canais ionizados (*stepped leader*). A ocorrência da corrente de retorno é o ponto alto de uma descarga atmosférica, quando ocorre a movimentação de grandes quantidades de cargas.



Figura 1. Etapas na formação de uma descarga atmosférica (VISACRO, 2007).

A maioria das descargas atmosféricas é de polaridade negativa, sendo considerado um percentual igual ou maior que 90%, fato de grande importância para o desempenho dos sistemas de transmissão e distribuição em virtude da diferente resposta de suas isolações de acordo com a polaridade da descarga.

O desligamento devido à incidência de uma descarga atmosférica pode ser visto sob o ponto de vista de falhas de blindagem (isto é, incidência direta de descargas nos condutores de fase) ou através das tensões induzidas, que são causadas por descargas que são interceptadas com sucesso pelos cabos guarda ou torres (ALI, 2013) e (JUNIOR, 2003).

Além disto, o desligamento de uma linha por descarga atmosférica depende de fatores como: características elétricas do raio, comprimento e suportabilidade da cadeia de isoladores, geometria da

torre, comprimento do vão, resistência do pé de torre e tensões induzidas nas fases sãs.

Assim ao analisar a incidência de uma descarga atmosférica no topo de uma estrutura, por exemplo, o potencial do topo da torre é determinado inicialmente pela corrente de descarga e pela resistência de pé da torre. Se a tensão que surge na estrutura exceder a capacidade de isolamento da cadeia de isoladores em uma das fases, esta cadeia rompe, resultando em um *flashover*.

Muitas linhas de transmissão são projetadas com cabos guarda, ou seja, cabos de cobertura sobre os condutores, que normalmente interceptam o surto atmosférico, minimizando a possibilidade de incidência direta da descarga nas fases, porém, é possível ter a incidência de uma descarga atmosférica diretamente em uma das fases (condutores da linha).

2.2 Modelagens Utilizadas

O modelo J. Martí, proposto em 1982 é disponibilizado em simuladores de transitórios eletromagnéticos, como ATP/EMTP e foi o modelo adotado para o estudo realizado (MARTÍ, 1982).

A formulação proposta por J. Martí visa à representação da elevada dependência com a frequência dos parâmetros de linhas de distribuição com corrente de retorno a terra, através de soluções no domínio modal.

O modelo utiliza funções peso aplicado às equações de linhas de transmissão e, embora represente a dependência com a frequência dos parâmetros da linha, a matriz de transformação modal é constante com a frequência. Assim, esse modelo resulta em uma maior precisão para a representação de linhas simétricas e equilibradas, sendo adequado para a simulação de linhas aéreas (SURTEES, 2006).

A descarga atmosférica é geralmente representada por uma fonte de corrente impulsiva. Seus parâmetros como o tempo de subida, a corrente de pico máxima e a duração do surto são determinados por uma abordagem estatística, considerando a densidade de descargas no solo do local em estudo.

O raio pode ser idealizado por um gerador de onda de corrente tipo Heidler, representado pela equação 1 (HEIDLER, 1999) e representado na Figura 2.

$$I(t) = \frac{I_0}{\eta} \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{\left(1 + \frac{t}{\tau_1}\right)^n} \exp(t/\tau_2) \quad (1)$$

Onde:

I_0 : amplitude máxima da corrente;

τ_1 : constante associada ao tempo de frente;

τ_2 : constante relativa ao tempo de decaimento;

η : é o fator de correção da amplitude;

n : É um expoente com valores entre 2 a 10.

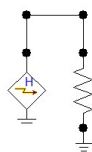


Figura 2. Modelo da fonte de forma de onda Heidler no ATPDraw.

A forma de onda de corrente da descarga corresponde à forma de dupla exponencial mostrada na Figura 3 e os parâmetros do surto são descritos na Figura 4.

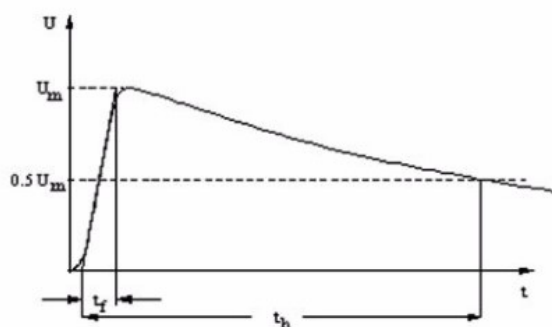


Figura 3. Exemplo de onda de corrente obtida pela aplicação da Função de Heidler. (KING, 2004)

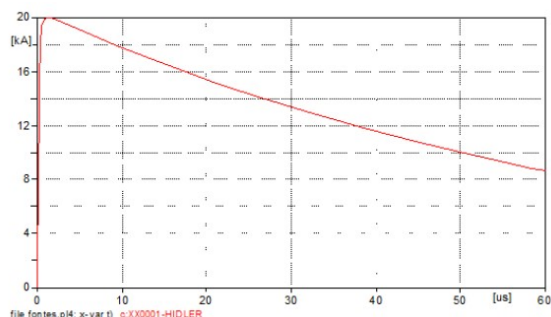


Figura 4. Forma de onda t pica de um surto de corrente para a fonte do tipo Heidler (1,2/50 s) inserido no Software ATPDraw.

A modelagem do supressor de surto foi desenvolvida a partir das características da linha de distribuição em estudo, em conjunto com as informações do Catálogo de Supressores de Surto da fabricante Siemens e são detalhadas na Tabela 1 (SIEMENS, 2014).

Tabela 1 - Dados do Equipamento Adotado

Características do Equipamento Adotado	
Fabricante	SIEMENS
Linha	3EL5
Modelo	3EL5 051-0 P.2.
V_n	51kV
V_{op}	41 kV

$V_{r8/20}$	145 kV
$V_{r1/T2}$	484 kV

Para a modelagem computacional, foi adotado o modelo PINCETI, derivado do modelo IEEE, porém independente das características físicas do equipamento, conforme Figura 5. Ademais este modelo dispensa correções nos parâmetros ao longo do processo de simulação (SATO, 2009).

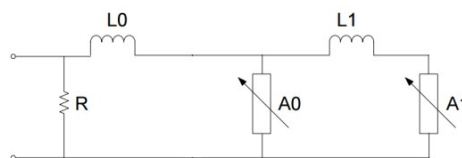


Figura 5. Modelo Pinceti para Supressores de Surto (SAENG SUWAN 2008).

Os parâmetros L_1 e L_0 são calculados a partir as equações (2) e (3) (SAENG SUWAN, 2008).

$$L_1 = \frac{1}{4} \frac{V_{r1/T2} - V_{r8/20}}{V_{r8/20}} V_n \quad [\mu H] \quad (2)$$

$$L_0 = \frac{1}{12} \frac{V_{r1/T2} - V_{r8/20}}{V_{r8/20}} V_n \quad [\mu H] \quad (3)$$

Onde:

V_n : Tensão nominal do supressor

$V_{r1/T2}$: Tensão residual do supressor frente a um surto de corrente rápido de 10 kA de amplitude.

$V_{r8/20}$: Tensão residual do supressor frente a um surto de corrente 8/20 com 10 kA de amplitude.

Os elementos não lineares A_0 e A_1 são modelados a partir do componente MOV-92 do *software ATPDraw*, com curvas não lineares referenciadas pelos parâmetros do IEEE, sintetizados na Figura 6 e descritos na Tabela 2 (ALI, 2013), (LOBODA, 2010) e (SILVA, 2007).

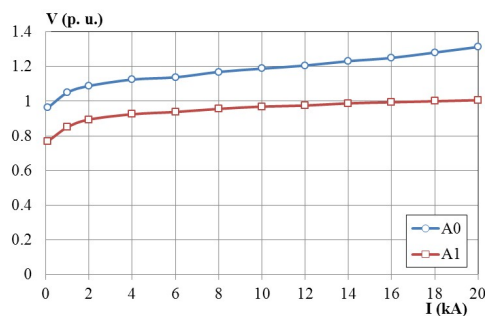


Figura 6. Curva de referência para os Elementos não Lineares (ALI, 2013).

Tabela 2. Parâmetros dos componentes A0 e A1.

I (A)	A0		A1	
	Tensão (pu)	Tensão (Volts)	Tensão (pu)	Tensão (Volts)
100	0,963	139635	0,769	111505
1000	1,05	152250	0,85	123250
2000	1,088	157760	0,894	129630
4000	1,125	163125	0,925	134125
6000	1,138	165010	0,938	136010
8000	1,169	169505	0,956	138620
10000	1,188	172260	0,969	140505
12000	1,206	174870	0,975	141375
14000	1,231	178495	0,988	143260
16000	1,25	181250	0,994	144130
18000	1,281	185745	1,000	145000
20000	1,313	190385	1,006	145870

Tabela 3. Elementos de circuito do modelo.

Parâmetros	Valores
R	1 M Ω
L ₀	9,936 μ H
L ₁	29,808 μ H

O aterramento apresenta uma resistência que depende da resistividade do solo, do número de hastes associadas, do tamanho das hastes de aterramento e da configuração do sistema de aterramento. Nesse estudo, o aterramento está sujeito a correntes de altas frequências, na faixa de 10 kHz a 3 MHz (VISACRO, 2007).

Para esta faixa de frequência, uma conexão a terra apresenta resistência, capacitância e indutância (VISACRO, 2007). Para uma haste vertical única tem-se a equivalência apresentada na Figura 7. Os valores adotados na simulação foram: 1,663 μ F para a capacitância, 1,827 μ H para a indutância da haste de aterramento e a resistência igual a 26,87 Ω .

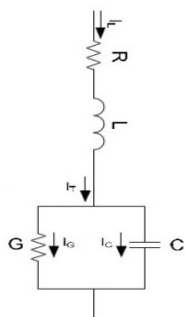


Figura 7. Impedância de terra equivalente (VISACRO, 2007).

A Tabela 4, a seguir, reúne os dados da linha utilizada como base para o estudo de proteção.

Tabela 4. Dados do Sistema Elétrico modelado.

V _n (Tensão Nominal de Linha)	69 kV
f _n (Frequência de operação)	60 Hz
S (Potência Transmitida)	12 MVA
Tipos de estrutura	Concreto Armado Circular, H=18m
Condutores por Fase	01

Cabo	CA Tulip 170,48mm ²
Extensão	7.100m
Nível de Isolamento	450 kV
Aterramento	Cabo Contrapeso Coppersteel 3X10 AWG

A linha foi modelada em sua totalidade, por parâmetros distribuídos dependentes da frequência através do modelo J. Martí (MARTÍ, 1982). Foram detalhados oito vãos de 81,6 m entre dois postes consecutivos. Os demais vãos foram modelados como uma linha contínua, com 6.2 km de extensão à montante e 237 m à jusante.

Foram utilizados na sub-rotina do modelo de J. Martí: frequência característica repartida em 8 décadas com 10 pontos/décadas, frequência fundamental igual a frequência industrial de 60Hz, com um range de frequência até 5 kHz para representar fenômenos referidos a surtos atmosféricos, levando em consideração o efeito pelicular (SILVA, 2007).

3 Simulações

Todas as simulações consideram a aplicação de descargas da linha em estudo, sendo aplicados diretamente na fase ou no cabo-guarda, quando este estiver instalado. Foram simuladas três situações, para obter resultados das sobretensões geradas na linha em estudo.

3.1 Linha sem cabos para-raios

Com a finalidade de observar o comportamento da linha na incidência direta de uma descarga atmosférica, foi inserida uma fonte de corrente com intensidade de 30 kA diretamente no cabo da Fase C no ponto 005 da simulação (ponto de incidência da descarga), como pode ser visto na Figura 8.

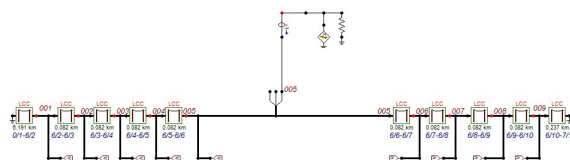


Figura 8. Modelagem da linha sem cabo para-raios e qualquer outro tipo de proteção.

Com a incidência desse surto, é verificada uma sobretensão com amplitude máxima de 4,72 MV na fase diretamente atingida, e o surto induzido nas fases com amplitude máxima de 1,41 MV.

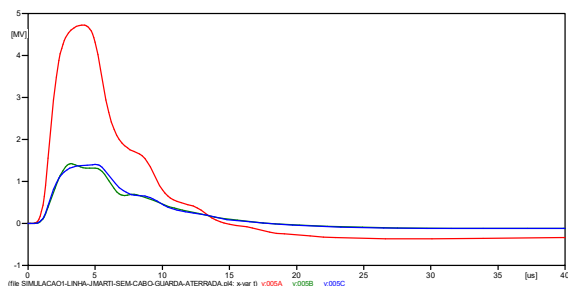


Figura 9. Tensões nas fases A, B e C medidas no ponto de incidência da descarga atmosférica.

3.2 Linha com cabo para-raios

O cabo para-raios tem sido a principal forma de proteção contra descargas atmosféricas utilizadas em linha, sendo sua função a blindagem da linha diante de um surto. A maioria das linhas de que possuem cabos para-raios, têm relevante importância quanto à distribuição ou transmissão de grandes quantidades de potência.

As linhas de distribuição mais antigas ou novas linhas com níveis de potência reduzidos não possuem cabos para-raios, sendo necessária a utilização de outros métodos de proteção, dentre eles, a implantação de para-raios de linha ou até a substituição ou adaptação de estruturas da linha para implantação dos cabos para-raios. Sendo assim, avaliou-se essa possibilidade de utilização de cabo para-raios, conforme ilustrado na Figura 10.

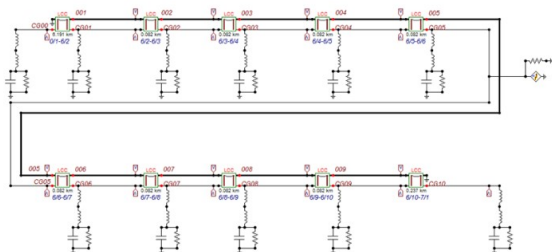


Figura 10. Modelagem da linha de distribuição com cabo para-raios multi-aterrados.

Conforme apresentado na Figura 11, com a implantação do cabo para-raios, o surto de tensão nas fases medido no mesmo ponto 005 foi reduzido para o máximo de 238 kV, enquanto a sobretensão no próprio para raios atingiu o máximo de 700 kV no ponto diretamente atingido pela descarga.

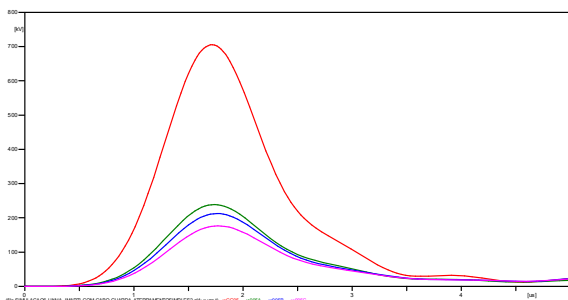


Figura 11. Tensões nas fases A, B e C e no cabo para-raios, medidas no ponto de incidência da descarga atmosférica.

A fim de observar as ocorrências de sobretensões adjacentes ao ponto de ocorrência do raio, a medição de tensão no ponto 009, atingiu o valor máximo de 16,9 kV, devido à atenuação do surto pelo sistema de aterramento conforme apresentado na Figura 12.

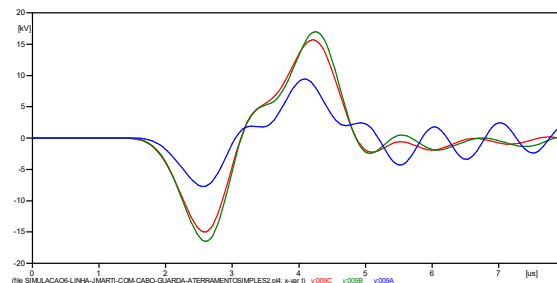


Figura 12. Tensões nas fases A, B e C, medidas no ponto 009.

3.3 Linha com Supressor de Surto no Ponto de impacto da Descarga Atmosférica.

Com a finalidade de observar o comportamento da linha com a proteção de um para-raios de linha, a Figura 13 apresenta o novo sistema modelado, no qual foi inserido um supressor de surto diretamente no ponto 005 (ponto de incidência da descarga).

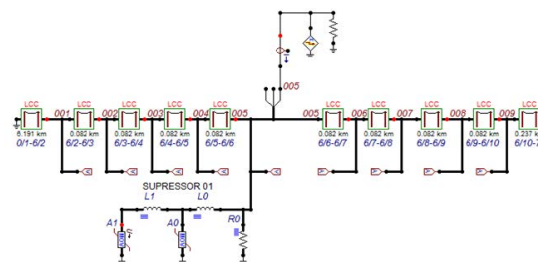


Figura 13. Modelagem da linha sem cabos para-raios e com a presença do supressor de surto.

Pode-se observar na Figura 14, que a tensão se mantém constante em cima do supressor de surto e não ultrapassa o valor de 138 kV, de forma que o para-raios de linha atuou, protegendo a cadeia de isoladores subsequente.

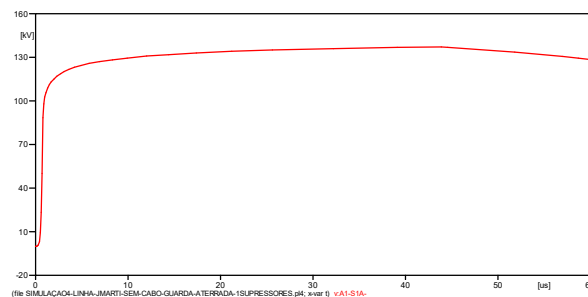


Figura 14. Tensões na fase C, medida no ponto A1 do supressor de surto.

Pode-se observar através da Figura 15, que a tensão nas fases não ultrapassa a tensão crítica (CFO = 450 kV) na fase C, ponto de incidência do surto, protegendo a cadeia de isoladores da linha e garantindo um tensão máxima de 400 kV no sistema protegido.

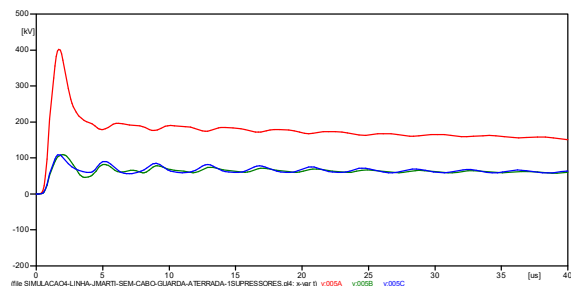


Figura 15. Tensões nas fases A, B e C, medidas no ponto de incidência da descarga atmosférica 005.

4 Conclusão

Ficou evidenciada, através dos resultados obtidos, a importância do cabo para-raios na atenuação dos níveis de tensão de surto atmosférico nas fases quando da ocorrência de descarga atmosférica na linha de distribuição. Além disso, constata-se que os supressores de surto incluídos na linha, ou seja, os para-raios de linha, quando bem dimensionados, possibilitaram uma maior proteção quanto aos níveis de sobretensão, elevando a importância desses equipamentos na drenagem dos surtos de tensão decorrentes de descargas atmosféricas para o sistema de aterramento, garantindo manter o nível de tensão visto pelos equipamentos instalados após ele, protegendo linhas, equipamentos e até subestações de energia.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio a essa pesquisa. A Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e ao Centro Universitário CESMAC, pelo suporte, ajuda essencial no desenvolvimento deste trabalho.

Referências Bibliográficas

- ALI, S. A.W. Design of Lightning Arresters for Electrical Power Systems Protection. *Advances in electrical and Electronic Engineering: Power Engineering and Electrical Engineering*, vol. 11, nº 6, pp. 433 – 442, Ostrava, República Tcheca. 2013.
- CABRAL, Roberto J. and Gazzana, Daniel S. “Desempenho de linhas de distribuição devido a descargas atmosféricas usando ATP-Draw” 2016.
- HEIDLER, F. and CVETIC M. and STANIC. B. V. “Calculation of lightning current parameters”, *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 14, no 2, pp. 399-404. Abril 1999.
- JUNIOR, L. C. Z., *Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência*, 2003, pp. 712, Ed. Universitária-Edusp, São Paulo.

- KING, K. “Handbook for improving overhead transmission line lightning performance”. Relatório técnico, EPRI, 2004.
- LOBODA, M. and MARCINIAK, R.. *Essential Requirements for Earthing System Determining the Efficiency of Lightning Protection*, International Symposium on Electromagnetic Compatibility, China, pp. 1239-1242. 2010.
- MARTI, J. R. "Accurate modeling of frequency dependent transmission lines in electromagnetic transient simulations", *IEEE Trans. on Power App. and Systems*. 1982. Vol. PAS-101 No. 1, pp. 147-155.
- SAENGSUWAN, T. & THIPPRASERT, W. *The Lightning Arrester Modeling Using ATP-EMTP*. Kasetsart Journal: Natural Science, 2008, vol. 42, pp. 156-164 Bangkok, Thailand.
- SATO, T., ASAKAWA, A., YOKOYAMA, H. and HORIKOSHI. *Effective Layout of Surge Arresters on Distribution Line*, X International Symposium on Lightning Protection, Curitiba, 2009, pp. 6.
- SIEMENS, A. G. *High-Voltage Surge Arresters: ProductGuide*, pp. 112. 2014. Erlangen, Alemanha: Siemens AG.
- SILVA, A. P. “Melhoria de Desempenho de Linhas de Transmissão Frente a Descargas Atmosféricas: Desenvolvimento de Sistema de Informações e Análise de Casos”, Minas Gerais, 2007, Dissertação, Universidade Federal de Minas Gerais, p. 111.
- SURTEES, A. J., ROUSSEAU, A. and MARTZLOFF, F. D. "Ground Resistance versus Ground Impedance," *Proc. 28th International Conference on Lightning Protection*, 2006, vol. 1, pp. 670-675, Kanazawa, Japan.
- VISACRO, S. "A Comprehensive Approach to the Grounding Response to Lightning Currents", *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2007. v.22, pp. 381 - 386.