

AVALIAÇÃO DOS POTENCIAIS DE SUPERFÍCIE PROVOCADOS POR UM IMPULSO DE TENSÃO EM UMA MALHA DE ATERRAMENTO

Jéssica Fernandes Alves – jessicafernandes.ee@gmail.com
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba
Av. Primeiro de Maio, 720 - Jaguaribe
58015-435 – João Pessoa – Paraíba

Gilvan Vieira de Andrade Junior – gilvan@ee.ufcg.edu.br
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba
Av. Primeiro de Maio, 720 - Jaguaribe
58015-435 – João Pessoa – Paraíba

Resumo: Nos últimos anos, as concessionárias de energia elétrica estão mais preocupadas com a qualidade da energia entregue aos consumidores. Com isso, há a reflexão que a reputação das empresas passa a ser um bem indispensável e de valor inestimável. Dentro deste contexto, os sistemas de aterramento têm um papel de fundamental importância, especialmente quando se leva em conta a segurança das pessoas e equipamentos ligados às linhas de distribuição e de transmissão de energia elétrica. Estudos dos potenciais de superfície realizados através de medição são o ponto chave a análise mais realista do comportamento das malhas de aterramento. Deste modo, a eficácia da malha de aterramento e o comportamento do solo, frente a propagação de corrente é o que prepondera na redução dos potenciais de superfície. Por esse motivo, esse trabalho apresenta estudos feitos a partir de simulações de malhas de aterramento e um algoritmo utilizando o Método das Diferenças Finitas, feito no Matlab, que realiza uma avaliação do comportamento dos potenciais de superfície quando provocados por um impulso de tensão no solo, para obter as áreas de menor risco para operadores de subestações.

Palavras-chave: Potenciais de Superfície. Impulso de Tensão. Corrente Elétrica. Malhas de Aterramento.

1 INTRODUÇÃO

Estudos relacionados ao tema Aterramento Elétrico tem despertado ao longo do tempo o interesse de diversos pesquisadores. Esse interesse tem sido motivado por diversos fatores, como a melhoria do desempenho dos sistemas aterrados. Tais estudos são particularmente importantes, sobretudo em locais onde a resistividade do solo é elevada. Neste sentido, a modelagem para avaliação da resposta frente a fenômenos transitórios tem se destacado. Os modelos de aterramentos tornam possível a predição de algumas variáveis importantes para o dimensionamento da proteção contra surtos, como a impedância de aterramento e níveis máximos de sobretensão (LIMA, 2010).

Um sistema de aterramento de qualidade é um fator essencial para garantir a proteção das subestações e linhas de transmissão, já que estes são os responsáveis por distribuir no solo a potência elevada descarregada pelas descargas atmosféricas.

Em frente a descargas atmosféricas, o aterramento atua como elemento responsável por conduzir para o solo a corrente proveniente de surtos como descargas atmosféricas e sobretensões de manobra, oferecendo proteção aos equipamentos susceptíveis a estas

solicitações (NOGUEIRA, 2006). Metodologia e modelos apropriados que simulem o comportamento de um sistema de aterramento frente a uma descarga atmosférica podem prover o embasamento necessário para construção de malhas de terra mais eficientes introduzindo um aumento na confiabilidade e segurança de operação do sistema elétrico envolvido (JUNIOR; SAVERIO, 2012).

Ao longo dos anos, vários trabalhos vêm sendo publicados sobre o tema aterramentos elétricos, com a descrição de métodos bastante diversificados, tais como: o método dos momentos, (GUO, 2006), (MELIPOULOS, 1993), (GRCEV, 1993) onde foi feita uma análise do comportamento da estrutura de aterramento no domínio da frequência, utilizando funções de Green e teoria das imagens; o Método das Diferenças Finitas foi aplicado em aterramento de forma pioneira por (TANABE, 2001).

As equações de Maxwell descrevem completamente os fenômenos eletromagnéticos. Porém, sua resolução analítica é impraticável em dispositivos com geometria complexa. Uma alternativa para contornar esse problema é a utilização de métodos do cálculo numérico para obter-se uma solução aproximada (RIBEIRO et al., 2000).

Alguns métodos analíticos para sistemas de aterramentos, que eram utilizados no passado, passaram a ser incorporados em rotinas computacionais. Alguns destes métodos computacionais buscam, na maioria dos casos, simular situações reais em sistemas de aterramentos, promovendo assim uma análise adicional aos métodos práticos de medição.

O Método dos Elementos Finitos pode ser aplicado sem as limitações ou dificuldades que existem em alguns outros métodos (RIBEIRO et al., 2000). Os métodos numéricos têm tido destaque, tornando-se mais atrativos com o advento de computadores digitais cada vez mais rápidos. Embora os métodos numéricos deem a princípio soluções aproximadas, as soluções são suficientemente precisas para os propósitos de engenharia (TUMA, 2005).

Atualmente, como já existem diversos trabalhos que se dedicam ao desenvolvimento ou aplicação de métodos numéricos para se determinar a resposta de eletrodos de aterramento sujeitos às correntes de descargas atmosféricas e, na literatura, existe uma grande variedade de excelentes modelos computacionais, o maior desafio consiste na necessidade de dados experimentais que suportem as hipóteses assumidas por esses modelos acerca do comportamento no solo, no qual os eletrodos são enterrados ou que permitam verificar a influência dos mesmos na resposta transitória de eletrodos de aterramento.

Estudos dos potenciais de superfície realizados através de medição são o ponto chave a análise mais realista do comportamento das malhas de aterramento. Deste modo, a eficácia da malha de aterramento e o comportamento do solo, frente a propagação de corrente é o que prepondera na redução dos potenciais de superfície. Quanto menor estes potenciais durante a propagação da corrente, menor será o risco do operador da subestação.

Este trabalho propõe a partir das realizações de medições de impulsos de tensão no solo, avaliar os níveis de propagação dos potenciais na superfície do solo; os riscos dos potenciais de passo, toque e superfície; e detectar desgastes prematuros em malhas de aterramento.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Visto que o solo terrestre é um excelente condutor de eletricidade, em certas situações, qualquer corpo que esteja em conexão com a terra não haverá diferença de potencial entre o corpo e o solo. Se um corpo estiver carregado ou sob um potencial diferente da terra, ao ser colocado em contato com o solo adquire o mesmo potencial elétrico que a Terra. (CAMPAGNOLO, 1995). Os métodos aplicáveis às avaliações em malhas de subestações no Brasil e no mundo são compostos por vários procedimentos onde a etapa principal é a obtenção

da resistência da malha em ensaio. A partir dos parâmetros resistência, estratificação do solo e localização dos elementos da malha de aterramento da subestação é possível calcular e simular situações de operação do sistema, onde a malha da subestação é solicitada. Estes procedimentos são baseados em experimentos feitos, em instalações desenergizadas e energizadas, por pesquisadores brasileiros e de outros países (BELTANI, 2007).

2.1 Aterramento Elétrico

O Aterramento é um sistema de proteção que consiste em um condutor ligado a uma haste de metal ligado diretamente à terra, que em situações normais, não possui corrente elétrica circulante. O metal mais comumente utilizado nas hastes é o cobre, devido ao seu custo razoável e sua excelente condutividade. Quanto menor for a resistividade de um sistema de aterramento, mais eficaz será a transferência de potência ao solo. Em sistemas elétricos, o aterramento tem muita importância, quando se trata da segurança do sistema e das pessoas que o utilizam.

Existem diversos fatores para que contribuem para projetar uma malha de aterramento. Um desses fatores, é a resistividade do solo. Apenas nesse quesito, podemos perceber diversos fatores que causam interferência como o tipo de solo, a umidade, a temperatura, compactação e pressão e os tipos e concentração de sais dissolvidos no solo. Todos esses fatores, modificam a estrutura dos solos e, por sua vez, a resistividade. Essa resistividade, interfere em quanto de corrente elétrica será absorvido pela terra e, conseqüentemente, quanto se propagará. Nos Sistemas de Aterramento as hastes podem ser simples, alinhadas, em triângulo, em quadrado ou em círculo além das placas, fios e cabos serem enterrados. As Hastes devem ser bons condutores e devem ser inerte as ações das substâncias contidas no solo e a resistência mecânica.

2.2 Sobretensões

A sobretensão é o resultado de uma tensão variável em relação ao tempo envolvendo as fases de um sistema ou uma fase e a terra. Para ser considerada uma sobretensão seu valor de crista deve ser superior ao valor de crista da tensão máxima do sistema (FILHO, 2000).

As sobretensões podem ser classificadas de uma forma bem ampla em dois grupos: sobretensões externas e sobretensões internas, conforme a causa que as provocam seja de origem externa ou interna ao sistema elétrico, respectivamente. Esta classificação é meramente acadêmica e não atende aos interesses relacionados com a especificação de equipamentos, sendo mais adequada outra classificação, associada ao tempo de duração e ao grau de amortecimento das sobretensões. Baseada nesta última classificação, são definidas as sobretensões atmosféricas, as sobretensões de manobra e as sobretensões temporárias. O tempo de duração de uma sobretensão está associado ao tempo da frente de onda da tensão, e o grau de amortecimento fornece uma indicação quanto ao tipo de sobretensão transitória, se de curta duração ou de longa duração (FRONTIN, 2013).

2.3 Método das Diferenças Finitas

Atualmente, como já existem diversos trabalhos que se dedicam ao desenvolvimento ou aplicação de métodos numéricos para se determinar a resposta de eletrodos de aterramento sujeitos às correntes de curto circuito e, na literatura, existe uma grande variedade de excelentes modelos computacionais, como em (SAKIS, MELIOPOULOS & COKKINIDES, 1993), (GRCEV & DAWALIBI, 1993) e em (GUO & GUAN, 2006).

Uma vez medidos os potenciais em todos os pontos de interesse, é possível realizar o mapeamento dos potenciais de superfície para toda a área do solo onde estão se aplicando os

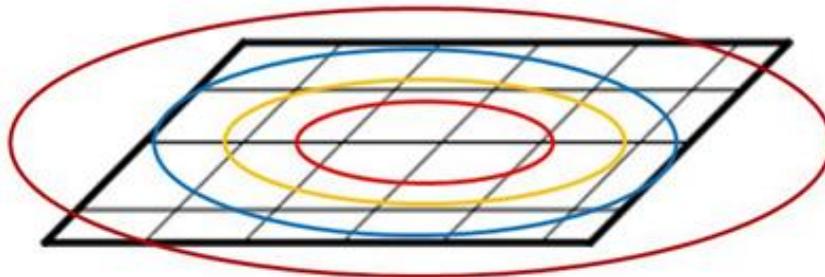
impulsos, através de uma análise via software. Para isso, foi desenvolvido um software de diagnóstico de malha de aterramento que tem como objetivo fornecer as condições operacionais das malhas de terra de um determinado local, proposto também por (TANABE, 2001).

O software é capaz de determinar os potenciais na superfície da malha e em suas circunvizinhanças, sendo possível localizar prováveis zonas de alta resistividade, zonas de desgaste ou de descontinuidade na malha. Para o desenvolvimento deste software, foi utilizado o Método das Diferenças Finitas, que representa um método de mapeamento que resolve a Equação de Laplace de forma iterativa.

2.4 Potenciais de Superfície

A passagem de corrente elétrica em uma malha de aterramento provoca o surgimento de linhas equipotenciais na superfície, como mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Linhas equipotenciais na superfície do solo acima da malha.



Fonte: Elaborado pelos autores

Uma malha de terra tem como uma de suas funções proporcionar uma condição de equipotencialidade satisfatória na superfície do local onde se encontra. Entretanto, na prática, geralmente, os níveis de potenciais podem não se apresentar de maneira totalmente equipotencializada, como no interior de uma subestação, por exemplo. Se uma malha de terra se encontra com áreas de desgastes, os potenciais dentro e fora da malha podem atingir níveis bastante elevados e comprometer a segurança e a proteção do sistema elétrico e das pessoas. Sendo assim, faz-se necessária a medição dos níveis de potencial na superfície do solo, dentro e fora dos limites da malha de aterramento.

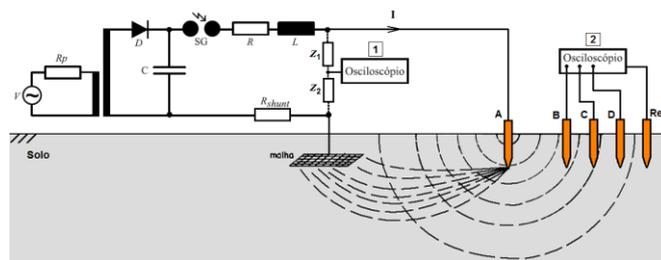
Estudos dos potenciais de superfície realizados através de medição são o ponto chave da análise mais realista do comportamento das malhas de aterramento. Deste modo, a eficácia da malha de aterramento e o comportamento do solo, frente a propagação de corrente e o que prepondera na redução dos potenciais de superfície. Quanto menores esses potenciais durante a propagação da corrente, menor será o risco do operador da subestação.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realizar os testes com os impulsos no solo para a pesquisa, é necessário montar uma malha de aterramento semelhante as malhas que são utilizadas em sistemas reais de aterramento e simular impulsos de tensão para simular o que acontece quando há a incidência de raios nas

malhas. A Figura 2 ilustra o esquema de malha de aterramento semelhante ao que foi utilizado, em que é necessária uma haste de referência para indicar o ponto $(x = 0, y = 0)$ que será adotado, hastes com distâncias distintas para a avaliação das linhas equipotenciais no solo da malha e uma haste que receberá o impulso.

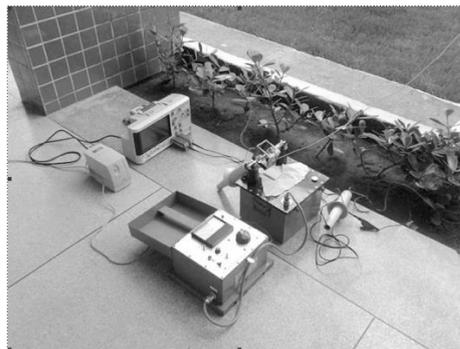
Figura 2 – Montagem da malha de aterramento utilizada.



Fonte: Elaborada pelos autores

O circuito ligado a haste é montado para simular um impulso de tensão, mas no caso desta pesquisa, foi utilizado um espinterômetro como o da Figura 3. O espinterômetro serve como um transformador regulável, convertendo a tensão de 110V em sua entrada para a tensão necessária para o impulso.

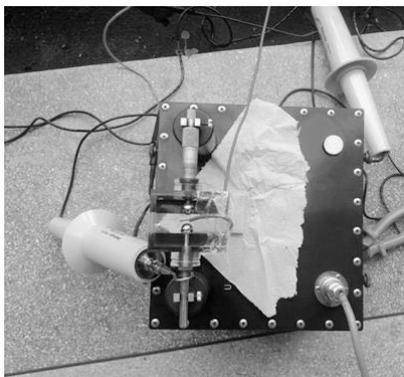
Figura 3 – Espinterômetro utilizado.



Fonte: Elaborada pelos autores

Um fio de cobre é colocado entre as esferas do espinterômetro, como ilustra a Figura 4.

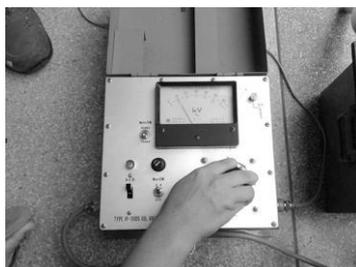
Figura 4 – Fio de cobre colocado entre as esferas do espinterômetro.



Fonte: Elaborada pelos autores

A tensão é induzida para o fio de cobre através do arco elétrico formado pelas esferas do espinterômetro. Para existir este arco, é utilizado um varivolt para obter valores de tensão até atingir aproximadamente 7 a 10 kV. Podemos observar o varivolt na Figura 5.

Figura 5 –Varivolt utilizado para alcançar as tensões necessárias.



Fonte: Elaborada pelos autores

O fio de cobre é ligado a hastes da malha de aterramento que receberá o impulso. Um osciloscópio com pontas de prova de alta tensão terá suas pontas de prova conectadas a haste que utilizamos para avaliar as linhas equipotenciais e ao espinterômetro, para que seja possível observar o comportamento da tensão antes de atingir o solo e seu potencial de superfície no solo, além de coletar os valores das tensões que se dispersam no solo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A malha de tensão da Figura 6 foi montada para a realização dos experimentos. A haste mais próxima a calçada é a haste que recebe os impulsos; a haste em formato de T é a haste de referência dos pontos, que está no ponto adotado como $(x = 0, y = 0)$ e a haste mais distante é a haste utilizada para medir os potenciais de superfície no solo. Diferente da malha da Figura 3, foi utilizada apenas uma haste de referência, pelo fato de o osciloscópio disponível possuir apenas dois canais, em que um deles obrigatoriamente deve estar com a ponta de prova conectada ao espinterômetro. Como foi utilizada apenas uma haste, essa haste percorreu toda a malha, onde foi colocada a 10 cm de distância do seu ponto anterior a cada impulso diferente que foi provocado.

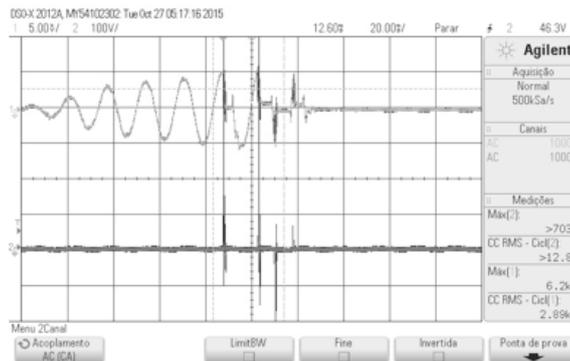
Figura 6 –Malha de Aterramento utilizada na
realização dos experimentos.



Fonte: Elaborada pelos autores

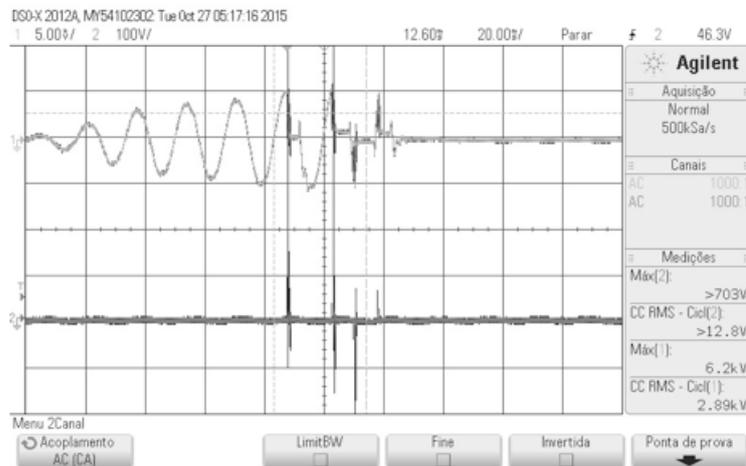
Após aplicar o impulso de tensão, é possível observar o comportamento da tensão no osciloscópio. Enquanto mais próximas as hastes de referencia e de observação, menor será o valor de tensão na haste de observação. A Figura 7 mostra o comportamento da tensão quando a haste de observação está próxima a haste de referência e a Figura 8, quando a haste de observação está distante da haste de referência. Em ambas as figuras, o canal superior indica o sinal da tensão no espinterômetro e o canal inferior indica o sinal de tensão na haste de observação.

Figura 7 – Comportamento da tensão observado no
osciloscópio com as hastes próximas.



Fonte: Elaborada pelos autores

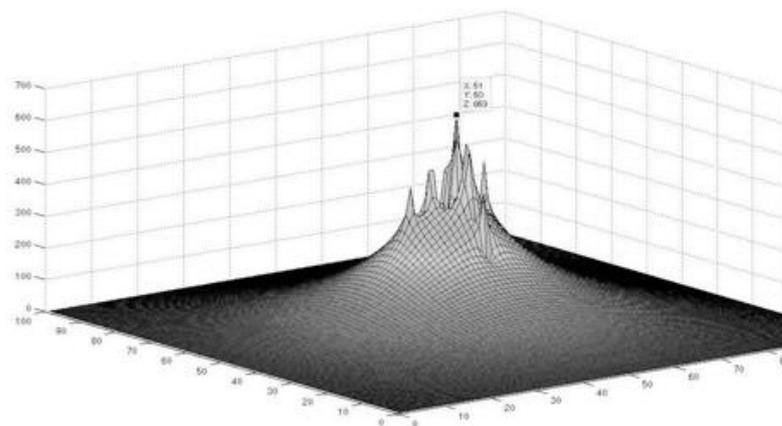
Figura 8 – Comportamento da tensão observado no
osciloscópio com as hastes distantes.



Fonte: Elaborada pelos autores

Os valores de tensão por milissegundos foram exportados do osciloscópio e utilizados para calcular os potenciais de superfície em um programa do *Matlab* utilizando o método das Diferenças Finitas. A Figura 9 ilustra a avaliação dos potenciais de superfície através do programa de Diferenças Finitas do *Matlab*.

Figura 9 – Avaliação dos potenciais de superfície através do método das diferenças finitas no *Matlab*.



Fonte: Elaborada pelos autores

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da avaliação das linhas equipotenciais geradas no solo, é possível observar a indicação de áreas seguras e as áreas que estão em risco para o tráfego de pessoas e animais, podendo evitar acidentes que muitas vezes são fatais, em áreas que foram atingidas por descargas atmosféricas ou que houve fuga de tensões em equipamentos de subestações de energia elétrica.

REFERÊNCIAS

BELTANI, J. Munhoz. **Medição de malha de terra em subestações energizadas**. 2007. 81 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2007. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/87268>>.

FILHO, J. M. **Manual de Equipamentos Elétricos**. Grupo Gen-LTC, 2000.

FRONTIN, S. de O. EQUIPAMENTOS DE ALTA TENSÃO Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas. 1 ed.. ed. Brasília: Goya Editora LTDA, 2013.

GERI, A., **Behavior of grounding systems excited by high impulse currents: the model and its validation**. IEEE Trans. On Power Delivery, vol. 14, no. 13, pp. 1008-1017, July 1999.

GRCEV, L., DAWALIBI, F., **An electromagnetic model for transients on grounding system**. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, pp. 1773-1781, 1993.

GUO, J., ZUO, J., ZHANG, B. GUAN, Z. C., **An Interpolation Model to accelerate the Frequency-Domain Response Calculation of Grounding Systems Using the Method of Moments**. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 21, nº 1, 2006.

JUNIOR, S.; SAVERIO, J. **Sistema de aterramento com cabo contrapeso representado por linhas de transmissão implementado em Matlab com circuitos em cascatas de pí**. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2012.

LIMA, A. B. et al. **Modelo para malhas de aterramento de torres de linhas de transmissão submetidas a descargas atmosféricas**. IEEE Power and Energy Society-T &D 2010 Latin America, 2010.

KINDERMANN, G., CAMPAGNOLO, J.M., **Aterramento Elétrico**. Terceira Edição, 1995.
MESA, H. R. M. et al. Estudo do comportamento das tensões transitórias em malhas de aterramento diante descargas atmosféricas. Campinas, SP, 2005.

NEKHOUL, B., LABIE, P., ZGAINSKI, F. X., MEUNIR, G., **Calculating the impedance of a grounding systems**. IEEE Trans. Magnetics, vol. 33, no. 3, pp.1509-1512, 1996.

NOGUEIRA, R. **Análise de sistemas de aterramentos sob solicitações impulsivas: otimização e critérios de segurança em aterramentos de estruturas de linhas de transmissão**. Dissertação de Mestrado., Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), 2006.

NR-10 Norma Regulamentadora, **Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade**. Portaria n.º 598, de 07/12/2004.

RIBEIRO, F. S. et al. **O método dos elementos finitos na análise do aterramento do sistema monofilar com retorno por terra**. In: SCIELO BRASIL. Proceedings of the 3. Encontro de Energia no Meio Rural. [S.l.], 2000.

SAKIS MELIOPOULOS, A. P., XIA, F., JOY, E. B., COKKINIDES, G. J., **An Advanced Computer Model for Grounding System Analysis**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, nº1, 1993.

S., JUNIOR; SAVERIO, J. **Sistema de aterramento com cabo contrapeso representado por linhas de transmissão implementado em Matlab com circuitos em cascatas de pí.** Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2012.

TANABE, K., **Novel method for analyzing the transient behavior of grounding systems based on the finite difference time-domain method.** CRIEPI Report, Tokyo, 2001.

TELLÓ, M. **Aterramento elétrico: impulsivo em baixa e alta frequências-Com apresentação de casos.** [S.l.]: Edipucrs, 2007.

TUMA, E. T. **Proposta de um novo modelo para análise dos comportamentos transitório e estacionário de sistemas de aterramento, usando-se o método fdtd.** Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Elétrica, 2005.

VISACRO, S. (2007). **A Comprehensive Approach to the Grounding Response to Lightning Currents.** IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, nº1, pp. 381-386.

EVALUATION OF POTENTIAL SURFACES CAUSED BY A VOLTAGE IMPULSE IN A MESH GROUND

Abstract: *In recent years, the electric utilities are more concerned with the quality of energy delivered to consumers. Thus, there is a reflection that the reputation of the companies becomes an indispensable and invaluable good. Within this context, the grounding systems have a fundamental role, especially when taking into account the safety of people and equipment related to distribution lines and electricity transmission. Surface potential of the studies conducted by measurement is the key point to more realistic analysis of the behavior of grounding loops. Thus, the effectiveness of the grounding grid and behavior of the soil in front of the propagating chain is what prevails in the reduction of surface potential. Therefore, this paper presents studies based on simulations of grounding meshes and an algorithm using the Finite Difference Method made in Matlab, which performs an evaluation of the behavior of potential surface when triggered by a voltage pulse on the ground, for the areas of lower risk to operators substations.*

Key-words: *Surface Potential. Voltage Impulse. Electric Current. Mesh Ground.*