



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GCQ 11
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

**GRUPO XIII
GRUPO DE ESTUDO DE INTERFERÊNCIAS, COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA E
QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA - GCQ**

**METODOLOGIA PARA A SIMULAÇÃO DA MÁXIMA PROTEÇÃO PROVIDA
POR SISTEMAS DE ATERRAMENTO PARA FENÔMENOS RÁPIDOS**

Marcelo Guimarães Rodrigues (*)
CEPEL – Centro de Pesquisas em Energia Elétrica

Carlos Portela
UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

RESUMO

Este trabalho desenvolve uma metodologia simplificada para obter uma importante informação para projetos de malha de terra para fenômenos rápidos: a máxima proteção para pessoas e equipamentos que pode ser provida por uma malha de terra, em função das características elétricas do solo e da condição de risco para pessoas e equipamentos consideradas.

PALAVRAS-CHAVE

Malha de terra, Modelagem, Fenômenos transitórios.

1.0 - INTRODUÇÃO

A malha de terra é um elemento de suma importância na rede elétrica. Em regiões com alto nível cerâmico e solo com alta resistividade elétrica, a influência de fenômenos rápidos, como descargas atmosféricas, para a segurança de pessoas e equipamentos, é muito desfavorável. Isto faz com que a malha de terra tenha um papel essencial.

Apesar disso, são encontrados nos projetos convencionais muito empirismo e carência de bases teóricas consistentes, resultando em projetos ineficazes para fenômenos rápidos, como no caso de proteção contra descargas atmosféricas, e algumas vezes até para fenômenos lentos, no caso de malhas de terra muito extensas.

Com o objetivo de corrigir o empirismo presente em projetos de malhas de terra, para fenômenos rápidos, desenvolveu-se, em (1,2), uma metodologia genérica para o aterramento elétrico, capaz de determinar o seu comportamento para os fenômenos transitórios a que o aterramento é submetido. Essa metodologia tem sido aplicada em diversos projetos concretos, incluindo algumas instalações bastante complexas.

Entretanto, a aplicação direta da metodologia (1,2), em instalações complexas, tem o óbice de alto custo computacional. A simulação de malhas de grande porte pode levar dias de processamento para fornecer tensões e correntes induzidas em alguns pontos para alguns pontos de incidência da descarga. Isso, somado à grande complexidade dos fenômenos de propagação, pode levar um projetista a precisar de muitas tentativas para chegar a uma malha próxima à ótima. Há, então, grande dificuldade no uso desta metodologia para se “otimizar” malhas de terra para fenômenos rápidos.

Uma informação que pode facilitar a “otimização” de uma malha de terra, para fenômenos rápidos, é a máxima proteção, para condições de risco para pessoas e equipamentos, que pode ser provida por uma malha, dependendo das características elétricas do solo e das condições de risco consideradas. Numa série de simulações, usando (1,2), para se “otimizar” o projeto de uma malha de terra, se determinada malha simulada fornecer proteção próxima da máxima, essa malha pode ser escolhida sem simulações adicionais. Caso contrário,

o projeto da malha deve ser modificado significativamente para as simulações seguintes. Em ambos os casos, o número de simulações, usando (1,2), e o tempo de processamento são reduzidos.

Este artigo apresenta uma metodologia simplificada para se calcular a máxima proteção que pode ser provida por uma malha de terra para pessoas e equipamentos, para fenômenos rápidos, dependendo das características elétricas do solo e das condições de risco consideradas.

2.0 - CONSIDERAÇÕES BÁSICAS

A máxima proteção provida por uma malha de terra está relacionada à máxima redução de tensões induzidas em fenômenos transitórios (como descargas atmosféricas). A máxima redução de tensões induzidas pode ser provida por uma malha com densidade de condutores extremamente alta. Neste artigo, modela-se aproximadamente o comportamento transitório de tal malha através da simulação do comportamento de uma chapa condutora, considerando que a malha se aproxima, num extremo, a uma chapa, quando a distância entre seus condutores é extremamente reduzida.

O item 3 descreve a metodologia adotada para simular o comportamento transitório de uma chapa condutora.

O item 4 mostra uma série de simulações do comportamento transitório de uma chapa condutora (através da metodologia apresentada no item 3) e de uma malha real (através de (1,2)), relacionada a diferentes condições de risco para pessoas e equipamentos e para solos com características elétricas diferentes.

Em qualquer projeto de engenharia, há eventualmente um compromisso entre custo econômico e desempenho técnico. No projeto de malhas de terra, dependendo das características elétricas do solo e dos tipos de tensões induzidas, o aumento da densidade de condutores da malha e de suas dimensões pode implicar redução significativa ou desprezível das tensões induzidas e, conseqüentemente, das condições de risco para pessoas e equipamentos. Através da metodologia apresentada no item 3, pode-se avaliar se, para um determinado projeto de malha, o aumento de sua densidade de condutores e dimensão (e, portanto, seu custo econômico) é relevante ou não.

3.0 - METODOLOGIA PARA SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO TRANSITÓRIO DE UMA CHAPA CONDUTORA

A metodologia adotada para simular o comportamento transitório de uma chapa condutora imersa no solo é a mesma usada em (1,2), mas substituindo a malha pela chapa. Esta metodologia consiste no cálculo das tensões induzidas devido à incidência de uma corrente arbitrária, em função do tempo, na chapa. Aplica-se a Transformada de Fourier, seguindo-se os passos abaixo para cada componente espectral, relacionada a uma freqüência, da corrente injetada.

Item 3.1- As características elétricas do solo são modeladas em função da freqüência.

Item 3.2 - A chapa é dividida em partes, sendo homogênea a distribuição de correntes longitudinais, ao longo da chapa, e transversais, inseridas da chapa para o solo.

Item 3.3 - A interação eletromagnética entre estas partes é considerada através das impedâncias mútuas e próprias associadas às partes.

Item 3.4 - Diferentes regiões do solo com características elétricas diferentes são representadas por camadas de solo separadas por superfícies simples, usando-se séries de fontes-imagens associadas a coeficientes de reflexão e refração para representar em cada região os efeitos eletromagnéticos das outras.

Item 3.5 - A distribuição de correntes na chapa é calculada, aplicando-se as impedâncias mútuas e próprias às equações que relacionam as correntes e as tensões na chapa.

Item 3.6 - Integrando-se as equações representativas dos campos eletromagnéticos induzidos por fontes infinitesimais, calculam-se tais equações para as correntes induzidas na chapa. Assim, pode-se calcular as tensões induzidas, por estas correntes, em qualquer ponto da chapa ou do meio envolvente.

3.1 Comportamento eletromagnético do solo

Um aspecto essencial do estudo e simulação de malhas de terra é a adequada modelagem do solo.

Exceto em caso de campos elétricos muito intensos, que originam ionização significativa do solo, o comportamento eletromagnético do solo é essencialmente linear, mas com condutividade, σ , e permitividade elétricas, ϵ , fortemente dependentes da freqüência. Na maioria dos solos, a permeabilidade magnética pode ser considerada igual à permeabilidade magnética do vácuo e independente da freqüência.

Como desenvolvido em (3), as características do solo podem ser modeladas, em função da freqüência, através da imitância:

$$W = \sigma + i\omega\epsilon = \sigma_0 + \Delta W = \sigma_0 + \Delta\sigma(\omega) + i\omega\epsilon(\omega) = \sigma_0 + \Delta_i \left[\cot \text{ang} \left(\frac{\pi}{2} \alpha \right) + i \right] \left(\frac{f}{1\text{MHz}} \right)^\alpha \quad [1]$$

sendo $i = \sqrt{-1}$, $\omega = 2\pi f$, σ a condutividade elétrica, ϵ a permissividade elétrica, os parâmetros σ , Δ_i e α estatisticamente independentes, σ_0 a condutividade elétrica a baixa frequência e ΔW o aumento de W entre baixa e alta frequência.

Em (3), foram modeladas 68 amostras de solo com diferentes características elétricas, associadas a tipos de solo muito diferentes, estabelecendo-se os parâmetros elétricos como:

- σ_0 parcela da condutividade elétrica para a frequência 100 Hz;
- Δ_i aumento de $\omega\epsilon$ entre as frequências 100 Hz e 1 MHz;
- α parâmetro da parcela dependente da frequência de $\sigma + i\omega\epsilon$.

Estes parâmetros podem ser obtidos através da medição das características elétricas do solo, em função da frequência, baseada na metodologia desenvolvida em (3).

3.2 Segmentação da chapa condutora

Para uma dada malha de terra M , com determinadas dimensões, e para certa injeção de corrente, a redução das tensões induzidas pode ser alcançada aumentando-se a densidade de condutores da malha. Para calcular a máxima redução provida por uma malha, esta é substituída, nas simulações, por uma chapa condutora definida pelas seguintes características:

- Com espessura igual ao diâmetro dos condutores da malha M .
- Imersa no mesmo solo que a malha M e à mesma profundidade.
- Com área igual à área da malha M .
- Feita de mesmo material que os condutores da malha M .
- Segmentada em chapas com forma de círculo e setores de círculo, centrados no ponto de injeção de corrente.

A Figura 1 mostra um exemplo de segmentação da chapa condutora usada para substituir uma malha de terra real, considerando a injeção de corrente no centro da malha.

3.3 Cálculo de impedâncias própria e mútua da chapa condutora

Este item mostra o cálculo das impedâncias próprias e mútuas das partes em que a chapa condutora é dividida, isto é, chapas em forma de círculo e setores de círculo.

Sejam:

- duas chapas condutoras em forma de setores de círculo s_i e s_j , imersas em um meio linear, homogêneo, isotrópico e infinito em todas as direções;
- esp_i e esp_j as espessuras das chapas s_i e s_j , respectivamente;
- num sistema de coordenadas polar $\{r, \phi, z\}$, s_i está localizada dentro dos limites $\{de\ r_{i1}\ a\ r_{i2},\ de\ \phi_{i1}\ a\ \phi_{i2},\ de\ (z_i - esp_i/2)\ a\ (z_i + esp_i/2)\}$ e s_j , localizada dentro dos limites $\{de\ r_{j1}\ a\ r_{j2},\ de\ \phi_{j1}\ a\ \phi_{j2},\ de\ (z_j - esp_j/2)\ a\ (z_j + esp_j/2)\}$;
- r_0 a distância entre um ponto interno (com cotas $r = r_i$, $\phi = \phi_i$, $z = z_i$) e um ponto na superfície da chapa s_i (com cotas $r = r_{sup}$, $\phi = \phi_{sup}$, $z = (z_i + esp_i/2)$);
- r a distância entre um ponto da chapa s_i (com cotas $r = r_i$, $\phi = \phi_i$, $z = z_i$) e um ponto da chapa s_j (com cotas $r = r_j$, $\phi = \phi_j$, $z = (z_j + esp_j/2)$);
- $k = \sqrt{\mu\epsilon\omega^2 \pm \mu\sigma i\omega}$ a constante de propagação, sendo μ , ϵ e σ a permeabilidade magnética, a permissividade elétrica e a condutividade elétrica do meio envolvente;
- μ_i , ϵ_i e σ_i a permeabilidade magnética, a permissividade elétrica e a condutividade elétrica da chapa s_i ;
- $\omega = 2\pi f$ a pulsação das grandezas eletromagnéticas envolvidas;
- I_{r_i} a corrente radial ao longo da chapa s_i e I_{t_i} a corrente transversal injetada da chapa s_i para o meio envolvente, sendo estas correntes distribuídas homoganeamente ao longo das chapas.

A componente do campo elétrico, produzido pelo elemento infinitesimal de corrente radial $I_{r_i} d\phi_i dr_i$ localizado ao longo de um segmento de reta infinitesimal dr_i (at $\phi = \phi_i$) da chapa s_i , com a direção deste segmento, em um ponto a distância \dot{r} (na cota $\phi = \phi$) deste, é:

$$\frac{I_{r_i}}{(\phi_{i2} - \phi_{i1})} \frac{i\omega\mu}{4\pi} \frac{e^{-ik\dot{r}}}{\dot{r}} \text{Cos}(\phi_i - \phi) d\phi_i dr_i \quad [2]$$

O potencial escalar (de Lorentz), produzido por um elemento infinitesimal de corrente transversal da chapa condutora s_i , em um ponto distante \hat{r} deste elemento, é:

$$\frac{It_i}{\text{Area}_i} \frac{1}{4\pi(\sigma + i\omega\epsilon)} \frac{e^{ik\hat{r}}}{\hat{r}} r_i dr_i d\varphi_i \quad [3]$$

Através da integração de [2] e [3], são calculadas as seguintes impedâncias:

- $z_{t_{ij}}$: impedância transversal mútua [4] entre as chapas condutoras s_i e s_j , referente à tensão induzida na superfície da chapa s_j pela corrente transversal It_i .
- $z_{t_{ii}}$: impedância transversal própria [5] da chapa condutora s_i , referente à tensão induzida em sua superfície pela corrente transversal It_i .
- $z_{r_{ij}}$: impedância radial mútua [6] entre as chapas condutoras s_i e s_j , referente à tensão induzida ao longo da superfície da chapa s_j pela corrente radial Ir_i .
- $z_{r_{ii}}$: impedância radial própria [7] da chapa condutora s_i , referente à tensão induzida em sua superfície pela corrente radial Ir_i . $z_{r_{ii}}$ é calculada, considerando sua separação em duas partes: $z_{r_{ext}_i}$ [8], associada ao campo eletromagnético exterior à chapa, e $z_{r_{int}_i}$ [9], associada ao campo eletromagnético interior à chapa.

No cálculo de $z_{t_{ij}}$, $z_{t_{ii}}$, $z_{r_{ij}}$ e $z_{r_{ext}_i}$, considera-se que It_i e Ir_i estão concentrados na coordenada vertical $z = z_i$, ao longo da chapa s_i . Para o cálculo de $z_{r_{int}_i}$, considera-se a distribuição correta de Ir_i interior à chapa s_i .

$$z_{t_{ij}} = \frac{1}{\text{Area}_i \text{Area}_j} \cdot \int_{\varphi_{j1}}^{\varphi_{j2}} \int_{r_{j2}}^{\varphi_{j2}} \int_{\varphi_{i1}}^{\varphi_{i2}} \int_{r_{i1}}^{\varphi_{i2}} \frac{1}{4\pi(\sigma + i\omega\epsilon)} \frac{e^{ikr}}{r} r_i r_j dr_i d\varphi_i dr_j d\varphi_j \quad [4]$$

$$z_{t_{ii}} = \frac{1}{\text{Area}_i^2} \cdot \int_{\varphi_{i1}}^{\varphi_{i2}} \int_{r_{i2}}^{\varphi_{i2}} \int_{\varphi_{i1}}^{\varphi_{i2}} \int_{r_{i1}}^{\varphi_{i2}} \frac{1}{4\pi(\sigma + i\omega\epsilon)} \frac{e^{ikr_0}}{r_0} r_i r_{sup} dr_i d\varphi_i dr_{sup} d\varphi_{sup} \quad [5]$$

$$z_{r_{ij}} = \frac{1}{(\varphi_{i2} - \varphi_{i1})(\varphi_{j2} - \varphi_{j1})} \cdot \int_{\varphi_{j1}}^{\varphi_{j2}} \int_{r_{j2}}^{\varphi_{j2}} \int_{\varphi_{i1}}^{\varphi_{i2}} \int_{r_{i1}}^{\varphi_{i2}} \frac{i\omega\mu}{4\pi} \frac{e^{ikr}}{r} \text{Cos}(\varphi_i - \varphi_j) dr_i d\varphi_i dr_j d\varphi_j \quad [6]$$

$$z_{r_{ii}} = z_{r_{ext}_i} + z_{r_{int}_i} \quad [7]$$

sendo:

$$z_{r_{ext}_i} = \frac{1}{(\varphi_{i2} - \varphi_{i1})^2} \cdot \int_{\varphi_{i1}}^{\varphi_{i2}} \int_{r_{i1}}^{\varphi_{i2}} \int_{\varphi_{i1}}^{\varphi_{i2}} \int_{r_{i1}}^{\varphi_{i2}} \frac{i\omega\mu}{4\pi} \frac{e^{ikr_0}}{r_0} \text{Cos}(\varphi_i - \varphi_{sup}) dr_i d\varphi_i dr_{sup} d\varphi_{sup} \quad [8]$$

$$z_{r_{int}_i} = - \frac{(1 + e^{\text{esp}\sqrt{i\omega\mu_i\sigma_i}}) \sqrt{i\omega\mu_i\sigma_i}}{(-1 + e^{\text{esp}\sqrt{i\omega\mu_i\sigma_i}}) \sigma_i (\varphi_{i2} - \varphi_{i1})} \ln\left(\frac{r_{i1}}{r_{i2}}\right) \quad [9]$$

onde A_i e A_j são as áreas das chapas s_i e s_j .

3.4 Condições de contorno dos campos eletromagnéticos

No caso de uma malha de terra, assim como da chapa, o meio envolvente não é o mesmo em todas as direções, havendo, no mínimo, duas regiões com características elétricas distintas: o solo e o ar. Os campos eletromagnéticos nestas regiões devem ser compatibilizados na superfície que as separa, com a continuidade das componentes tangenciais dos campos elétrico e magnético na superfície e outros condicionamentos específicos de diversas parcelas do campo eletromagnético. O efeito de uma região sobre outra pode ser artificialmente representado por fontes-imagem associadas a coeficientes de reflexão e refração e condicionamentos específicos de diversos tipos, que representem as reflexões e refrações dos campos nesta superfície.

3.5 Equações de ligação entre as condições impostas na chapa condutora e as tensões e correntes induzidas

Sejam:

- n eletrodos em série, como na Figura 2;
- $ir_{ni\ e_i}$ a corrente longitudinal de um nó n_i para um eletrodo e_i ;
- $ir_{e_i\ n_{i+1}}$ a corrente longitudinal de um eletrodo e_i para um nó n_{i+1} ;
- ir_{e_i} a corrente longitudinal média em um eletrodo e_i ;
- it_{e_i} a corrente transversal injetada de um eletrodo e_i para o meio envolvente;
- $i_{inj\ n_i}$ a corrente injetada num nó n_i ;
- U_{n_i} a tensão transversal num nó n_i ;
- $z_{t_{ij}}$ e $z_{r_{ij}}$ as impedâncias transversal e longitudinal mútuas entre dois eletrodos e_i e e_j ;

- z_{ti} e z_{ri} as impedâncias transversal e longitudinal próprias de um eletrodo e_i ;
e as seguintes equações de ligação para se calcular as tensões transversais nos nós e a distribuição de correntes longitudinal e transversal nos eletrodos.

Equações de ligação:

$$U_{n,j+1} - U_{n,j} = \sum_{i=1}^{i=n} z_{r_{ij}} \frac{(i_{r_{ni e_i}} + i_{r_{ei ni+1}})}{2} = \sum_{i=1}^{i=n} z_{r_{ij}} i_{r_{ei}} \quad [10]$$

$$\frac{U_{n,j+1} + U_{n,j}}{2} = \sum_{i=1}^{i=n} z_{t_{ij}} (i_{r_{ni e_i}} - i_{r_{ei ni+1}}) = \sum_{i=1}^{i=n} z_{t_{ij}} i_{t_{ei}} \quad [11]$$

$$i_{r_{ni e_i}} - i_{r_{ei-1 ni}} = i_{inj ni} \quad [12]$$

Para a aplicação destas equações na simulação do comportamento transitório da chapa condutora devido a uma injeção de corrente, considera-se que:

- os eletrodos sejam chapas condutoras em forma de círculo e setores de círculo;
- os nós sejam circunferências (e arcos de circunferência) entre duas chapas consecutivas;
- as correntes longitudinais sejam substituídas pelas correntes radiais;
- as impedâncias longitudinais e transversais dos eletrodos sejam substituídas pelas impedâncias radiais e transversais das chapas;
- a corrente seja injetada no nó n1.

3.6 Cálculo de tensões induzidas pelas correntes da chapa condutora

Uma vez calculados, no item 3.5, os valores das correntes radiais e transversais da chapa condutora, podemos calcular as tensões induzidas por estas correntes.

Integrando-se as equações representativas [2] e [3] de campos eletromagnéticos induzidos por fontes de correntes infinitesimais, calculam-se tais equações para as correntes induzidas nas chapas condutoras. E então, calculam-se as tensões induzidas, associadas a qualquer ponto da chapa, no solo e no ar, e a um percurso definido de circulação do campo elétrico, entre “esse ponto” e um ponto de referência.

3.7 Pontos que afetam os resultados das simulações

Na modelagem do comportamento transitório de uma chapa condutora, três pontos que influenciam os resultados devem ser considerados:

- *Segmentação da chapa.* As correntes e tensões na chapa variam continuamente com a distância do ponto de injeção de corrente e não como considerado na modelagem, onde tais grandezas elétricas estão homogeneamente distribuídas em cada parte em que a chapa foi dividida. Os erros relacionados com esta simplificação podem ser diminuídos aumentando-se a segmentação. Entretanto, o aumento da segmentação deve ser um compromisso entre diminuição dos erros da modelagem e aumento do tempo de processamento. Tal compromisso pode ser resolvido, aumentando-se a segmentação próximo ao ponto de injeção de corrente, onde a atenuação é maior, e diminuindo-a longe deste ponto, mantendo o número de partes em que a chapa foi dividida e, assim, o tempo de processamento.

- *Componentes espectrais calculadas para aplicação na Transformação de Fourier.* Um fator responsável pela confiabilidade dos resultados obtidos pela modelagem é a escolha apropriada das componentes espectrais para aplicação na Transformação de Fourier. Com objetivo de se reduzir o tempo de processamento, as componentes espectrais de correntes e tensões são calculadas para algumas frequências e os valores das outras componentes são interpoladas através de uma função analítica de variável complexa (1,2). Em alguns casos, o número de componentes não é o suficiente e algumas componentes espectrais adicionais são necessárias. O modo mais prático para se escolher estas componentes adicionais é uma inspeção visual do espectro de frequência das tensões calculadas, para localizar a faixa de frequência onde a interpolação não está satisfatória.

- *Uniformidade das correntes em cada parte em que a chapa foi dividida.* Nesta metodologia, considera-se uma distribuição uniforme de correntes em cada parte em que a chapa foi dividida, em função do ângulo com o eixo horizontal, o que não ocorre de fato numa malha de terra real. Haveria esta uniformidade no caso de uma injeção de corrente em uma malha de terra infinita em todas as direções. Numa malha real, os campos eletromagnéticos refletem-se em suas bordas e isto resulta em as correntes a determinada distância do ponto de injeção serem diferentes em função do ângulo. Quanto mais próximo das bordas da malha o ponto de injeção de corrente está localizado, maiores são as reflexões e, conseqüentemente, maiores são os erros devido à distribuição uniforme de correntes considerada na modelagem. Esta fonte de erros é inerente à metodologia.

4.0 - SIMULAÇÕES

Este item apresenta uma série de simulações do comportamento transitório da malha de terra e da chapa condutora, apresentadas no item 4.1, para vários solos com características elétricas diferentes, apresentadas no item 4.2. O comportamento transitório da malha é simulada através de (1,2) e o comportamento da chapa, através da metodologia do item 3. O item 4.3 descreve as tensões simuladas induzidas pela corrente, mostrada no item 4.4, injetada no ponto P1 da malha/chapa (veja a Figura 1). O item 4.5 apresenta os resultados das simulações e o item 4.6, a análise dos resultados.

4.1 Malha de terra e chapa condutora simuladas

Para as simulações, escolheu-se uma malha de terra com dimensões 80 x 80 m, com distância de 8 m entre seus condutores, a uma profundidade de 0,5 m (veja a Figura 1 - (a)). A segmentação da chapa condutora, para uma injeção de corrente em seu centro, é mostrada na Figura 1 - (b).

4.2 Características elétricas do solo

As simulações englobaram 120 solos com características elétricas diferentes, modelados através da equação [1], variando-se os valores para os parâmetros σ_0 (0,05 , 0,2 , 0,6 , 1,2 , 1,6 , 3 , 8 , 16 mS/m), Δ_i (3 , 6 , 9 , 12 , 16 mS/m), α (0,4 , 0,7 , 0,92), sendo estes parâmetros definidos no item 3.1.

4.3 Tensões induzidas simuladas

As seguintes tensões induzidas, associadas ao risco a pessoas e equipamentos, foram simuladas:

- Tensões transversais (medidas ao longo de um percurso ortogonal ao “plano” da malha e à superfície do solo) entre um ponto da malha e um ponto muito distante (relacionada com a condição a que um equipamento aterrado na malha e ligado a um circuito externo está submetido).
- Diferença de tensões transversais em dois pontos da malha (sendo a tensão transversal em cada ponto medida como indicado em a)), distantes 8 m um do outro (relacionadas à condição a que um equipamento ou cabo ligado a dois pontos da malha está submetido).
- Tensões transversais (medidas ao longo de um percurso ortogonal ao “plano” da malha e à superfície do solo), entre um ponto no solo e um ponto muito distante (relacionadas à condição a que uma pessoa em contato com um circuito externo está submetido, como por exemplo, uma pessoa em contato com a linha telefônica).
- Diferença de tensões transversais em dois pontos do solo (sendo a tensão transversal em cada ponto medida como indicado em c)), distantes 4 m um do outro (relacionada, por exemplo, à tensão de toque à qual uma pessoa pode estar submetida quando em contato com um equipamento aterrado à malha).
- Tensões longitudinais induzidas ao longo de segmentos de reta de 4 m de comprimento, no solo (relacionadas às tensões induzidas em cabos de controle sobre a malha).

4.4 Características do impulso de corrente aplicado

As tensões simuladas são induzidas pelo impulso de corrente, representativo de descargas atmosféricas, mostrado na Figura 3, levando-se em conta os tempos de frente de onda medidos por Berger (4) para primeiros impulsos de descargas atmosféricas negativas.

4.5 Resultados

A Figura 4 mostra as amplitudes de tensões induzidas devido à injeção de corrente, mostrada na Figura 3, no centro da chapa condutora (curvas C2) e no centro da malha (curvas C1), em função do parâmetro elétrico do solo σ_0 (0,05 , 0,2 , 0,6 , 1,2, 1,6 , 3 , 8 e 16 mS/m). As ordenadas referem-se aos valores médios absolutos das amplitudes de tensões induzidas para diferentes valores de distância do ponto de injeção de corrente e do parâmetro elétrico Δ_i (3 , 6 , 9 , 12 , 16 mS/m). As Figuras 4 (a,b), (c,d), (e,f), (g,h) e (i,j) referem-se, respectivamente às tensões induzidas descritas em (a), (b), (c), (d) e (e) do item 4.3. As Figuras 4 (a,c,e,g,i) são relacionadas ao parâmetro elétrico $\alpha = 0,4$ e as Figuras 4 (b,d,f,h,j), a $\alpha = 0,92$.

4.6 Análise dos resultados

O aumento do adensamento de condutores da malha de terra implica a diminuição das impedâncias transversais e longitudinais e, conseqüentemente, a diminuição das tensões induzidas. Assim, as amplitudes das tensões induzidas na chapa são inferiores às das tensões induzidas na malha.

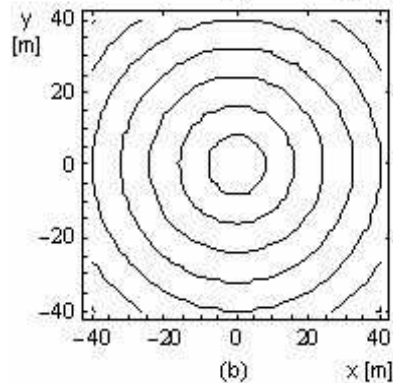
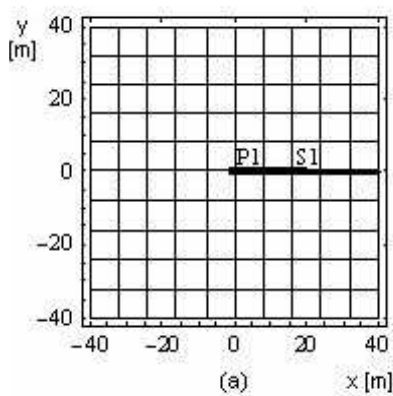


FIGURA 1 - (a) Malha de terra real e (b) chapa condutora para uma injeção de corrente no centro da malha de terra, no ponto P1.

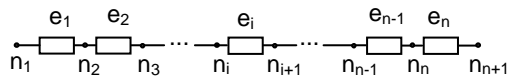


FIGURA 2 – Eletrodos em série.

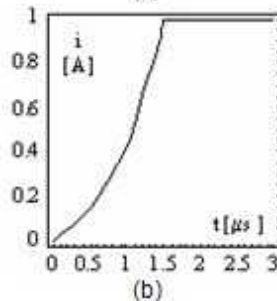
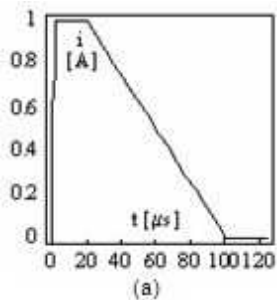


FIGURA 3 – (a) Forma do impulso de corrente injetado na malha de terra/chapa condutora para as simulações do comportamento transitório. (b) Detalhe da frente de onda.

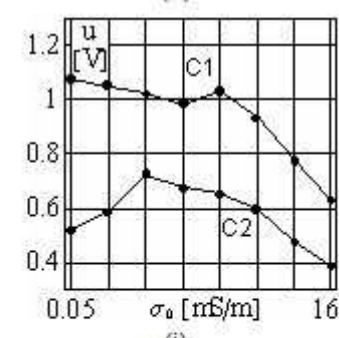
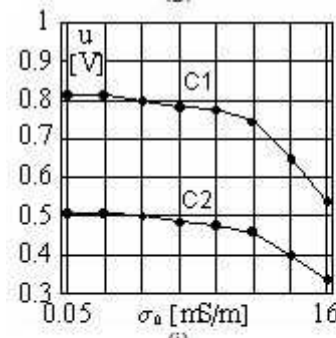
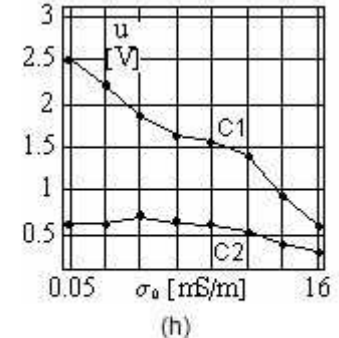
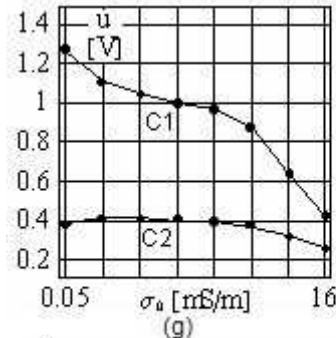
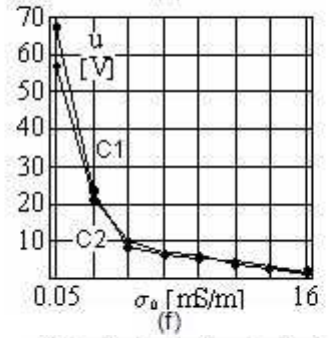
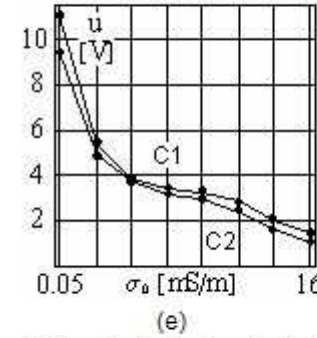
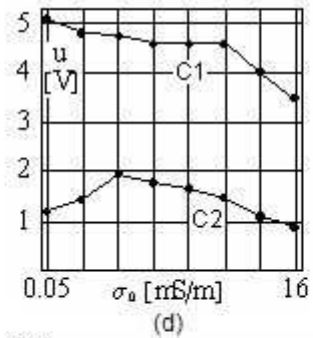
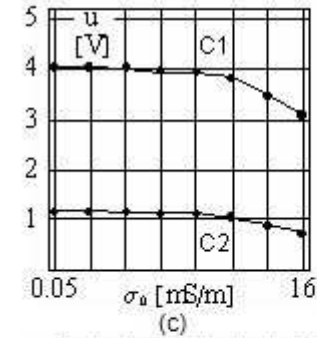
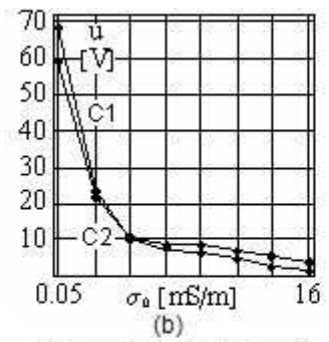
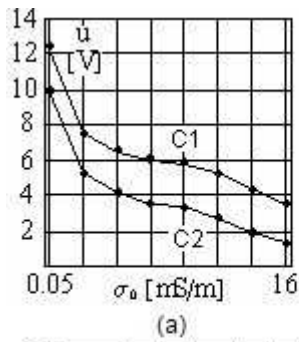


FIGURA 4 – Amplitudes de tensões induzidas, descritas no item 4.5.

A redução das amplitudes de tensão é maior para tensões induzidas em relação a um ponto muito distante (descritas em a) e c) do item 4.3) do que para tensões induzidas dentro da área da malha (descritas em b), d) e e) do item 4.3). Tensões induzidas em relação a um ponto muito distante estão relacionadas à integração de campos eletromagnéticos em um longo caminho no solo, assim estas tensões sofrem mais influência das características elétricas do solo que da topologia da malha. Para tensões induzidas dentro da área da malha (diferenças de tensões transversais em dois pontos no solo ou na malha), embora a tensão em cada ponto esteja relacionada à integração do campo elétrico em um longo caminho no solo, na maior parte deste caminho de integração, o campo elétrico relacionado à tensão num ponto é praticamente igual ao campo relacionado à tensão no outro ponto. No cálculo das diferenças de tensões transversais, os campos elétricos na maior parte destes caminhos são anulados. Assim, tensões induzidas dentro da área da malha são mais afetadas por campos eletromagnéticos em um curto caminho no solo e, assim, mais influenciadas pela topologia da malha.

Em resumo, a escolha da densidade de condutores num projeto de malha de terra tem como objetivo principal os efeitos das tensões induzidas dentro da área da malha (descritas em b), d) e e) do item 4.3).

5.0 - CONCLUSÕES

Este artigo desenvolveu uma metodologia para se calcular uma informação importante para projeto de malhas de terra: a máxima proteção que uma malha pode prover para pessoas e equipamentos, para fenômenos transitórios.

Em um projeto de malha de terra, simulações sucessivas são executadas, variando-se a topologia da malha em cada simulação, com o objetivo de alcançar uma malha próxima da ótima. Sabendo-se a proteção limite que uma malha pode prover, o projetista pode saber se a malha simulada está próxima da ótima, pode diminuir o número de simulações sucessivas e economizar tempo de processamento.

A topologia da malha de terra influencia principalmente os fenômenos relacionados às tensões induzidas dentro da área da malha. Para tensões induzidas em relação a um ponto muito distante, entretanto, o aumento da densidade de condutores da malha é irrelevante, visto que tais tensões são mais afetadas pelas características elétricas do solo.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) PORTELA, C., "Frequency and Transient Behavior of Grounding Systems - I Physical and Methodological Aspects", Proceedings of the 1997 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, IEEE Institute of Electrical and Electronic Engineers - EMC Society, 6 p. , Texas, Estados Unidos, 1997.
- (2) PORTELA, C., "Frequency and Transient Behavior of Grounding Systems - II Practical Application Examples", Proceedings of the 1997 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, IEEE Institute of Electrical and Electronic Engineers - EMC Society, 6 p. , Texas, Estados Unidos, 1997.
- (3) PORTELA, C., "Measurement and Modeling of Soil Electromagnetic Behavior", Proceedings of the IEEE 1999 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, IEEE Institute of Electrical and Electronic Engineers - EMC Society, 6 p., Seattle, Estados Unidos, 1999.
- (4) BERGER, K., ANDERSON, R., "Parameters of Lightning Flashes", Electra, nº 41, p. 23-37, 1975.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Marcelo Guimarães Rodrigues

Nascido em São Gonçalo, RJ em 25 de Março de 1972.

Doutorado (2004), Mestrado (1997) em Engenharia Elétrica na Universidade Federal do Rio de Janeiro e Graduação (1994) em Engenharia Elétrica na Universidade Federal Fluminense

Empresa: CEPTEL – Centro de Pesquisas em Energia Elétrica, desde 2002

Pesquisador com atividades no Laboratório de Alta e Média Potência.

Carlos Manuel de Jesus Cruz de Medeiros Portela

Nascido em 1935, em Angola – Portugal, Engenheiro Eletrotécnico (1958) e Doutor em Engenharia (1963) pelo Instituto Superior Técnico (IST) da Universidade Técnica de Lisboa (UTL). Professor Catedrático do IST-UTL. Professor Titular da COPPE-UFRRJ.