

# ATERRAMENTO FUNCIONAL PARA EQUIPAMENTOS SENSÍVEIS UTILIZANDO TLM

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

Escola de Engenharia Elétrica e de Computação

ANTÔNIO MELO DE OLIVEIRA, CARLOS RENATO B. DOS SANTOS, LUIS FERNANDO DA CRUZ,  
CAROLINE LEVI GUEDES<sup>1</sup>

## 1. INTRODUÇÃO

Com o advento dos equipamentos eletrônicos sensíveis a interferências eletromagnéticas houve novas evoluções dos sistemas de aterramento. Inicialmente, utilizava-se para a proteção desses equipamentos o sistema de aterramento contra choques, logo se percebeu a dificuldade de se utilizar esta mesma malha para aterrar equipamentos sensíveis, principalmente os voltados para tecnologia da informação (TI). O que acontecia era que, em regime permanente, as malhas de potência eram inadequadas para aparelhos sensíveis, uma vez que elas eram percorridas por correntes de várias origens, denominadas espúrias (provocadas por correntes de origem galvânica, de circulação de neutro, induções eletromagnéticas, etc); além disso, em regime transitório, essas malhas eram percorridas por correntes de curtos-circuitos e descargas atmosféricas PROCOPRE (2004). Estes eventos elétricos incluem energia (surtos e transientes) das companhias de eletricidade, telefone, comunicações diversas, rádio e outras formas de dados. Diante desse problema, houve a necessidade de uma nova filosofia de aterramento, desenvolvendo-se então o sistema de aterramento isolado.

O presente trabalho é continuação dos projetos desenvolvidos por MENDONÇA (2005) e SANTOS (2005) sendo os resultados avaliados são apresentados em CRUZ (2005, p. 1-3) apresentado no VII International Symposium on Lightning Protection.

Em MENDONÇA (2005) foi desenvolvido um algoritmo aplicando TLM que constrói uma malha de aterramento funcional quadrada. Este algoritmo utiliza linguagem orientada a objeto, facilitando a construção computacional do objeto analisado. Os resultados desse modelo são apresentados em CRUZ (2005). Foi realizado por SANTOS (2005) medições experimentais da impedância dos nós da malha construída, posteriormente comparou com os valores obtidos computacionalmente. Os resultados obtidos estão em SANTOS (2006). Em ambos os trabalhos foram avaliados uma malha de terra isolada quadrada para equipamentos de TI em ambientes comerciais, onde foram feitas simulações de um pulso de corrente, que variavam as intensidades representando uma descarga atmosférica. Em seguida foi montada uma malha de aplicação prática para comparar os valores teóricos com os práticos, cujos resultados foram satisfatórios.

O estudo apresentado procura evoluir ao analisar uma malha enterrada no solo. O método utilizado é o TLM (Transmission Line Modeling Method) com o propósito de avaliar o desempenho da malha de aterramento que tenha a característica de funcional. Dentro do processo de evolução da aplicação de TLM para malha de aterramento funcional surgiu a necessidade de construir malhas de aterramento que sejam capazes de manter a equipotencialidade para baixas e altas frequências. As altas frequências são resultado da utilização desses equipamentos de TI (Tecnologia da Informação) que buscam o monitoramento on-line de equipamentos de diversas aplicações e comunicação à distância para gerenciamento; esses exemplos geram dados que são obtidos dentro de sistemas de monitoramento com Intranet, Internet ou Redes Locais (LAN); ou qualquer sistema complexo de computadores ou equipamentos de TI. Estes sistemas visam a automação dos processos de forma a reduzir custos.

Este artigo apresenta simulações analisando a malha de aterramento funcional enterrada no solo. São utilizados os valores de corrente de descargas atmosféricas obtidos por GIN (1997, p. 3-4) e a malha de acordo com MEDEIROS (1998, p. 15-18). Não serão avaliados processos de ionização do solo, nem problemas relacionados às bordas das malhas. As simulações correspondem a uma malha com impedância calculada conforme CRUZ (2005); e foram simuladas condições que representam

---

<sup>1</sup> ANTÔNIO MELO DE OLIVEIRA – Orientador/Pesquisador – PEQ – Núcleo de Estudo e Pesquisa em Processamento de Energia e Qualidade, Prof. Dr. da Escola de Engenharia Elétrica e de Computação/UFG; melo@eee.ufg.br  
CARLOS RENATO B. DOS SANTOS; santos\_crb@yahoo.com.br E LUIS FERNANDO DA CRUZ , luizfan@yahoo.com.br – METRES EM ENGENHARIA  
CAROLINE LEVI GUEDES – MESTRANDA – PEQ – Núcleo de Estudo e Pesquisa em Processamento de Energia e Qualidade, Prof. Dr. da Escola de Engenharia Elétrica e de Computação/UFG; guedescaroline@gmail.com

uma descarga atmosférica, um curto-circuito e um sinal elétrico de alta frequência semelhante a uma interferência eletromagnética. Os resultados foram satisfatórios quando da aplicação do método a uma malha de dimensões médias que estão conectadas a edifícios e sistemas de SPDA.

## 2. METODOLOGIA

O método utilizado é diferencial no domínio de tempo e pode ser considerado um modelo para a execução do software que analisa o comportamento impulsivo da tensão. Este método consiste na discretização da estrutura analisada e em adotar um valor para a impedância de cada segmento, isto é, a estrutura é dividida em segmentos que são conectados com impedâncias. A análise de linhas de transmissão de dois condutores é a base unidimensional do TLM; este modelo aqui empregado usa uma base para as versões bidimensional ou tridimensionais de TLM. A Figura 2.1 mostra o equivalente de Thévenin de uma unidade básica usada para o desenvolvimento do modelo de TLM, incluindo os efeitos dos segmentos circunvizinhos até as tensões refletidas conforme dado em CRUZ (2005, p. 1-3).

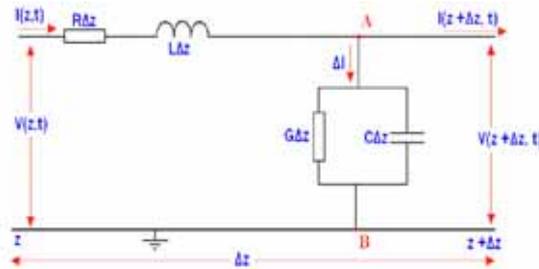


Figura 2.1 - Parâmetros distribuídos de uma linha de transmissão

Com o objetivo de calcular as tensões da grade da malha, o programa foi desenvolvido usando linguagem de programação de C++ uma ferramenta orientada a objeto. O resultado foi a implementação de um TLM baseado em programação logicamente mais simples e mais flexível do que outros, este permite a execução de diversos tipos de análises. O programa apresenta uma maneira simplificada de mudar os parâmetros do sistema. O método executado é capaz de analisar problemas bi e tridimensionais; cada segmento e cada nó têm a informação sobre todos os segmentos e nós adjacentes, permitindo o cálculo automático dos coeficientes da transmissão e de reflexão, de acordo com a estrutura estudada. Após ter executado todas as conexões a serem analisadas, a transmissão e cálculos da reflexão são realizados para cada segmento da estrutura, conforme com o método de TLM baseado em SARTORI (1994, p. 35- 95).

Neste trabalho será utilizada como ferramenta de simulação uma proposta de resolução aplicando-se a programação orientada a objetos desenvolvida por MENDONÇA (2005, p. 55-67). O método TLM consiste em sugerir um valor de impedância para cada seguimento discretizado de uma determinada aplicação. Cada nó da linha é conectado a um ou mais trechos de linha, formando a estrutura de estudo. É largamente utilizado no estudo da compatibilidade eletromagnética (CEM) conforme SANTOS (2005, p.51-53). Nesses estudos estão as análises de campos eletromagnéticos de descargas atmosféricas.

O algoritmo utilizado neste trabalho analisa os fenômenos no domínio do tempo (TLM-TD, ou Transmission-Line Modeling – Time Domain) FERREIRA (1999). A Figura 2.2 representa o modelo L equivalente que será utilizado na representação de um trecho curto de uma linha de transmissão de dois condutores. Os parâmetros  $R\Delta z$ ,  $L\Delta z$ ,  $G\Delta z$  e  $C\Delta z$  são, respectivamente, a resistência, a indutância, a condutância e a capacitância por unidade de comprimento de uma porção incremental  $\Delta z$  de uma linha de transmissão. Para desenvolvimento do método, uma linha de transmissão é representada por parâmetros distribuídos, conforme a Figura 2.2.

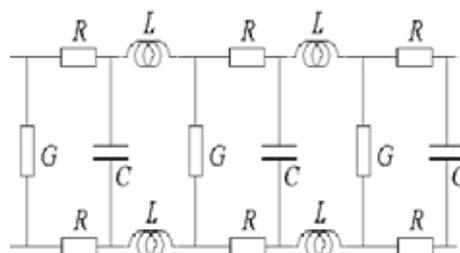


Figura 2.2 - Elemento infinitesimal de uma linha de transmissão

Aplicando a lei de Kirchhoff das tensões na malha externa do circuito da Figura 2.2, obtém-se a equação1:

$$-\frac{V(z+\Delta z,t)-V(z,t)}{\Delta z} = RI(z,t) + L\frac{\partial I(z,t)}{\partial t} \quad (1)$$

A equação 2 é obtida aplicando-se a Lei de Kirchhoff das correntes no nó A do circuito da Figura 2.2:

$$I(z,t) = I(z+\Delta z,t) + \Delta I \quad (2)$$

Desenvolvendo-se a equação 2 e após uma forte formulação matemática temos, considerando uma linha sem perdas (ou seja:  $R = G = 0$ ), a equação (3), denominada Equação de Helmholtz, ou simplesmente equação de onda:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = LC \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \quad (3)$$

Desta forma, o circuito L equivalente é representado pela Figura 2.3. Temos o circuito representado como sendo:

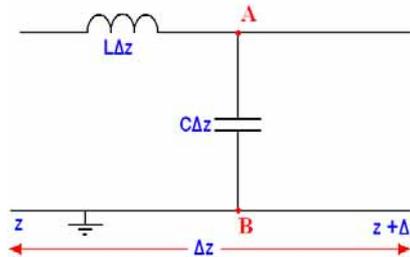


Figura 2.3 - Modelo sem perdas do circuito L equivalente

Após manipulação matemática temos:

$$Z_0 = \frac{2\mu_0}{\pi} \cdot \left( \ln \frac{\Delta l}{d} - 1 \right) \cdot v \quad (4)$$

A impedância  $Z_0$  é chamada de impedância característica da linha como:

A impedância característica numa linha sem perdas é chamada por alguns autores de *impedância de surto* ou *impedância natural da linha* [Fuchs, 1979], [Bewley, L. V., 1951], [Hedman, 1978]. (SANTOS, 2005, p. 52).

Sendo  $d$  o raio do condutor e  $\Delta l$  o espaçamento entre nós da malha que corresponde a 0.5 metros,  $\mu_0$  é a permissividade do vácuo, pois a permissividade do solo é suficientemente baixa para podermos considerá-la como a do solo. A velocidade da luz é representada por  $v=3e8$  m/s. Para a resistência de aterramento para cada nó foi considerada conforme equação (5), onde  $n$  é o número de nós que constituem a malha em discussão e  $R_{at}$  a resistência de aterramento medida experimentalmente de acordo com MEDEIROS (1998, p 17).

$$R_{nó} = n \cdot R_{at} \quad (5)$$

### 3. SIMULAÇÃO

#### 3.1. Descrição Geral

A simulação foi feita a partir de dados de um escritório onde há equipamentos de TI e que estão interligados por uma rede local de comunicação. A malha apresenta uma configuração de 10x8m de área, tem-se uma impedância característica calculada  $Z_0 = 205\Omega$  conforme equação (9) e a partir de medições no terreno uma  $R_{at}=8\Omega$ . Adotando o valor a corrente de curto circuito corresponde a  $I_0=100A$ . A corrente de simulação assumida é um percentual da corrente de uma descarga atmosférica média obtida de GIN (1997, p. 3-4), o baixo valor é pelas outras partes do sistema que estão aterrados e distribui a corrente, ou seja, funciona como divisor de corrente por isso o valor foi considerado viável. Esses dados foram utilizados para as simulações I. Na simulação II e III a corrente proposta é de  $I_0=1,5A$ , correspondendo a uma corrente de curto baixa por ser equipamentos de baixa potência interferência eletromagnética baixa.

Os valores de distância apresentados nos gráficos devem ser multiplicados por um fator  $k=0.5$ . Torna-se necessário entender que a corrente utilizada pelo programa necessita de uma constante de

tempo de frente de onda e a constante de tempo de decaimento, a constante para um curto-circuito é da ordem de 50 vezes o valor de uma descarga a atmosférica MENDONÇA (2005, p. 23).

### 3.2. Simulação e Resultados

A malha possui  $21 \times 12$  nós. Foi inserido o impulso no nó  $8 \times 6$  e analisadas as tensões nos nós P1 ( $8 \times 7$ ), P2( $9 \times 7$ ) e P3 ( $10 \times 8$ ).

#### 3.2.1 Simulação I - Descarga Atmosférica

Parâmetros adotados para a representação de uma descarga atmosférica:  $I_0=100A$ ;  $Z_0= 205\Omega$ ,  $\tau_1= 1,2\mu s$ ,  $\tau_2=20\mu s$  e  $n = 10$ .

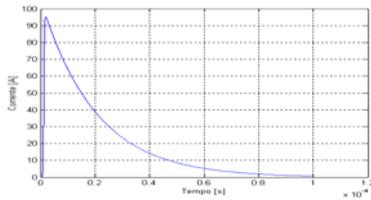


Figura 3.5 - Forma de onda da corrente da descarga atmosférica

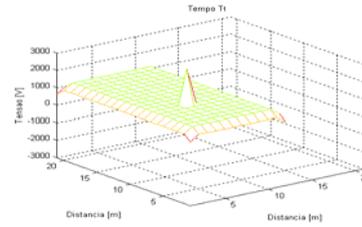


Figura 3.6 -Tensões na malha em  $t = 5\mu s$

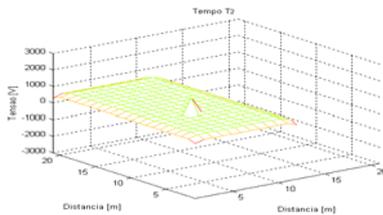


Figura 3.7-Tensões na malha em  $t = 20\mu s$

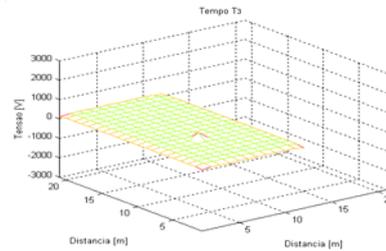


Figura 3.8-Tensões na malha em  $t = 40\mu s$

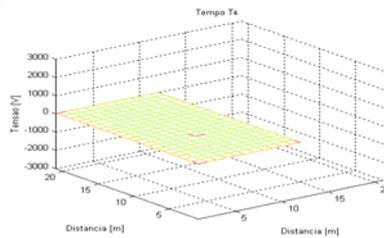


Figura 3.9 -Tensões na malha em  $t = 80\mu s$

#### 3.2.2 Simulação II - Curto-circuito

Parâmetros adotados para a representação de uma descarga atmosférica:  $I_0=1,5A$ ;  $Z_0= 205\Omega$ ,  $\tau_1= 20\mu s$ ,  $\tau_2=200\mu s$  e  $n = 10$ .

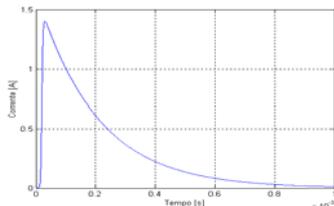


Figura 3.10 - Forma de onda da corrente de curto-circuito

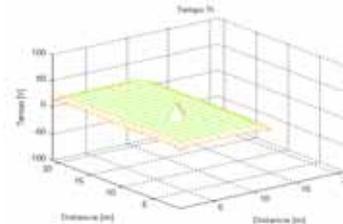


Figura 3.11-Tensões na malha em  $t = 50\mu s$

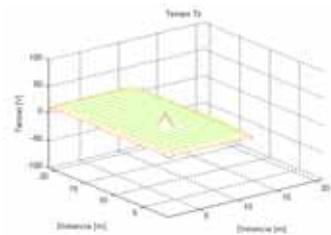


Figura 3.12 - Tensões na malha em  $t = 100\mu s$

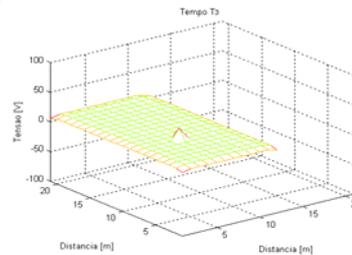


Figura 3.13 - Tensões na malha em  $t = 150\mu s$

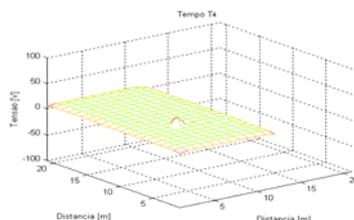


Figura 3.14 - Tensões na malha em  $t = 190\mu s$

### 3.2.3 Simulação III – Interferência Eletromagnética

Parâmetros adotados para a representação de uma descarga atmosférica:  $I_0=100A$ ;  $Z_0= 205\Omega$ ,  $\tau_1= 1ns$ ,  $\tau_2=10ns$  e  $n = 10$ .

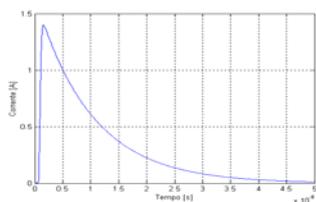


Figura 3.15- Forma de onda da corrente de interferência eletromagnética

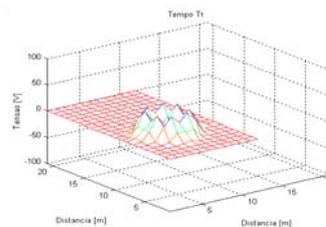


Figura 3.16 - Tensões na malha em  $t = 5ns$

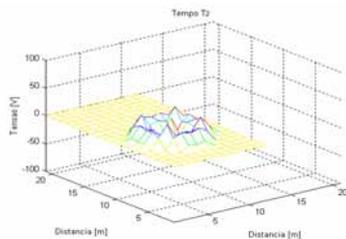


Figura 3.17 - Tensões na malha em  $t = 6ns$

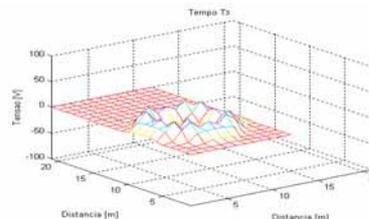


Figura 3.18 - Tensões na malha em  $t = 7ns$

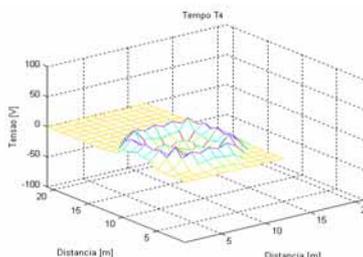


Figura 3.19 - Tensões na malha em  $t = 8ns$

## 4. CONCLUSÕES

Foram apresentados neste trabalho o modelo de malha aplicando TLM e os resultados de simulação do modelo.

Diante dos resultados das simulações I e II apresentadas nota-se que, com exceção do nó de incidência do impulso, todos os nós restantes apresentam potenciais iguais, ou seja, a equipotencialidade da malha é mantida.

Já a simulação III apresenta instantes em que as tensões apresentam valores diferentes, ou seja, a malha perde parte de sua equipotencialidade, como visto em Figura 3.16, Figura 3.17, Figura 3.18 e Figura 3.19. Ainda nesse caso, se dois ou mais equipamentos da tecnologia da informação estiverem conectados entre si e aterrados em pontos diferentes da malha, haverá erros na comunicação e/ou queima de equipamentos; é preciso remodelar a malha para que a mesma se comporte de forma a proteger os equipamentos de interferências eletromagnéticas.

Diante dos resultados apresentados, percebe-se que a malha não protege os equipamentos sensíveis de forma satisfatória diante de impulsos provenientes de interferências eletromagnéticas.

## 5. Referências Bibliográficas

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5419/2001**: Proteção de estruturas contra descargas atmosféricas.
- CRUZ, L. F. & MENDONÇA, F. B. & OLIVEIRA, A. M. & SANTOS, C. R. B. & NERYS, J. W. L. *Performance evaluation of a signal reference ground for electronic equipment*. Federal University of Goiás, BRASIL. VII International Symposium on Lightning Protection - SIPDA 2005, São Paulo/SP, 21 a 25 Novembro 2005.
- FERREIRA, G. S. *Modelagem numérica de problemas de compatibilidade eletromagnética utilizando TLM*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis/SC 1999.
- GIN, Rosângela B.B. & PINTO JR, Osmar & PINTO, Iara C.A. & MENDES JR, Odin. *Descargas atmosféricas no Sudeste do Brasil*. XIV Semanário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - SNPTEE - GRUPO XI, Belém / PA, 1997.
- IEEE Std 1100-1992. *Powering and Grounding Sensitive Electronic Equipment*. p46-54, p90-96.
- IEEE Std 142-1991. *Grounding of Industrial and Commercial Power Systems*. p129-167, p197-219.
- MATTOS, Marcos A.F. *Transitório em malhas de terra*. XVII Semanário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - SNPTEE - GRUPO VIII, Uberlândia/MG, 19 a 24 Outubro 2003.
- MATTOS, Marcos A. F. *Common mode voltage generated by grounding grids, a time domain solution*. IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility, Istanbul/Turquia, 11 a 16 Maio 2003.
- MEDEIROS, C. A. G. *Avaliação do desempenho de aterramentos elétricos em descargas atmosféricas - efeitos resistivos e indutivos*. Centro de Ciências Exatas e Tecnologia - Universidade Federal de Uberlândia; Uberlândia/MG, Maio 1998.
- MENDONÇA, Flávia B. *Avaliação do desempenho de malha de aterramento funcional em instalações com presença de equipamento da informação*. Dissertação - UFG. Goiânia /GO, 2005.
- MIRANDA, A. P. *Aterramento pelas fundações para a proteção contra raios*. Revista Eletricidade Moderna; São Paulo, nº 348, p.44-49, Março 2003.
- PORTELA, C. *Comportamento de sistemas de aterramentos para descargas atmosféricas. Determinação de efeitos relativos à segurança de pessoas e equipamentos e a interferência em sistemas de proteção e controle*. XIV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica; Belém/PA, 1997.
- PROCOBRE. *Aterramento Elétrico*. II Fórum: Perfil, atribuições e mercado da Engenharia Elétrica e Encontro Nacional da ABEE; Goiânia/GO, Junho 2004.
- SANTOS, Carlos R. B. *Análise Experimental e Computacional de uma Malha de Equalização Utilizada em Equipamentos Sensíveis*. Dissertação - UFG. Goiânia/GO, Novembro/2005.
- SANTOS, C. R. B & MENDONÇA, F. B. & OLIVEIRA, A. M. & NERYS, J. W. L. *Estudo e análise experimental de uma malha de equalização utilizada para o aterramento funcional de equipamentos da informação*. VII INDUSCON, Recife/PE 9 a 12 de Abril de 2006.
- SARTORI, C. A. F. *Aspectos de Compatibilidade Eletromagnética em Estruturas Atingidas por Descargas Atmosféricas*. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo; São Paulo/SP, 1999.
- SOBRAL, Sergio T. & SERIO, Alceni J. & TESSMER, Osmar & CAMPANER, Ronni M. & OLIVEIRA, João A. *Controle de interferências e compatibilidade eletromagnética na Usina e na SE de Salto Caixas da Copel*. XIV Semanário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE - GRUPO VIII, Belém / PA, 1997.
- SUNDE, E. D. *Earth Conduction Effects in Transmission Systems*. Dover Publication, Inc. ; New York, 1968.