

ATERRAMENTO PARA EQUIPAMENTOS ELETRONICOS SENSIVEIS: PROBLEMAS E SOLUÇÕES

J. R. Cogo

Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI

C. M. F. de O. Monteiro

Instituto Nacional de Telecomunicações - INATEL

Artigo publicado na Revista Eletricidade Moderna - Ano XXIII, nº 255 - Junho de 1995 - página 118 à 127.

RESUMO

Um adequado sistema de aterramento é fundamental para a correta operação de equipamentos eletrônicos sensíveis (EES), como computadores, CLPs, sistemas de controle de processo e outros, os quais apresentam alta sensibilidade a falhas provocadas por tensões aleatórias de baixa intensidade. Este trabalho analisa o problema do aterramento e orienta o usuário quanto à instalação, de modo a evitar a danificação dos EES.

1 - INTRODUÇÃO

As principais funções [1] do aterramento de equipamentos elétricos são:

- manter baixa a diferença de potencial entre as partes metálicas, de modo a garantir a segurança e a proteção contra choques elétricos do pessoal da área;
- evitar incêndios de materiais voláteis e ignição de gases em atmosferas combustíveis, fornecendo um elemento condutor elétrico efetivo para o fluxo de corrente de falta à terra, descargas estáticas e atmosféricas;
- evitar interferência na operação adequada dos equipamentos do sistema elétrico e dos equipamentos eletrônicos sensíveis (EES);
- evitar superaquecimento provocado por calor gerado em eletrodutos metálicos, malhas de cabos, etc.

Quando ocorrer uma falha de isolamento ao longo de um circuito de energia elétrica, provocando conexão entre o condutor energizado e uma carcaça metálica, existe a tendência de que o potencial elétrico da carcaça se equipare ao do condutor de potência, o que é evitado pelo correto sistema de aterramento.

A malha de aterramento da subestação abaixadora é, freqüentemente, interconectada com o sistema de aterramento da planta industrial, seja intencionalmente (por um fio terra instalado sob o solo), ou não intencionalmente, por meio de bandeja de cabos, sistema de condutos, carcaça de duto de barramento, estrutura metálica de edifícios, etc. Como resultado desta interconexão [1], o sistema de aterramento da planta é levado, durante uma falta, ao mesmo potencial do terra remoto. Logo, deve-se evitar os potenciais perigosos de superfície internos à planta industrial.

Em certos casos (muito raros), pode-se eliminar os potenciais perigosos de superfície pelo isolamento efetivo entre o sistema de aterramento da subestação e o sistema de aterramento da planta. No entanto, na maioria dos casos, a integração das duas malhas (principal e remota), por meio da análise adequada de ambos os sistemas para potenciais de passo e de toque, tem reduzido estes potenciais a níveis aceitáveis.

Os fabricantes de EES, por vezes, especificam técnicas de aterramento para seus equipamentos que podem ser incompatíveis com aquelas especificadas pelo fabricante dos equipamentos que compõem o sistema de potência.

2 - VALORES ACEITÁVEIS/RECOMENDADOS PARA SISTEMAS DE ATERRAMENTO

A conexão à terra é uma das partes mais importantes do sistema de aterramento, e também a mais difícil de ser projetada com resultados satisfatórios. O projeto de um sistema de aterramento mais elaborado pode se tornar ineficiente em razão da conexão imperfeita à terra [3].

A conexão perfeita à terra deveria ter resistência zero, o que é impossível de se obter. Valores menores que 1 [Ω] podem ser obtidos, embora uma resistência tão baixa quanto esta possa não ser necessária, visto que a resistência requerida varia inversamente com a corrente de falta à terra; quanto maior a corrente de falta, menor deve ser a resistência.

3 - DEFINIÇÃO DE RUÍDO ELÉTRICO

Qualquer distorção sobreposta [6] a um sinal elétrico conhecido, que altere sua forma de onda característica no tempo, é denominada ruído elétrico. Os mais comuns e abrangentes são: cortes de tensão, variação de tensão, variação de frequência e picos de tensão ("spikes").

Visando proteger os EES em particular, surgiu a preocupação de se conhecer e controlar tais distúrbios, de modo a que não afetem as pastilhas semicondutoras sensíveis utilizadas. Entre outros efeitos, os distúrbios podem:

- alterar dados armazenados em memórias;
- apagar pontos em telas de monitores de vídeo;
- alterar dados gravados em discos magnéticos;
- modificar dados de um programa em andamento;
- colocar em condução tiristores, transistores, etc., em momentos indesejados; e
- danificar certos componentes.

Uma pesquisa feita nos Estados Unidos em 1975 [6] mostrou que 5% do tempo total perdido na operação de 44 centros de processamento de dados (CPD) pesquisados, eram devidos somente a distúrbios na rede de energia elétrica.

4 - CARACTERÍSTICAS DOS EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS SENSÍVEIS (EES)

O suprimento de energia elétrica aos EES envolve o aterramento de diversos sistemas, quais sejam:

- Sinal comum, também referido como "sinal comum DC": é o sistema de referência zero para linhas de dados, e a parte de sinal que em geral representa o neutro sensível dos EES - este é um sistema bastante sensível a tensões transitórias e requer um ponto de referência estável, em relação a um determinado nível de tensão;
- Barramento terra de referência da fonte CC: os EES podem ter vários sistemas de tensão CC diferentes, tais como +5/0/-5[V], +12/0/-12[V], +24[V]/-24[V];
- Barramento de terra do equipamento: este é a carcaça metálica (ou estrutura) dos EES, que pode incluir os chassis dos diversos elementos que os compõe, bem como a carcaça externa ou gabinete. Alguns fabricantes de equipamentos eletrônicos se referem ao barramento terra do EES como "barramento terra de segurança".

4.1 - FORMAS DE ATERRAMENTO DOS EES

4.1.1 - ATERRAMENTO ATRAVÉS DE UM PONTO ÚNICO

Para evitar interferências, é desejável manter o sistema de aterramento do EES completamente isolado do sistema de aterramento relativo ao sistema de energia elétrica. Todavia, existirão locais onde os dois sistemas devam ser conectados juntos, em apenas um ponto. (FIGURA 1 [5]).

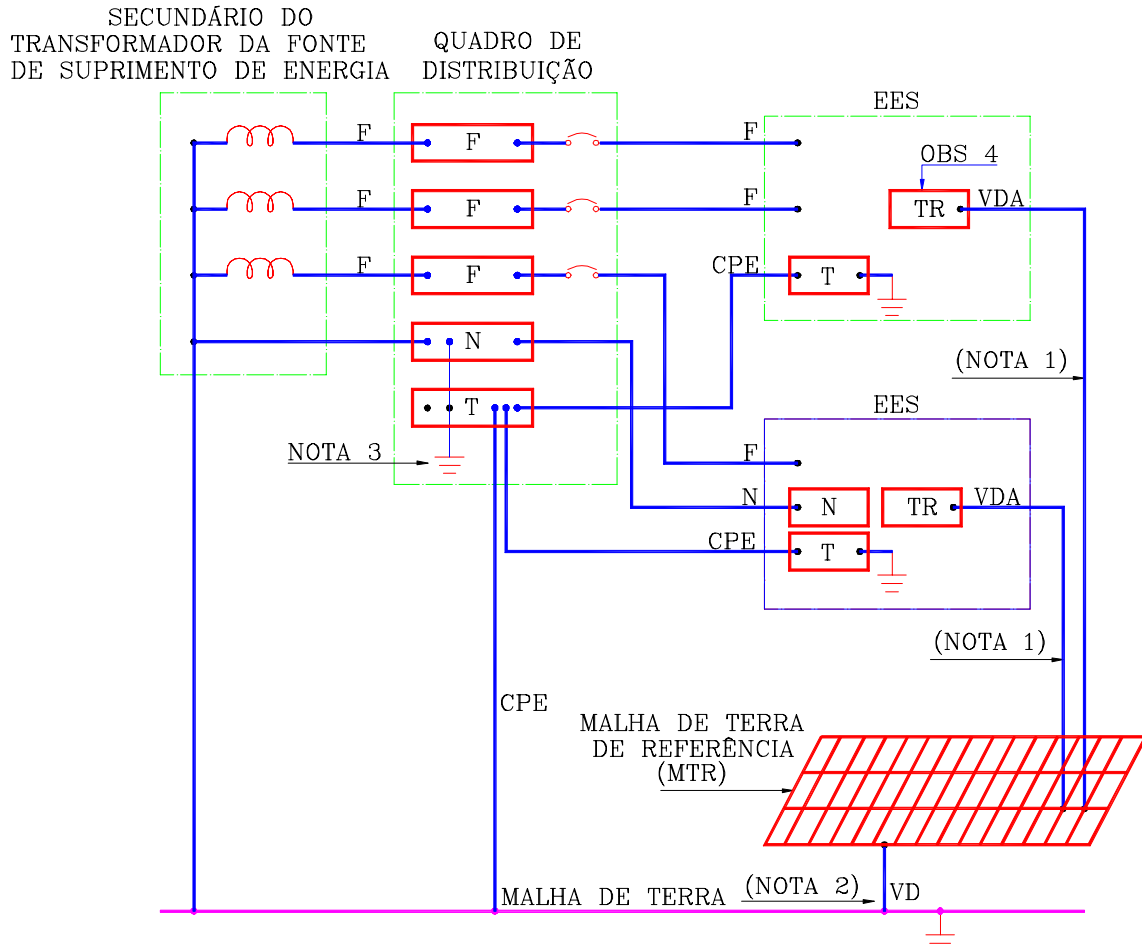


FIGURA 1 - ALIMENTAÇÃO E ATERRAMENTO [5]

Na FIGURA 1 [5], tem-se:

- Nota 1 - A conexão da barra de terra de referência (TR) dos EES à Malha de Terra de Referência (MTR) deve ser feita preferencialmente com fita ou cordoalha, de comprimento máximo igual ao adotado entre condutores da MTR.
- Nota 2 - A conexão de equalização entre a MTR e a malha de aterramento de força é instalada para resolver problemas relativos a baixas frequências, principalmente para atender o critério de segurança pessoal. Podem existir mais de uma destas conexões sem prejuízo para o funcionamento do sistema.
- Nota 3 - As barras de neutro (N) isoladas do quadro de distribuição, deverão ser conectadas à barra de terra de segurança (T) e, além disso, deverão existir pontos de aterramento local no quadro de distribuição por meio de, pelo menos, um condutor.
- Nota 4 - A barra TR deverá ser isolada do painel do EES;
- Nota 5 - Os cabos fase (F), neutro (N) e terra de segurança (CPE, normalmente na cor verde), devem ser isolados de acordo com a classe de tensão do sistema.

Caso o sistema de EES seja composto de várias carcaças, as conexões de terra internas (e não o de terra da carcaça), devem ser dirigidas a um ponto de coleta, dentro das montagens das carcaças, e este ponto deve ser conectado ao terra. A coleta dos terras individuais deve ser na forma de um sistema de distribuição radial, ou uma "árvore", evitando percursos de condutores de aterramento em paralelo.

4.1.2 - ATERRAMENTO ENVOLVENDO TERRAS SEPARADOS/ISOLADOS

A falta de entendimento quanto à função e operação do sistema de aterramento e quanto ao aterramento de neutro, levou alguns fabricantes a exigirem a instalação dos sistemas de aterramento dos EES de forma incorreta.

A alternativa empregada foi aterrar os EES em um eletrodo de aterramento isolado, com uma ou mais hastes colocadas no solo e separadas do sistema de eletrodos de aterramento do sistema de potência. Esta separação dos eletrodos de aterramento sem a conexão de todos os eletrodos juntos não atendia aos requisitos do NEC ([3], [4], [7]), criando potenciais de transferência bastante perigosos.

Por outro lado, enquanto o ruído permanente de baixo nível era eliminado pela prática do aterramento isolado, vários incidentes de sérias proporções foram observados. A análise destes indicou que **a separação dos terras era responsável por tensões elevadas** impostas aos componentes dos EES, em condições de tempestade.

Estas tensões ocorriam estando ou não os EES em operação, e notou-se [3] que seus componentes semicondutores resistem a apenas cerca de 20 [V] ou menos, mesmo para um tempo da ordem de 1[μ s].

O NEC ([3], [4], [7]) proíbe aterramento múltiplo do condutor do circuito aterrado, no lado de carga do equipamento de serviço.

5 - FONTE DE ALIMENTAÇÃO DO TIPO CHAVEADA PARA EES

Nesta seção pretende-se apresentar o padrão típico de fonte de suprimento para EES, de modo a que se possa, posteriormente, recomendar o aterramento adequado desta, onde os detalhes particulares de circuitos dependem de cada fabricante, não sendo, portanto, objeto deste trabalho.

A utilização de fontes do tipo série, apesar destas possuírem um nível baixo de ondulação (ripple da ordem de microvolts pico a pico) não é viável em alimentação para EES, devido ao baixo rendimento e grandes dimensões. Por outro lado, as fontes chaveadas, além de possuírem rendimento adequado e tamanho reduzido (comparado com outras fontes para fornecer potências elevadas), possuem ainda uma boa regulação.

O principal problema destas fontes é o ruído eletromagnético causado pelas bruscas variações de corrente e de tensão no coletor do transistor de potência durante a comutação. Esse ruído exige que a saída da fonte tenha uma boa filtragem para minimizar o ripple sobre o sinal de saída, mas principalmente deve-se tomar vários cuidados em relação à interferência por irradiação (em outros equipamentos próximos à fonte) e por condução (na rede de distribuição de energia).

As fontes chaveadas têm uma boa performance e as inovações tecnológicas na fabricação de mosfets têm aumentado a frequência de chaveamento, tornando as fontes menores e mais leves, porém ainda sujeitas aos transtornos causados pelas irradiações eletromagnéticas.

Além do aterramento adequado, a utilização de filtros de linha, a redução no comprimento das pistas da placa de circuito impresso e o emprego de blindagem adequada contribuem para evitar as interferências.

Basicamente as fontes utilizadas são constituídas das partes indicadas na FIGURA 2, as quais são descritas a seguir.

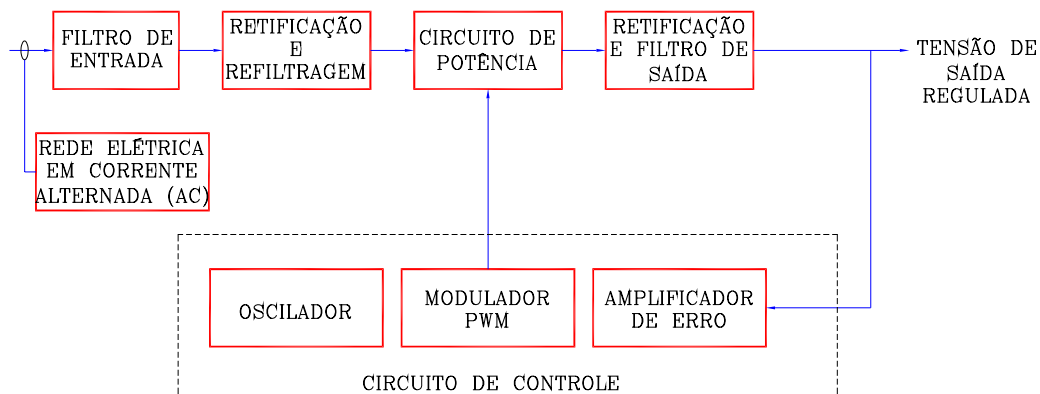


FIGURA 2 - DIAGRAMA DE BLOCOS DE FONTE CHAVEADA TÍPICA

5.1 - FILTRO DE ENTRADA

O filtro de linha (entrada) é um circuito que visa atenuar o efeito causado por emissões eletromagnéticas. É composto por elementos indutivos e elementos capacitivos, convenientemente projetados para serem acoplados diretamente à rede CA.

5.2 - RETIFICAÇÃO E REFILTRAGEM

Converte a tensão CA da rede em tensão contínua, utilizando uma ponte retificadora. Nos capacitores utilizados para desacoplar (filtrar) a rede CA, faz-se necessário um cuidado especial com a corrente de surto (inrush) no momento de sua energização, pois em função de carga residual, poderá haver circulação de altas correntes pelos diodos. Normalmente utiliza-se um resistor para limitar essa corrente, ou mais eficientemente, um tiristor em paralelo com o resistor (que ficará inibido até que, depois de um intervalo de tempo, tenha-se o capacitor carregado e o tiristor conduza, curto-circuitando o resistor).

5.3 - CIRCUITO DE POTÊNCIA

Nesse bloco existem os transistores para o chaveamento e o transformador, que isolam da rede o circuito alimentado, além de transferir o sinal à saída buck, onde indutores são responsáveis por manter constante a tensão regulada requerida.

5.4 - RETIFICAÇÃO E FILTRO DE SAÍDA

Neste bloco, a retificação feita pelos diodos é acoplada à saída por um indutor que promove o "alisamento" da corrente e a transferência de energia no período em que os diodos não estão conduzindo.

Os capacitores de saída, que filtram a corrente CA para o "terra", são calculados, em alguns casos, levando-se em conta também os transitórios de corrente. Neste bloco existe a realimentação ao circuito de controle.

Vários tipos de realimentação podem ser feitos. Em qualquer um deles pode-se provocar uma instabilidade no circuito, sendo necessário, para não se comprometer a boa performance da fonte, um circuito para compensação em frequência.

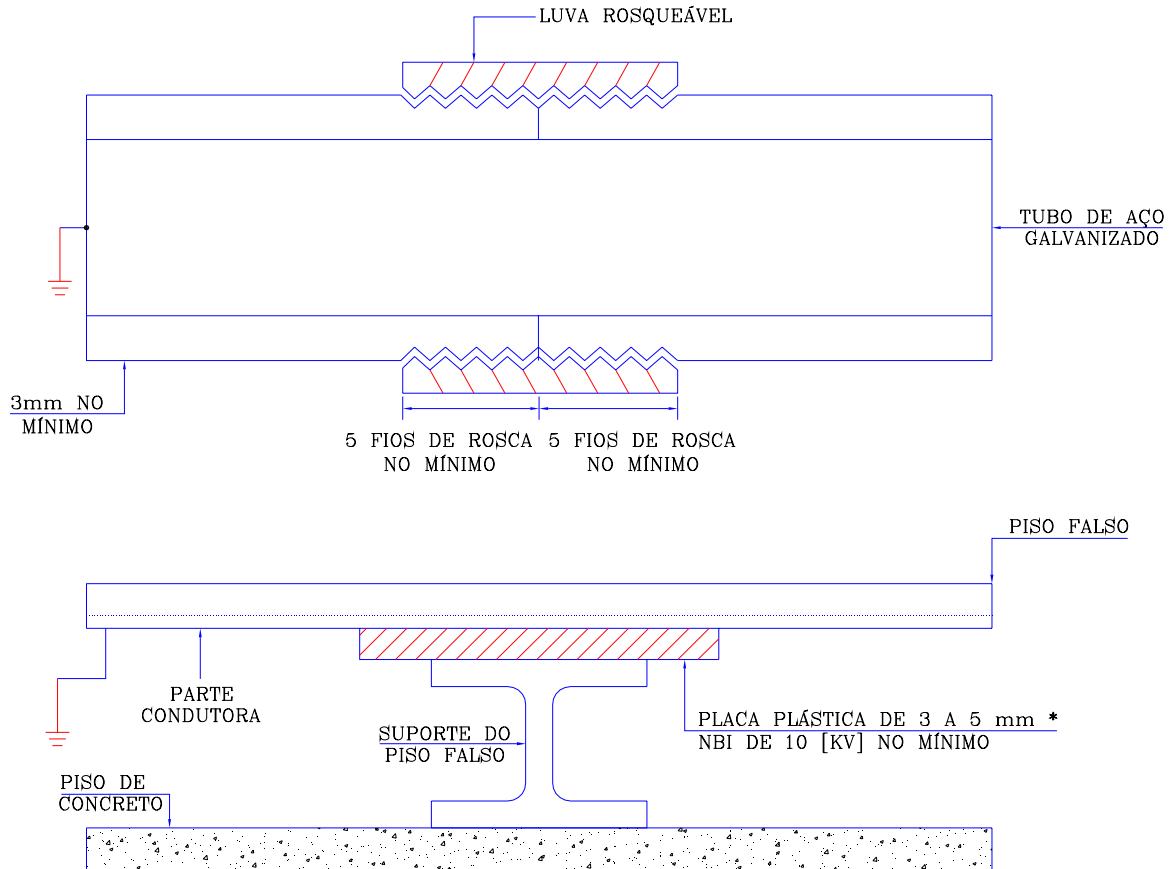
5.5 - CIRCUITO DE CONTROLE

Neste bloco, apesar de suas várias funções, normalmente é utilizado um único circuito integrado (CI) que realiza as funções de amplificador de erro, oscilador, modulador em largura de pulsos (PWM) e outras.

Normalmente, no caso da modulação PWM, o sinal de realimentação que chega ao CI faz variar a largura do pulso que irá chavear os transistores. Se a tensão de saída da fonte tender a diminuir, a largura de pulso aumenta e compensa a saída. Se tender a aumentar, haverá diminuição da largura de pulso, corrigindo-se continuamente ("on line") as variações de tensão devido à variação de carga, mantendo-se estável a saída.

6 - SUGESTÕES PARA O SISTEMA DE ATERRAMENTO DOS EES

Para se evitar potenciais inadequados em sistemas que contenham grandes quantidades de EES, por exemplo CPDs, é uma prática comum o uso de pisos falsos. As placas do piso falso devem ser niveladas para garantir um bom contato elétrico com a estrutura metálica que suportará o piso, devendo-se em seguida efetuar o aterramento desta. Para isto deve-se adotar, para o piso falso, um ponto de aterramento a cada metro quadrado. Estes pontos devem, porém, ser igualmente distribuídos, dentro do possível, pela área da sala. Cada ponto de aterramento na estrutura metálica que irá suportar o piso falso deve ser aparafusado por meio de terminais próprios, barras, malhas ou fitas de cobre de seção transversal com 20 a 30 [mm²], de modo a interligar os diversos pontos do piso falso, visando à criação de uma malha única. Além disso, o piso falso deverá estar isolado das paredes e do piso de concreto da sala por intermédio de isoladores com nível básico de isolamento (NBI) de, no mínimo, 10 [KV] (pastilhas plásticas com 5 [mm] de espessura são suficientes para esta finalidade). A FIGURA 3 ilustra.



* A PLACA PODERÁ SER COLOCADA ENTRE O PISO DE CONCRETO E O SUPORTE DO PISO FALSO, OU ENTRE O PISO FALSO E O SUPORTE

FIGURA 3 - ATERRAMENTO DO PISO FALSO E CONEXÃO DE DUTOS

Os cabos de transmissão de sinais deverão estar, preferencialmente, instalados por completo em tubos de aço galvanizado, de parede espessa e conexões com luvas largas, os quais devem ser aterrados nas duas extremidades. Na impossibilidade de instalação dos tubos recomendam-se cabos para sinais que tenham blindagem eletromagnética, visto que a cordoalha (malha) apenas bloqueia o campo elétrico e não o campo magnético.

É recomendável melhorar o contato das placas com a estrutura, pelo emprego de chapas ou malhas de cobre colocadas entre ambas.

Note-se que o efeito de campos elétricos são eliminados pelo aterramento de um ponto, e os de campos magnéticos, pelo aterramento em dois pontos.

Para transmissão de dados, procurando-se evitar a transferência de potencial perigosa, é interessante usar fibra óptica ou modem, desde que isolados adequadamente.

7 - PROBLEMA PRÁTICO

O sistema apresentado na FIGURA 4 ilustra um alimentador típico residencial ou comercial. Admitiu-se a potência de curto-circuito ao nível de média tensão (13,8 [KV] no caso) como sendo infinita. Admitiu-se ainda que o ramal é alimentado por fusível no ponto de conexão com a subestação principal da concessionária. Para ilustrar os níveis de sobretensão, durante tempestades, que podem aparecer no circuito, simula-se uma descarga atmosférica na linha FA (fase A do circuito trifásico). Admitiu-se ainda uma ruptura de fusível e, portanto, apenas as linhas FB e FC ficam sujeitas a tensão na frequência de 60 [Hz].

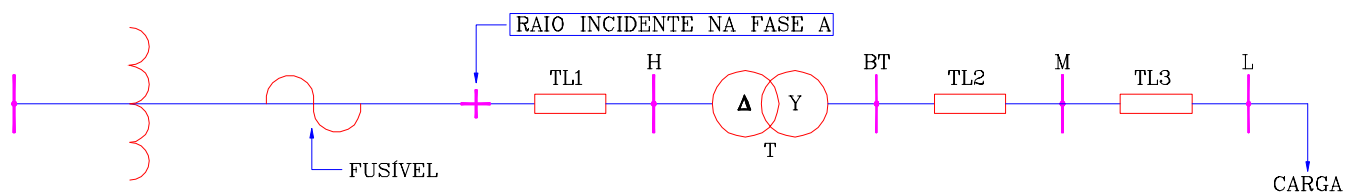


FIGURA 4 - SISTEMA EM ANÁLISE (RESULTADOS ESTÃO NA FIGURA 5)

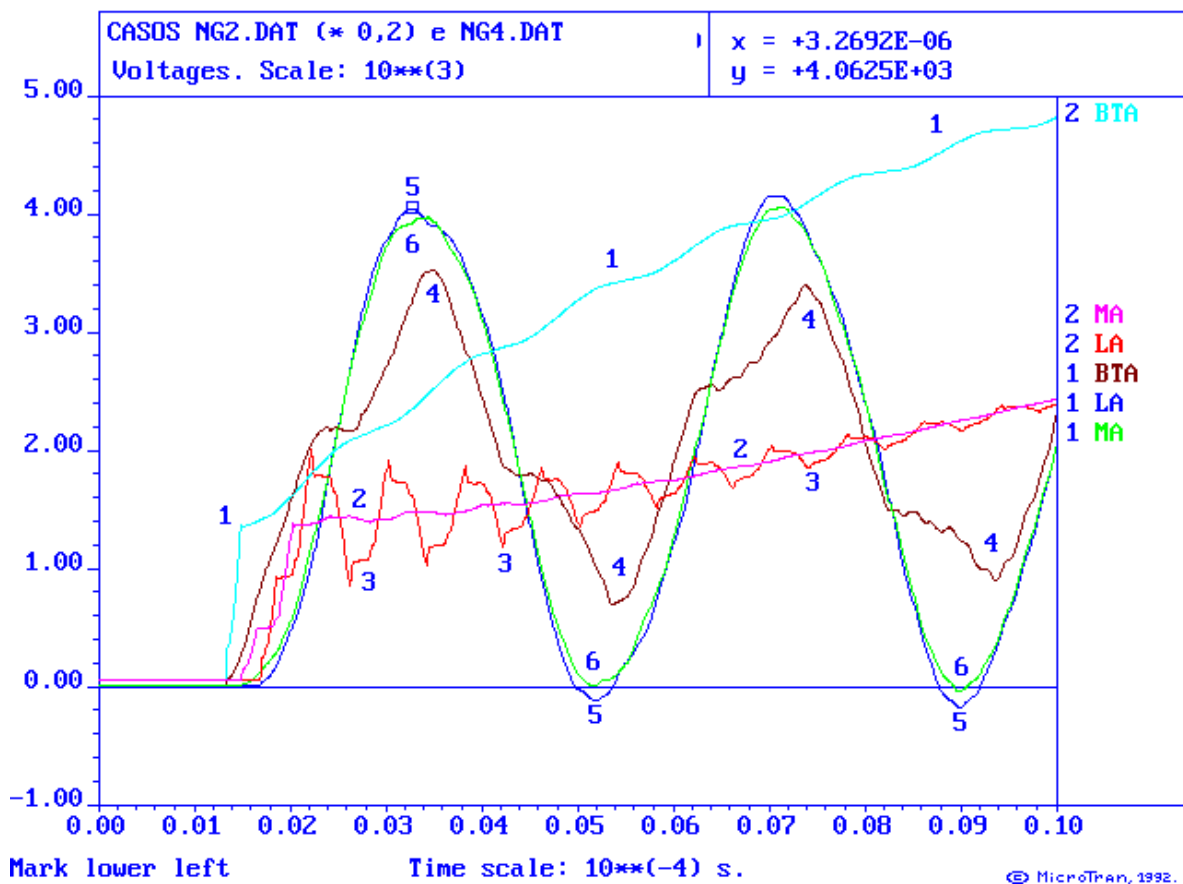


FIGURA 5 - FORMA DA ONDA DE TENSÃO NA FASE A PARA AS BARRAS BT, M e L DO SISTEMA DA FIGURA 4, COM E SEM PÁRA-RAIOS

Para as simulações, utilizaram-se os seguintes dados práticos:

TL1 - Alimentador conectando a concessionária a um transformador de distribuição:

- Comprimento: 100 [m];
- Impedância de surto: 450 [Ω];
- Velocidade de propagação da onda: 300000 [km/s];
- Nível de tensão: 13,8 [KV];
- Linha aérea, cabo nú.

TL2 - Alimentador conectando transformador ao medidor de energia residencial:

- Comprimento: 50 [m];
- Impedância de surto: 500 [Ω];
- Velocidade de propagação da onda: 300000 [km/s];
- Nível de tensão: 0,22 [KV];
- Linha aérea, cabo nú.

TL3 - Alimentador conectando medidor a uma carga (admitida praticamente resistiva $R = 100$ [Ω], $L = 2$ [mH]) dentro do consumidor local:

- comprimento: 20 [m];
- Impedância de surto: 100 [Ω];
- Velocidade de propagação da onda: 100000 [km/s];
- Nível de tensão: classe 0,6 [KV];
- Cabo com isolamento em PVC.

T - Transformador de distribuição com as seguintes características: 13,8/0,22 [KV], 150 [KVA], $X = 3,5\%$ e $R = 1\%$.

O aterramento foi considerado como sendo 1 [Ω].

O programa de simulação utilizado foi o MicroTran (da MicroTran Power System Analysis Corporation), que emprega a técnica desenvolvida por Dommel [2], a qual tem sido aperfeiçoada desde 1975. A etapa de integração usada foi de 0.10 [μ s] e o tempo de simulação foi de 160 [μ s].

O pára-raios simulado é de carboneto de silício, colocado nos barramentos H e M.

- Barramento H:

$$U_{\text{residual}} = 16970,60 \text{ [V]}; \text{ e}$$

$$\Delta U/\Delta i = 6,6055 \text{ [\Omega]}$$

- Barramento M:

$$U_{\text{residual}} = 1357,64 \text{ [V]}; \text{ e}$$

$$\Delta U/\Delta i = 6,6055 \text{ [\Omega]}.$$

Nota-se que, mesmo com tais níveis de proteção, os surtos obtidos atingem valores bastante elevados, conforme mostrado na FIGURA 5, indicando que um critério de equalização de potencial para equipamentos eletrônicos sensíveis e para segurança de pessoal fica mais eficiente e seguro.

8 - CONCLUSÕES

Os distúrbios propagados por **condução**, gerados externamente aos equipamentos, normalmente chegam pela rede elétrica, passando pelas fontes de alimentação e atingindo os diversos circuitos eletrônicos. Já aqueles de origem magnética ou eletrostática, de acordo com o seu elemento gerador (sistemas de radares, linhas de transmissão, descargas atmosféricas, etc.) atingem os equipamentos via irradiação [6].

Assim, a primeira medida a ser tomada é definir os tipos de distúrbios aos quais o sistema a ser protegido estará exposto, separando as proteções [5] contra distúrbios atmosféricos, ruídos propagados por condução e interferências eletromagnéticas.

Para qualquer um destes sistemas de proteção, a forma e a qualidade do aterramento são fundamentais na definição de sua eficiência.

A melhor maneira de se evitar distúrbios com origem nas interferências eletromagnéticas é isolando-se os circuitos eletrônicos por meio de caixas blindadas.

Para se determinar o tipo de blindagem a ser utilizada necessita-se, basicamente, saber se a fonte de ruído gera campos magnéticos ou campos eletrostáticos.

Quando o distúrbio for de origem magnética, as blindagens deverão ser feitas de materiais ferromagnéticos, como, por exemplo, dutos e caixas metálicas.

Para distúrbios de origem eletrostática, as blindagens deverão ser feitas de materiais condutores, como malhas ou gaiolas de cobre.

9 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEEE STD 141-1986: IEE recommended practice for electric power distribution for Industrial plants - (Red Book) - Chapter 7: Grounding.
- [2] Dommel, H. W.: Non-Linear and time-varying elements in digital simulation of electromagnetic transients. IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol. PAS-90, pp. 2561-2567, nov./dez. 1971.
- [3] IEEE STD 142-1981 - Revisão 1991-1994: IEEE recommended practice for grounding of industrial and commercial power systems (Green Book) - Chapter 5: Sensitive electronic equipment grounding."
- [4] The National Electrical Code (NEC) - 1980 Hand Book National Fire Protection Association (NFPA). Batlerymarch Park, Quincy MA.
- [5] Costa, P. F.: Características e evolução dos sistemas de aterramento para equipamentos eletrônicos. Revista Eletricidade Moderna, maio 1992.
- [6] Garcia, R. T.: Falhas em sistemas eletrônicos causadas por ruídos elétricos. Boletim Sobracon - 44 - 1989.
- [7] National Electric Safety Code, published by The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Accredited Standard Committee C2-1993.

10 - SOFTWARE DISPONÍVEL

Os autores do trabalho informam que os leitores interessados em receber o software Microtran versão estudante, sem custos, devem enviar um disquete de 3 1/2 polegadas, alta densidade, junto com envelope auto-endereçado selado, para:

GSI - Engenharia e Comércio Ltda.
Rua José Joaquim, 481 - Bairro Varginha
37500-000 - Itajubá - MG

O programa Microtran na versão completa permite simular sistemas elétricos com até duas mil barras e dois mil ramos. Na versão estudante, possui as seguintes características:

- Simulação de transitórios eletromagnéticos em sistemas elétricos com até 18 nós, 12 ramos, uma linha com parâmetro dependente da frequência;
- Torres com configuração até cinco fases;
- Parâmetros de linhas de transmissão para até cinco fases;
- Três curvas simultâneas de até três arquivos diferentes; e
- Montagem de arquivo de dados com até 300 linhas.