

# ASPECTOS DE COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA EM SUBESTAÇÕES E RECINTOS ELÉTRICOS

## Abordagem Geral

Marcos Isoni

CONeCT – Consultoria e Capacitação Técnica

**Resumo** – Este texto propõe-se a apresentar, de maneira sucinta e objetiva, os aspectos básicos relacionados à Compatibilidade Eletromagnética em subestações de energia elétrica, fundamentalmente no que se refere às possibilidades do surgimento de interferências sobre os sistemas eletrônicos amplamente utilizados nesses ambientes para as funções de proteção, controle / automação, monitoramento e comunicação. São abordados os tipos e as principais fontes de ruídos em SE's, bem como as possibilidades de minimização dos efeitos potencialmente nocivos ao funcionamento de equipamentos eletrônicos sensíveis. Além disso, ao longo do texto são citadas algumas soluções adotadas com sucesso em casos reais.

## 1. INTRODUÇÃO

Nos dias de hoje, circuitos elétricos e eletrônicos são utilizados para as mais diversas funções, tais como a distribuição de potência, a comunicação de dados e a automação e controle de equipamentos e processos. A disseminação do uso integrado dessas funções impõe a operação de tais circuitos e dispositivos, muitas vezes, relativamente próximos uns dos outros, fato que pode gerar interferências indesejáveis e problemas operacionais severos, caso alguns cuidados importantes não venham a ser tomados. Tais interferências denominam-se *Interferências Eletromagnéticas (ou IEM)*, sendo comumente citadas como 'EMI', sigla oriunda do termo em inglês *Electromagnetic Interference*, e fazem parte de uma área da engenharia moderna com escopo de abrangência mais amplo, conhecida como *Compatibilidade Eletromagnética (CEM)*. Grosso modo pode-se definir sucintamente a CEM como "a capacidade de um determinado equipamento, sistema ou grupo de sistemas, de operar(em) adequadamente em seu ambiente eletromagnético, não estando susceptível(eis) aos ruídos eventualmente presentes, não afetando a operação dos demais equipamentos / sistemas e não provocando interferências em si próprio".

A probabilidade da ocorrência de interferências eletromagnéticas entre circuitos e dispositivos aumenta proporcionalmente à redução de suas dimensões, à sofisticação tecnológica e à diminuição

dos níveis dos sinais presentes, como também, à frequência (Hz) de tais sinais. Em subestações (e também em usinas elétricas) tais interferências podem constituir-se em problemas graves, por 3 razões básicas :

- os circuitos eletrônicos com tecnologia analógica ou digital operam com níveis de sinais elétricos muito baixos para processar e transmitir informações;
- as aplicações de energia elétrica utilizam níveis de tensão e corrente muito superiores, de modo que apenas uma pequena porção desta potência, se acoplada não intencionalmente a um circuito de sinal, pode provocar um erro de operação nos equipamentos / circuitos sensíveis;
- variações em campos elétricos e magnéticos são capazes de causar acoplamentos indesejáveis entre circuitos; geralmente, quanto maior a taxa de variação de tais campos, maior será o acoplamento.

Uma grande dificuldade em se lidar com o assunto *Compatibilidade Eletromagnética* é a ampla faixa de frequências (Hz) associada à própria operação dos circuitos eletrônicos e a fenômenos transitórios que podem ocorrer nos circuitos elétricos de maior potência que, em regime, operam em 60 Hz (frequência industrial no Brasil).

Também é importante ressaltar que os equipamentos eletrônicos, mesmo que cumprindo individualmente os requisitos comerciais de CEM (quanto à imunidade a ruídos), quando conectados e integrados, geralmente estarão perfazendo um sistema com nível de imunidade inferior ao de cada dispositivo isoladamente, o que se deve, principalmente, à presença dos cabos de interconexão. Essa situação pode agravar-se em ambientes tais como os das subestações, onde as diferenças entre os níveis de potência dos circuitos elétricos e eletrônicos são elevadíssimas.

Salienta-se que, pela complexidade e pela abrangência do assunto, esse trabalho não tem por objetivo estabelecer recomendações detalhadas e de caráter muito específico, mas sim apresentar uma compilação de informações extraídas de artigos e textos técnicos contemplando os aspectos mais gerais, os problemas em potencial e os cuidados

básicos a serem observados quanto à CEM em subestações e recintos elétricos.

## 2. INTERFERÊNCIAS ELETROMAGNÉTICAS EM SISTEMAS ELETRO-ELETRÔNICOS DE SUBESTAÇÕES – PANORAMA GERAL

### 2.1 CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES E TEORIA BÁSICA

O estudo de EMI's cobre, geralmente, sinais na faixa de frequência de 10 a 100 GHz (há autores que delimitam os domínios da CEM comercial na faixa compreendida entre DC, ou seja, 0 Hz, e 400 GHz). As condições necessárias à existência de problema relativos às interferências são :

- a existência de uma fonte de ruído eletromagnético;
- a existência de um receptor susceptível ao ruído eletromagnético (daqui por diante, será considerando que o receptor é um equipamento eletrônico sensível - *EES* - ou um sistema sensível);
- a existência de uma forma ou um caminho de acoplamento entre a fonte e o receptor.

Sendo assim, um problema de EMI pode ser modelado basicamente conforme indicado na Figura 1, a seguir.



Figura 1

Os modos de acoplamento entre uma fonte de ruído e um receptor (ou equipamento / sistema “vítima”) podem ser classificados em 4 grupos :

-acoplamento indutivo ou magnético : manifesta-se entre 2 circuitos / sistemas vizinhos; nesse caso, não existe ligação física entre a fonte e o receptor, e a EMI irradia-se pelo ar, geralmente por meio de antenas ou cabos como em sinais de rádio, TV, linhas de alta tensão, efeito corona, efeitos de chaveamentos, etc; o nível de acoplamento (tensão induzida) é proporcional à taxa de variação da corrente de ruído na fonte e à indutância mútua entre os circuitos, dependendo, também, da distância entre a fonte e o receptor.

-acoplamento capacitivo ou eletrostático : manifesta-se entre 2 circuitos / sistemas vizinhos; nesse caso, não existe ligação física entre a fonte e o receptor, e a EMI irradia-se pelo ar, por meio das capacitâncias existentes entre eles; o nível de acoplamento (tensão perturbadora e/ou corrente circulante no receptor) é proporcional à taxa de variação da tensão do ruído na fonte e à reatância capacitiva existente entre o circuito ruidoso e o circuito afetado, dependendo, também, da distância entre a fonte e o receptor.

-acoplamento resistivo ou por condução : nesse caso há uma ligação física entre o sinal gerado (EMI) e o receptor, por exemplo, uma impedância entre malhas de terra; o ruído decorre da circulação de correntes pelo sistema de aterramento, elevando o potencial referencial de terra do sistema receptor; por vezes, uma perturbação pode ser irradiada e captada em sequência por um cabo (que age como antena), sendo transmitida por condução até o receptor.

-acoplamento por irradiação eletromagnética : ocorre através de ondas eletromagnéticas propagantes pelo ar, que atingem o receptor (ou “vítima”) quando a distância entre este e o ponto de geração da irradiação é superior a  $1/6$  do comprimento da onda irradiada.

Quanto aos campos (elétrico ou magnético) responsáveis pela possível geração de interferências, a teoria básica a respeito do assunto introduz as seguintes classificações :

-Campo próximo – é o campo caracterizado quando a distância entre a fonte e o equipamento vítima for inferior à relação entre o comprimento de onda ( $\lambda = v / f$ , sendo  $v \approx 300 \text{ Km}/\mu\text{s}$  e  $f$  = frequência) do sinal emitido pela fonte perturbadora e a constante  $2\pi$ .

-Campo remoto – é o campo caracterizado quando a distância entre a fonte e o equipamento vítima for superior à relação entre o comprimento de onda do sinal emitido pela fonte perturbadora e a constante  $2\pi$ .

Com base nessas definições, caracterizam-se 3 tipos de campos de interferência :

-campo magnético – aquele em que a relação entre a densidade do campo elétrico E e a densidade do campo magnético H é inferior a cerca de 377 Ohms; sendo assim, um sistema de corrente elevada e de tensão baixa caracteriza-se como sendo uma fonte predominantemente de campo magnético.

-campo elétrico – aquele em que a relação entre a densidade do campo elétrico E e a densidade do campo magnético H é superior a cerca de 377 Ohms; sendo assim, um sistema de baixa corrente e tensão elevada caracteriza-se como sendo uma fonte predominantemente de campo elétrico.

-radiação eletromagnética – aquela em que a relação entre a densidade do campo elétrico E e a densidade do campo magnético H é constante e equivale a cerca de 377 Ohms; nessa situação, as ondas são denominadas “TEM” (*Transverse Eletromagnetic Waves*) ou ondas planas, e as componentes E e H propagam-se ortogonalmente.

O gráfico da Figura 2 resume as definições aqui citadas.

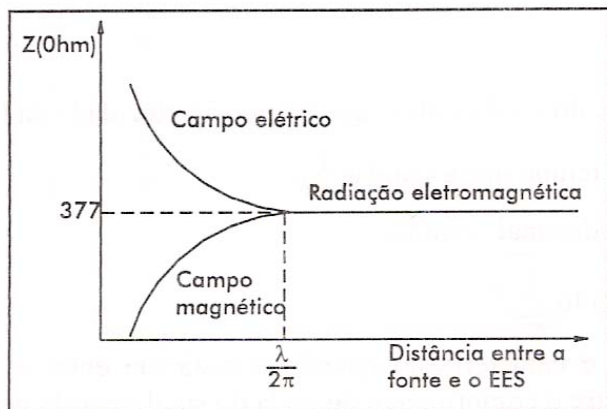


Figura 2

Salienta-se que a impedância  $Z$  (equivalente à relação  $E/H$ ) refere-se à impedância intrínseca do meio de propagação das ondas (considerado o espaço livre).

Algumas bibliografias específicas que abordam as questões da CEM consideram a divisão do problema das interferências em duas classes: *EMI's Externas* (ou inter-sistemas) e *EMI's Internas* (ou intra-sistemas). As *EMI's* externas abrangem as interferências eletromagnéticas que podem ocorrer em sistemas distintos, ou seja, entre fontes de ruído e sistemas de terceiros (por exemplo, entre uma linha de transmissão e um sistema eletrônico existente em uma edificação a ela adjacente). As *EMI's* internas contemplam as interferências passíveis de ocorrer entre sub-sistemas próximos ou relativamente próximos, inseridos em um mesmo sistema.

Os aspectos abordados daqui por diante neste trabalho referem-se a *EMI's* internas, considerado-se as influências possíveis entre sistema elétrico e sistemas eletrônicos existentes em uma subestação (ou usina) de energia elétrica.

## 2.2 PRINCIPAIS FONTES DE INTERFERÊNCIAS EM SUBESTAÇÕES

Além das possíveis interferências em equipamentos / circuitos sensíveis em decorrência dos acoplamentos citados no sub-item anterior, mesmo estando a SE em regime normal de operação, há uma série de outras possibilidades de geração de ruídos, também através das várias formas de acoplamento possíveis, perante a ocorrência de:

- ruídos eletromagnéticos irradiados a partir de arcos elétricos originados em chaveamentos nos circuitos de potência, cujos pulsos de corrente podem apresentar taxas de variação da ordem de algumas dezenas de Ampéres por nanossegundo; tais irradiações podem atingir os circuitos e equipamentos eletrônicos sensíveis, provocando a perda de programação e/ou da lógica de comando, ou mesmo danos físicos.
- manobras em circuitos de potência (tensão de transmissão ou distribuição) com elevado conteúdo de carga indutiva, podendo gerar pulsos de tensão

da ordem de 10 kV ou mais, a frequências de alguns kHz; essas sobretensões podem resultar na superação da tensão de restabelecimento transitória (TRT) do disjuntor manobrado, situação em que o equipamento não é capaz de extinguir o arco na primeira passagem da corrente pelo valor nulo, sendo originados várias reignições de arco nos contatos – consequentemente, criam-se picos de tensão com elevados valores e rápidas frentes de onda, gerando campos irradiados que podem interferir no funcionamento dos equipamentos eletrônicos sensíveis.

- manobras (abertura) de bancos de capacitores de média tensão, podendo ocorrer reignições de arco nos pólos do disjuntor, devido à diferença de potencial entre a tensão instantânea da rede logo após a abertura e a tensão armazenada no(s) capacitor(es) – havendo tais reignições, podem surgir fortes oscilações de tensão, com frequências elevadas e valores de pico que podem atingir, em casos mais críticos, até 5 pu da tensão nominal do sistema; além disso, os arcos produzidos entre contatos emitem campos eletromagnéticos de grande intensidade.
- correntes de falta fase-terra circulando pela malha de aterramento de força, podendo gerar, entre malhas de terra distintas, se não conectadas, ou entre pontos distintos da mesma malha, tensões da ordem de dezenas de kV's, com uma faixa de frequências compreendida entre dezenas de kHz a até alguns MHz; nessa circunstância, surgem capacitâncias de acoplamento no interior dos equipamentos eletrônicos, mais especificamente entre pontos aterrados e pertencentes a diferentes malhas de terra (terra da alimentação elétrica e terra de referência de sinal, por exemplo), ou entre pontos aterrados em diferentes locais da mesma malha, gerando a destruição de placas eletrônicas.
- abertura de disjuntores ou contatores perante a ocorrência de faltas, podendo gerar ruídos eletromagnéticos irradiados (decorrentes do surgimento de arcos elétricos) da ordem de 1 dezena de kV's, com uma faixa de frequências compreendida geralmente entre 10 kHz e algumas dezenas de MHz;
- funcionamento de intercomunicadores, que podem gerar campos com intensidade de até 10 V/m a 1 metro de distância, a frequências de até 460 MHz;
- funcionamento de lâmpadas de descarga, como as lâmpadas fluorescentes, a vapor de mercúrio e a vapor de sódio, utilizando reatores eletrônicos com filtros de radio-frequência pouco eficientes (ou sem filtros) para a supressão de ruídos de radio-interferência gerados por chaveamentos em seu circuito interno, permitindo a condução de tais ruídos para a rede de alimentação.

No que se refere aos campos potencialmente presentes em subestações, às fontes e às interferências típicas passíveis de ocorrência nesse tipo de instalação, algumas informações adicionais merecem destaque :

-além das emissões de alta frequência, chaveamentos elétricos causam oscilações de tensão de baixa frequência que também podem afetar a operação de equipamentos eletrônicos sensíveis.

-a injeção de correntes elevadas em malhas de aterramento de subestações (e a conseqüente ocorrência de alterações nos potenciais do(s) sistema(s) de aterramento) também pode originar-se a partir da ocorrência de descargas atmosféricas captadas pelo SPDA (sistema de proteção contra descargas atmosféricas) existente.

-na bibliografia específica relata-se um caso real em que os equipamentos eletrônicos de uma usina geradora de energia foram vítimas do funcionamento de rádios intercomunicadores na sala de controle e operação da central termelétrica, o que resultou na paralização de todas as turbinas a gás, em função da atuação de relés de proteção digitais, acionados indevidamente pela interferência irradiada.

Na Tabela 1 apresentam-se algumas correlações básicas entre regiões do espectro eletromagnético e a problemática da CEM, no âmbito das subestações e também dos sistemas elétricos industriais de maneira geral.

Tabela 1

Tab. 1 - O espectro da CEM							
Frequência	0 Hz	50 Hz	2500 Hz	20 kHz	150 kHz	30 MHz	1000 MHz
Comprimento de onda	6000 km		120 km	15 km	2 km	10 m	0,3 m
Usos	Redes CC	Áudio/sinais		Rádio, sensores, etc. de VLF	Rádio, sensores, etc. de LF/HF	Rádio VHF/UHF	
Principal modo de acoplamento	Condução	Condução (+ indução)		Indução (+ condução)		Indução	
Fontes	Alimentação em redes CA	Harmônicas nas redes	Faíscas, eletrônica de potência		Faíscas, eletrônica digital		

### 2.3 ALGUNS RESULTADOS DE MEDIÇÕES DE CAMPOS EM SUBESTAÇÕES DE MÉDIA E DE ALTA TENSÃO

A seguir, apresentam-se alguns resultados de medições realizadas em subestações (MT e AT), extraídos de bibliografias e artigos técnicos específicos, com o objetivo de apenas indicar algumas ordens de grandeza em determinadas situações.

Os valores são dados em kV/m (quilovolt por metro) para os campos elétricos e em  $\mu\text{T}$  (microTesla) para a

indução magnética ou densidade de fluxo magnético (B).

#### • Em subestações de AT

-Campos elétricos em SE de 138 kV, emanados por disjuntor em operação de abertura  
 .junto ao disjuntor : 20 kV/m  
 .a 50 cm do disjuntor : 3 kV/m  
 .a 1 m do disjuntor : 1 kV/m

-Em pátios de manobra de SE's, abaixo do barramento de AT, ao nível do solo (distância de aproximadamente 4 metros)  
 .perante falta fase-terra, SE de 345 kV : 9 kV/m e 95,5  $\mu\text{T}$ .  
 .perante abertura de seccionadora, SE de 138 kV : 9,3 kV/m e 43,6  $\mu\text{T}$ .  
 .perante abertura de seccionadora, SE de 500 kV : 16 kV/m e 208,5  $\mu\text{T}$ .

#### • Em subestações de MT (13,8 kV)

-Campo magnético junto a um transformador (1 MVA), operação do núcleo próximo ao ponto de saturação, carga alta : 125,6  $\mu\text{T}$  (campo de fuga).  
Obs. : a redução desse nível é proporcional ao cubo da variação da distância entre o transformador e o ponto de medição.

-Campo magnético na superfície da isolação dos cabos secundários do transformador (carga alta) : 300  $\mu\text{T}$ .

-Campo magnético a 2,5 metros dos cabos (carga alta) : 2  $\mu\text{T}$ .

Nota - As unidades do Sistema Internacional (SI) utilizadas para a medição de campos magnéticos são :

.intensidade de campo magnético H : A/m (Ampère por metro).

.indução magnética ou densidade de fluxo magnético B : Tesla (T).

A unidade A/m é comumente usada no meio industrial por relacionar diretamente as correntes aos campos magnéticos por elas gerados. A unidade Tesla (T) do Sistema Internacional, bem como a unidade Gauss (G) do Sistema CGS, mensuram as densidades de fluxo geradas pelos campos magnéticos, sendo mais comuns em medições no âmbito da CEM.

As relações para conversão entre tais unidades (ao ar livre) são :

$$1 \text{ A/m} = 1,257 \text{ microTesla} = 12,57 \text{ milliGauss}$$

### 3. POSSIBILIDADES DE CONTROLE E PREVENÇÃO DE EMI's E SURTOS EM EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS DE SUBESTAÇÕES E RECINTOS ELÉTRICOS

Objetivando a redução da magnitude de ruídos e sinais gerados de forma indesejável, e que podem afetar os equipamentos / sistemas eletrônicos sensíveis em subestações, é possível atuar reduzindo os níveis de emissão das fontes de perturbação, protegendo os receptores em potencial a fim de torná-los imunes às perturbações ou reduzindo / dificultando os acoplamentos entre as fontes e os equipamentos-vítima. Tais ações podem, obviamente, ser adotadas em conjunto.

As principais técnicas são implementadas através dos seguintes procedimentos :

#### • Melhoria / Adequação de Sistemas de Aterramento

O sistema atualmente indicado pela literatura específica como o mais adequado para um atendimento integrado às funções de aterramento de proteção para segurança e aterramento para referência de sinais consiste na utilização de 2 malhas de terra, obrigatoriamente conectadas. Dessa forma é possível escoar as correntes de alta e de baixa frequência eventualmente introduzidas em cada sub-sistema de aterramento, além de prover a desejável equalização de potenciais. Em última análise, a função primordial de uma malha de referência de sinal

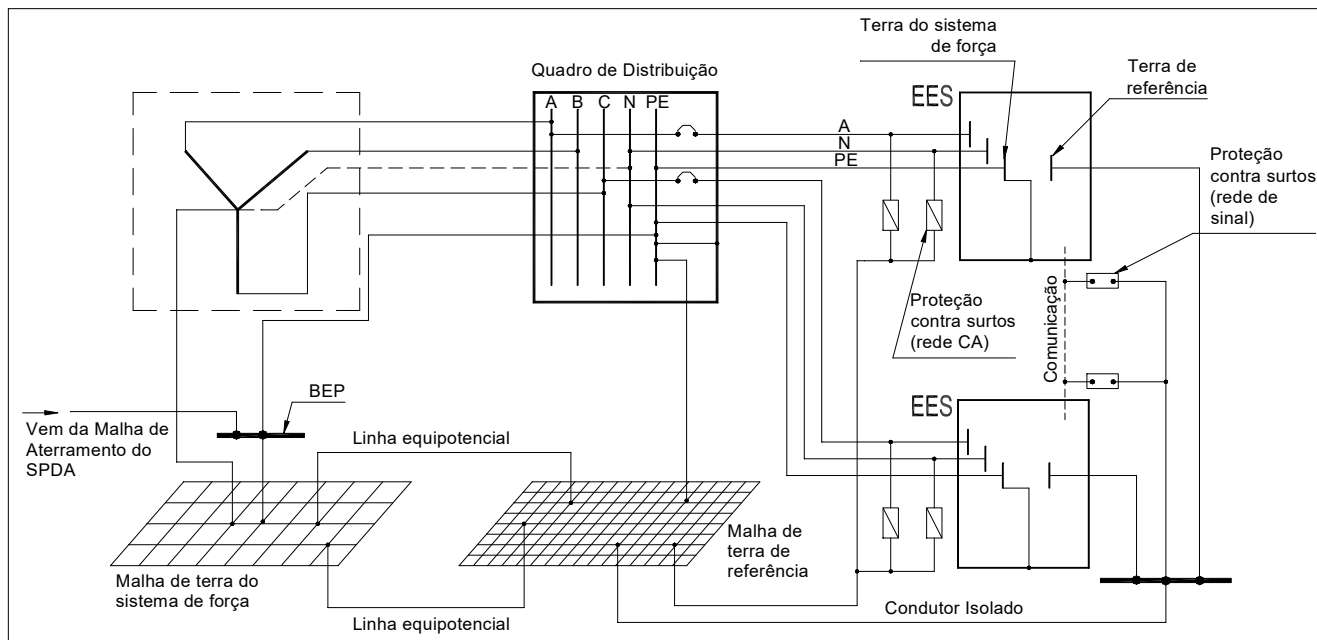
independentes. Vale lembrar que os circuitos de corrente contínua presentes nos equipamentos eletrônicos sensíveis empregados em SE's geralmente operam com tensões de  $-5/0/+5$ ,  $-12/0/+12$  ou  $-24/0/+24$  Volts, tendo como referência a barra de terra de sinal. Perante alterações no potencial dessa referência, os equipamentos poderão realizar operações inconsistentes, não operar ou mesmo danificar-se.

As Figuras 3, 4a e 4b ilustram essa configuração, considerando o esquema TN-S, normalizado pela NRB-5410/2004 da ABNT ("*Instalações Elétricas de Baixa Tensão*"), em que os condutores neutro e o condutor de proteção (PE) são separados ao longo da instalação, sendo eletricamente conectados apenas na origem da alimentação.

Obs.: Havendo proteção específica contra descargas atmosféricas (SPDA), recomenda-se a utilização de um terceiro sistema de aterramento para esta finalidade, porém, eletricamente conectado à barra de equalização de potenciais do sistema de força (barra localizada acima do nível do solo, para a qual converge o condutor ligado à malha de terra de força).

As duas malhas de terra devem ser conectadas preferencialmente em 2 pontos, por meio de ligações equipotenciais, afastando-se o perigo de se tocar em pontos aterrados de ambas, após um eventual rompimento de um condutor de interligação.

Figura 3

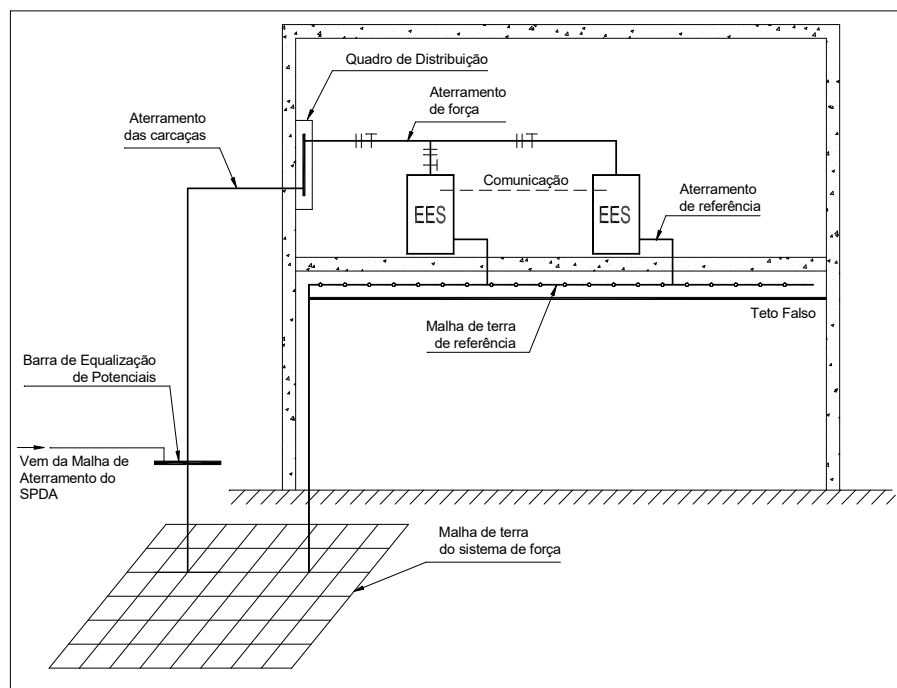


EES: Equipamento Eletrônico Sensível

consiste na eliminação (ou minimização substancial) da possibilidade de surgimento de diferenças de potencial entre as carcaças dos equipamentos eletrônicos sensíveis e seus barramentos de referência de sinal eletrônico, quando eletricamente

Como a malha de terra de referência de sinal não é responsável pela condução de correntes de curto-circuito fase-terra no sistema de força, seu dimensionamento segue critérios específicos, levando

Figura 4a

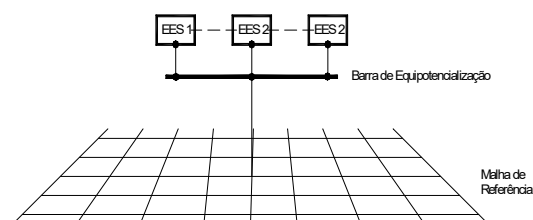


EES: Equipamento Eletrônico Sensível

em conta a circulação de correntes de surtos de alta frequência, eventualmente provocadas por indução eletromagnética (acoplamento indutivo) e por condução nas cablagens de alimentação elétrica e de sinais (dados), sendo drenadas pelos supressores de surto a serem obrigatoriamente previstos no sistema.

Quanto à filosofia de implementação de uma malha de referência, vale ressaltar a importância exercida por sua indutância ( $L$ ). No caso da ocorrência de surtos com componentes de frequências elevadas, sua reatância indutiva assumirá proporções muito mais significativas que sua resistência ôhmica. Sendo assim, as quedas de tensão entre pontos distintos da malha  $[\Delta V = L \cdot (\Delta i / \Delta t)]$ , e entre esta e outras malhas, poderão ser muito elevadas, agravando-se ainda mais em função da amplitude do surto de corrente injetado. Essa situação poderá causar danos irreversíveis aos

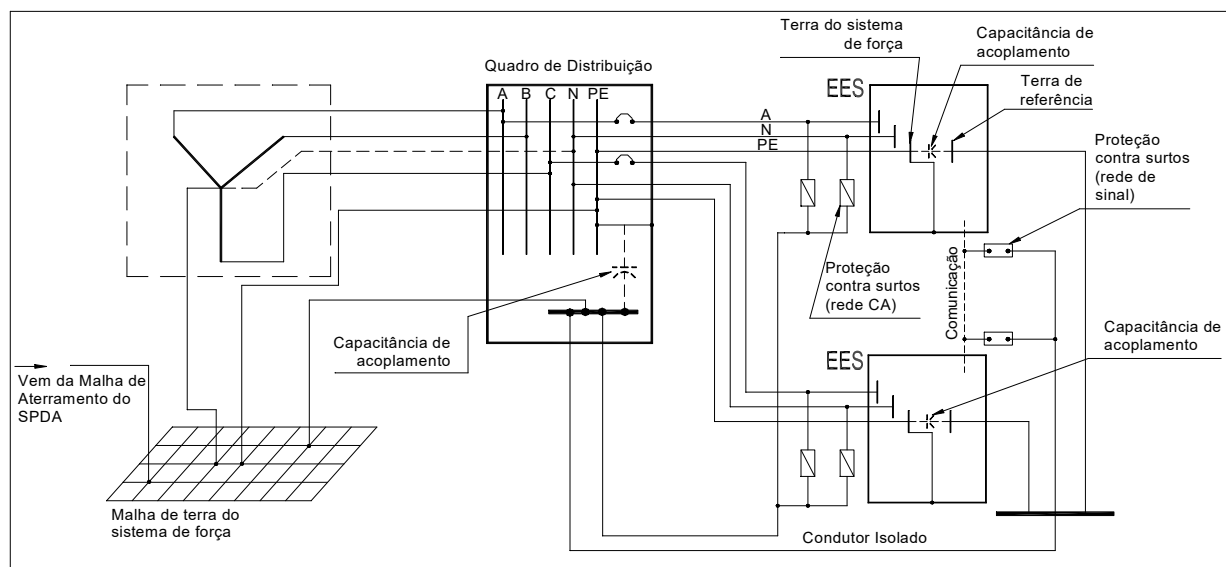
Figura 4b



equipamentos eletrônicos, devido ao surgimento de potenciais perigosos entre o terra de referência de sinal (eletricamente isolado das carcaças dos equipamentos) e o condutor terra da alimentação elétrica (conectado às carcaças), através da capacitância de acoplamento entre ambos (que, perante altas frequências, incorre em uma baixíssima reatância capacitiva). Daí a importância de se utilizar uma malha de referência com a mais baixa indutância possível, o que pode ser obtido com a redução do comprimento dos cabos e com a geometria dos mesmos.

Para melhor visualização dessas questões, a Figura 5 apresenta uma possível configuração para o sistema com a ausência da malha de terra de referência (mantido o circuito de referência de sinal) e sem a barra de equipotencialização (BEP), indicando os pontos de surgimento de possíveis capacitâncias de acoplamento perante a ocorrência de surtos de alta frequência na malha de terra de força (uma descarga atmosférica, por exemplo). Pode-se perceber que a superioridade técnica da configuração apresentada na Figura 3 relativamente ao esquema da Figura 5, é notória.

Figura 5



EES: Equipamento Eletrônico Sensível

A malha de terra do sistema de força (apropriada para a circulação de correntes à frequência industrial) deve ser dimensionada conforme os critérios geralmente já conhecidos no meio técnico e de acordo as normas aplicáveis. Nos sistemas solidamente aterrados (ou aterrados por impedância), uma de suas funções é, como se sabe, a de garantir a segurança, permitindo a circulação de correntes de falta para a sensibilização rápida das proteções contra sobrecorrentes. Entretanto, o dimensionamento da malha de terra de referência e de suas interligações é regido por conceitos específicos, conforme abordado no parágrafo anterior. São aplicáveis, em princípio, os seguintes critérios básicos :

-o "mesh" da malha (distância entre os condutores utilizados no reticulado) deve estar situado entre 1/10 (principalmente para cabos de seção circular, que apresentam maior indutância) e 1/20 (no caso da utilização de fitas condutoras, situação de menor indutância) do comprimento de onda do sinal conduzido esperado; na prática, tem-se adotado, como valor referencial, a frequência de 30 MHz para determinação do comprimento de onda ( $\lambda = v / f$ , sendo  $v \approx 300 \text{ Km} / \mu\text{s}$ ).

-as conexões das barras de terra de referência individual de cada equipamento eletrônico sensível à malha de referência devem ser feitas com o menor comprimento possível e é ideal que a máxima dimensão linear não seja superior ao afastamento entre os condutores que compõem essa malha; nessas conexões, devem ser utilizadas cordoalhas chatas de cobre (preferencialmente) ou alumínio, de pouca espessura e maior largura.

-os condutores da malha (cabos, fitas ou cordoalhas) devem ter seção nominal mínima de  $16 \text{ mm}^2$  se enterrados e não inferior a  $6 \text{ mm}^2$  se não enterrados; no caso da utilização de fitas, recomenda-se uma espessura mínima não inferior a 0,5 mm.

-em princípio, a malha de terra de referência deverá ter dimensões totais equivalentes ao ambiente onde estarão instalados os equipamentos eletrônicos sensíveis e, perante a presença de poucos equipamentos próximos, deverá estar localizada imediatamente abaixo destes, sendo a dimensão total equivalente a um quadrado com um mínimo de 1,5m de lado.

-a resistência de aterramento dessa malha não é um parâmetro importante, sendo muito mais significativos os aspectos relacionados à sua indutância, em função das frequências de interesse; todavia, a bibliografia específica recomenda uma resistência não superior a 30 Ohms.

-a malha poderá estar instalada diretamente enterrada, sob pisos elevados eventualmente existentes nos recintos em questão (sala de controle, sala de equipamentos, etc) ou embutida na laje de piso.

-se confeccionadas "in-loco", as conexões entre os condutores da malha deverão ser, preferencialmente, executadas com solda exotérmica, para minimização das resistências de contato; outra opção reside na utilização de mantas de aterramento pré-fabricadas disponíveis comercialmente, normalmente compostas por fios de cobre de pequenas dimensões e pequeno afastamento entre si.

-o condutor de interligação entre essa malha e a barra de terra (PE) do quadro elétrico local deverá ser isolado para a mesma classe de tensão dos condutores de alimentação elétrica dos equipamentos.

-finalmente, e como já mencionado anteriormente, a malha de terra de referência deverá ser obrigatoriamente conectada à malha de aterramento de força.

#### • Aumento das distâncias de separação entre fontes de ruído e receptores

Quanto maior for a distância física entre os equipamentos eletrônicos sensíveis e as potenciais fontes geradora de ruídos no sistema elétrico local, menor será a interferência, principalmente a irradiada. Esse afastamento pode ser obtido pela análise / alteração do lay-out da sala elétrica em questão, avaliando-se a maior distância possível para racks, bastidores e painéis relativamente à posição de chaves seccionadoras, disjuntores, transformadores, cablagens de força e condutores de descidas de SPDA's.

Alguns especialistas e consultores na área de CEM citam que os painéis eletrônicos críticos, ou seja, aqueles que abrigarem dispositivos digitais de importância crítica para a proteção ou operação dos sistemas, fundamentalmente quando previstos para instalação em locais potencialmente sujeitos a níveis elevados de perturbações eletromagnéticas, deverão, sempre que possível, estar afastados de, no mínimo :

- .15 m de barramentos, disjuntores e chaves do sistema de potência em alta tensão;
- .5 m de de barramentos, chaves, disjuntores, motores e retificadores;
- .3 m de painéis de baixa tensão.

Portanto, percebe-se que, já no projeto civil dos recintos elétricos e nas definições de lay-outs de subestações e usinas, é importante que os requisitos de CEM sejam considerados.

#### • Blindagens de Recintos Elétricos com Equipamentos Sensíveis

##### **Considerações Teóricas Preliminares**

Compreende-se por blindagem eletromagnética, o método de redução / atenuação dos campos que

incidem sobre uma instalação e/ou sobre seus componentes. A implementação de blindagens rigorosamente perfeitas é uma tarefa praticamente impossível. Equipamentos sensíveis, ainda que instalados no interior de um invólucro metálico de paredes espessas, necessitam ser eletricamente ligados a uma fonte externa qualquer através de condutores, através dos quais as emissões eletromagnéticas podem atingi-los. Aberturas necessárias para ventilação também deterioram as condições de blindagem.

As blindagens podem ser do tipo magnéticas (ferromagnéticas) ou condutivas.

*Blindagens Magnéticas*, confeccionadas em ferro fundido, aço ou níquel por exemplo, apresentam a propriedade de concatenar o fluxo magnético muito mais eficientemente que o ar, possibilitando que o fluxo resultante em seu interior seja menor que o fluxo contido no material utilizado para a blindagem, uma vez que tal fluxo tenderá a buscar o caminho de menor relutância. O grau de atenuação é função da permeabilidade magnética do material (característica que define a facilidade ou dificuldade de um material ser atravessado por linhas de campo magnético) e da espessura adotada. Tais blindagens podem ser utilizadas para atenuar campos magnéticos gerados por correntes contínuas (estacionários) ou correntes alternadas.

Nas *Blindagens Condutivas*, confeccionadas em cobre ou alumínio por exemplo, os fluxos magnéticos incidentes provocam a circulação de correntes parasitas (Foucault). Tais correntes, por sua vez, produzem fluxos que se opõem ao fluxo que as gerou (Lei de Lenz), atenuando sua intensidade, o que representa uma barreira a campos magnéticos. O grau de atenuação é função da condutividade elétrica do material (característica que define a facilidade ou dificuldade de um material ser percorrido por correntes elétricas) e da espessura adotada. Pelo seu princípio de funcionamento, tais blindagens podem ser utilizadas para atenuar campos eletromagnéticos gerados apenas por correntes alternadas.

A espessura a ser adotada em ambos os tipos de blindagem, dependerá do material e do grau de atenuação desejado em cada projeto.

Se uma determinada blindagem se destina primordialmente à atenuação de campos magnéticos, a escolha recairá sobre as blindagens magnéticas. Se, no entanto, há a necessidade de atenuação de campos elétricos, é aconselhável a adoção das blindagens condutivas, independentemente da frequência do campo incidente. Alguns especialistas recomendam o uso de materiais magnéticos para a blindagem de campos magnéticos com frequências de até 100 kHz e o uso de materiais com boa condutividade para a blindagem de campos elétricos com qualquer frequência e de campos magnéticos com frequência acima de 100 kHz.

Geralmente as atenuações obtidas com o uso de blindagens são expressas em dB (decibéis), conforme a seguinte expressão :

$$\text{Atenuação} = 20 \log_{10} [ E_e / E_i ] \quad (\text{dB})$$

ou

$$\text{Atenuação} = 20 \log_{10} [ H_e / H_i ] \quad (\text{dB})$$

onde :  $E_e$  e  $H_e$  são, respectivamente, as intensidades de campo elétrico e magnético no exterior da blindagem e  $E_i$  e  $H_i$  as intensidades em seu interior.

O *Bel* é uma unidade logaritmica utilizada para se expressar uma relação entre duas grandezas de mesma natureza. Para que se possa perceber a comparação entre a relação de grandezas físicas e os valores em decibéis, pode-se verificar a Tabela 2. Quanto melhor for a blindagem, maior será o valor da atenuação em dB, ou seja, a eficiência de uma blindagem é determinada pelo nível de atenuação obtido.

Tabela 2

Razão entre grandezas	Atenuação dB
$10^6$	120
$10^5$	100
$10^4$	80
$10^3$	60
$10^2$	40
10	20
5	14
2	6
1	0

Como exemplo, se uma medição de campo eletromagnético realizada em um determinado ambiente antes e depois da instalação da blindagem, indicar uma relação de 10 / 1, essa atenuação equivalerá a 20 dB.

Uma blindagem eletromagnética também pode ser avaliada com base no quociente entre as densidades de campo magnético sobre ela e em seu interior, ou no quociente entre a intensidade de campo elétrico ou de campo magnético no exterior e no interior da mesma, respectivamente. A tais relações, dá-se o nome de *Fator de Blindagem* (melhor blindagem = maior fator de blindagem).

As radiações eletromagnéticas têm a propriedade de penetrar nas paredes metálicas uma blindagem magnética. A essa característica dá-se o nome de *Profundidade de Penetração* ( $\delta$ ), definida pela seguinte expressão :

$$\delta = \frac{1}{(f \cdot \pi \cdot \mu_r \cdot \sigma_r)^{1/2}}$$



Como se percebe, a profundidade de penetração será inversamente proporcional aos seguintes parâmetros : frequência da radiação incidente, permeabilidade magnética do material em relação à permeabilidade do vácuo ( $\mu_{\text{vácuo}} = 1$ ) e condutividade do material relativamente à condutividade do cobre ( $\sigma_{\text{cobre}} = 5,8 \times 10^7$  Siemens/metro).

A atenuação proporcionada por uma blindagem contempla efeitos relativos às perdas por reflexão de parte dos campos ou radiação que a atinge, a efeitos de perdas por absorção no interior da própria blindagem (transformação em calor) e às perdas por múltiplas reflexões que ocorrem no interior da mesma, entre suas faces (também gerando calor). O cálculo dessas parcelas de atenuação é por vezes complexo, sendo abordado detalhadamente na bibliografia específica. O processo de cálculo de cada parcela de atenuação envolve fórmulas específicas que consideram, cada qual, o tipo de campo a ser levado em conta no ponto de localização da blindagem (magnético, elétrico ou radiação eletromagnética).

A eficiência de uma blindagem na prática é afetada por inúmeros fatores, dentre os quais, a presença de aberturas e juntas, que reduzem, fundamentalmente, a capacidade de bloqueio de campos magnéticos. Um grande número de pequenos orifícios produz uma menor perda de eficiência em comparação ao efeito de um orifício maior, de área total equivalente à soma dos orifícios menores. Tratando-se de um recinto, as aberturas e orifícios são obrigatórias para as portas de acesso, janelas, ventilação e para passagem de dutos, etc, o que impõe critério na análise e definição das blindagens.

### **Blindagens em SE's e Recintos Elétricos**

Há muitos aspectos a serem analisados na concepção e projeto de blindagem de recintos elétricos que contenham equipamentos eletrônicos sensíveis em uma subestação. A previsão das possíveis frequências perturbadoras deve ser objeto de estudos minuciosos, sendo altamente recomendável confiar tais procedimentos a especialistas da área.

Embora geralmente o tema requeira análises caso a caso, algumas informações e recomendações práticas indicadas por projetistas (com foco em interferências de médias e altas frequências geradas externamente aos recintos dotados de equipamentos sensíveis) são descritas a seguir :

-geralmente, no caso de perturbações passíveis de serem produzidas em ambientes externos de subestações / usinas de energia elétrica (por descargas atmosféricas, chaveamentos de potência, etc), a faixa de frequências de tais surtos situa-se entre 10 kHz e 500 kHz (alguns autores citam frequências de até 1 GHz).

-embora a determinação de tipos e configurações de blindagem de recintos sejam funções das frequências

a serem atenuadas e dos níveis de atenuação pretendidos, projetos dessa natureza geralmente consideram atenuações da ordem de 20 a 60 dB, ou seja, atenuações mínimas de 10 vezes e máximas de 1000 vezes.

-deve-se adquirir as telas (reticulados) para blindagem com as dimensões e especificações indicadas pelo projeto, aplicando / fixando as várias seções sobre as paredes, lajes, vigas e colunas / pilares do ambiente, interconectando-as através de barras metálicas, fitas metálicas de boa condutividade ou por soldagem.

-após devidamente posicionadas / fixadas, as telas devem ser cobertas com cerca de 5 cm de alvenaria.

-se as necessidades arquitetônicas impuserem a previsão de janelas convencionais em função dos requisitos estéticos das fachadas do recinto, deve-se preparar, junto a elas, janelas mais internas revestidas com blindagem de tela com as mesmas características da tela utilizada nas paredes; essas janelas deverão fechar pelo lado de dentro, sobre as janelas convencionais.

-as janelas e demais aberturas do ambiente deverão estar solidamente conectadas ao restante da blindagem através de conexões ou molas articuladas, para garantia de continuidade elétrica.

-blindagens contra sinais de frequência na faixa entre 10 kHz e 5 MHz são de implementação relativamente fácil; para sinais com frequências acima do limite máximo aqui mencionado, deve-se ter um cuidado especial com fendas e aberturas em geral, uma vez que, para aberturas das ordem de um centésimo do comprimento da onda irradiada (60 cm para  $f = 5$  MHz), ainda existe a possibilidade de penetração de campos.

-em casos mais críticos, para os quais sejam previstas elevadas intensidades de campos magnéticos, é prudente evitar aberturas a abertura de janelas.

-para intensidades de campo magnético mais modestas, pode-se utilizar janelas com vidro duplo, instalando entre elas uma tela metálica a ser adequadamente interligada à blindagem das paredes;

-um procedimento muitas vezes adotado em casos práticos para melhorar a eficiência da blindagem em locais de aberturas consiste em aplicar, em duplicidade, telas metálicas com "mesh" não superior a 1,5 mm.

-também é possível utilizar lâminas flexíveis de bronze, por exemplo, nas aberturas de portas e janelas, interligando-as às blindagens previstas para as paredes.

-devem ser aplicadas blindagens a todas as aberturas utilizadas para a transição interno-externo de cabos elétricos e de comunicação.

-a escolha do material metálico a ser adotado dependerá dos campos incidentes e do nível de atenuação desejado; sendo assim, materiais magnéticos como o aço, o ferro fundido e o níquel podem ser adotados para a blindagem contra campos magnéticos; materiais como o cobre e o alumínio, devido à sua alta condutividade, devem ser usados para a blindagem contra campos elétricos.

O Gráfico da Figura 6 apresenta curvas elaboradas para análises de atenuação de campos magnéticos de uma determinada subestação, consideradas telas de blindagem em 3 configurações e uma faixa de freqüências de 1 kHz a 100 MHz.

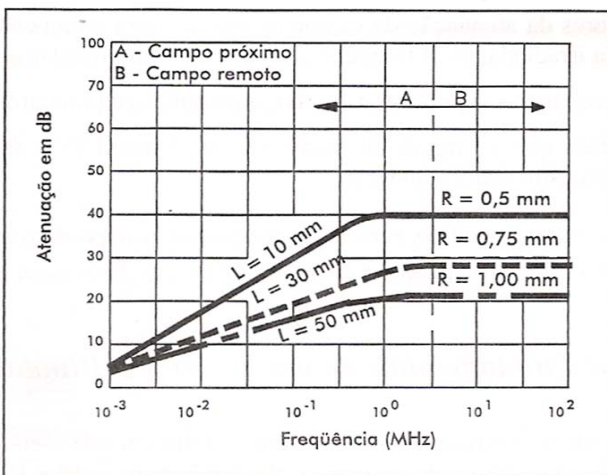


Figura 6

Observando-se o gráfico, conclui-se que, nesse caso :

-a atenuação se eleva com o aumento da freqüência do campo magnético incidente até uma freqüência de aproximadamente 1 MHz em todos os casos, embora com taxas de crescimento diferenciadas;

-para freqüências acima de 1 MHz, a atenuação torna-se constante em todos os casos, porém, estabilizando-se em patamares diferentes;

obs. : as duas observações acima podem ser explicadas em parte, e grosso modo, pelo fato de que, para distâncias próximas da interseção entre as regiões de *campo próximo* e *campo remoto*, e a partir desse ponto, o acréscimo da freqüência provoca a redução da parcela de atenuação por reflexão (considerada uma onda *TEM*) e o aumento da parcela de atenuação por absorção (efeito aplicável a ondas *TEM* e a campos magnéticos e elétricos).

-com a diminuição da menor porção formadora do reticulado ("mesh"), a atenuação aumenta; isso se

explica pelo fato de que, para uma onda a uma dada freqüência, o reticulado de menores dimensões em relação ao comprimento de onda, será capaz de proporcionar uma melhor blindagem.

No caso dos campos magnéticos de baixa freqüência (60 Hz, por exemplo) originados proximamente aos equipamentos sensíveis, as blindagens são problemáticas, podendo ser obtidas geralmente com chapas espessas de alta permeabilidade magnética ou alta condutividade elétrica, soluções muitas vezes inviáveis na prática. No caso das subestações e recintos elétricos, provavelmente a melhor solução será estudar novos arranjos físicos para os equipamentos, buscando afastá-los o máximo possível das fontes geradoras de interferência.

#### • Supressão de Surtos Conduzidos

A supressão de surtos (proteção contra sobretensões) objetiva a atenuação de ruídos conduzidos entre diferentes partes de um sistema, por meio de condutores metálicos. Os dispositivos utilizados para esse fim são filtros / supressores de surtos com capacidade suficiente para absorver surtos com alto conteúdo energético.

Esses dispositivos são especialmente recomendados para a proteção de equipamentos eletrônicos sensíveis contra surtos induzidos por descargas atmosféricas (e por operações de chaveamento) nas cablagens de alimentação elétrica, de telefonia e de sinais. São nos circuitos de alimentação CA dos equipamentos bem como nos estágios de entrada e saída de circuitos de comunicação de dados, e dimensionados / especificados com base nos níveis de proteção requeridos e nos níveis de corrente / energia teoricamente esperados.

O ponto de instalação de um supressor é fundamental para uma proteção eficiente. Embora seja prática comum a utilização de supressores no interior dos quadros de alimentação elétrica, vale ressaltar que os melhores níveis de proteção serão obtidos quando os mesmos estiverem posicionados / ligados o mais próximo possível dos equipamentos a proteger. Isso se deve aos seguintes motivos :

-um surto irradiado que atinja uma cablagem em um ponto situado entre o supressor e o equipamento irá se propagar nas duas direções, podendo atingir o equipamento em um tempo inferior ao tempo necessário para atingir o supressor (vale lembrar, com base na teoria de transitórios eletromagnéticos, que a velocidade de propagação de um surto depende das características físicas do meio de propagação e, nesse caso, por se tratar do mesmo meio, o surto atingirá primeiramente quem estiver mais próximo do ponto onde a perturbação se originou).

-alguns tipos de supressores de surto são unidirecionais; estando afastado do equipamento a

proteger, um supressor desse tipo poderá receber o curto pela “retaguarda”, não promovendo a atenuação conforme suas características nominais.

-estando o supressor junto ao equipamento eletrônico, qualquer surto que se propagar pela cablagem sempre atingirá primeiramente o supressor; o equipamento receberá apenas uma parcela da energia da onda impulsiva, o que aumenta sensivelmente a eficiência da proteção.

A interligação de equipamentos através de longos cabos de comunicação é um dos pontos que mais apresentam problemas de proteção no ambiente de uma subestação. Geralmente, e erroneamente, utiliza-se apenas um supressor em uma das extremidades dos cabos de comunicação de dados. Nessa situação, apenas um dos equipamentos interconectados estará protegido e o outro estará totalmente susceptível a surtos que incidem e quem são propagados por condução em uma rede de comunicações.

Outro ponto importante a ser observado é o local de conexão dos cabos de drenagem (aterramento) de surtos, a partir dos supressores. Nessa situação, torna-se mais uma vez fundamental a presença de uma malha de equipotencialização (malha de referência já abordada anteriormente – seção “*Melhoria / Adequação de Sistemas de Aterramento*”), onde tais cabos deverão ser conectados. A presença desse elemento de equipotencialização evita que componentes internos aos equipamentos sensíveis estejam submetidos a diferenças de potencial mais elevadas quando da ocorrência de surtos de altas frequências. Ressalta-se ser importante que os cabos de interligação dos supressores à malha possuam a menor indutância possível. Isso pode ser obtido com percursos tão curtos quanto possível e com a utilização de cordoalhas chatas ao invés de cabos de seção circular. As conexões, sempre que possível deverão ser soldadas ou rigidamente aparafusadas.

Geralmente recomendam-se as seguintes configurações de proteção :

-circuitos de baixa tensão conectados a equipamentos sensíveis : 1 ou 2 varistores de óxido metálico devidamente coordenados ou varistores associados a diodos Zener.

-circuitos de sinal, controle, comunicações : combinação de varistores e centelhadores a gás;

-serviços auxiliares, barramentos principais de CA e CC : varistores ou capacitores de surto.

Nos circuitos de força pode ser interessante instalar, por exemplo, fusíveis em série com os dispositivos supressores de surto, para evitar uma possível interrupção de energia caso haja um curto-circuito no sistema de supressão (nesse caso o circuito de força continuará energizado, porém, sem proteção contra surtos até que o problema seja sanado).

## • Redução das áreas de “loops”

Uma importante medida a ser tomada como prevenção contra o surgimento de tensões elevadas em diferentes pontos dos equipamentos sensíveis consiste na minimização dos “loops” de elevados diâmetros (ou distanciamentos) entre circuitos de sinal e cablagens de força. Sempre que houver um “laço” aberto submetido a uma indução eletromagnética (por acoplamento indutivo), surgirá nos terminais desse laço uma tensão proporcional à sua área e à taxa de crescimento ( $di/dt$ ) da corrente geradora da perturbação. Essa situação é ilustrada por meio da Figura 7.

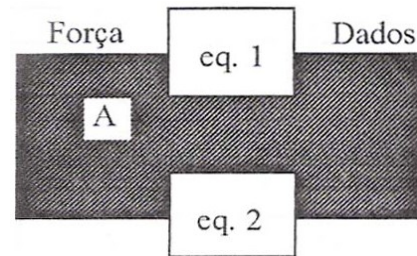


Figura 7

Como soluções para evitar / minimizar esse problema, principalmente no caso de cablagens não blindadas, podem-se adotar blindagens por dutos metálicos (ver seção “*Blindagens*”) em ambas as partes do “laço” ou a

redução da área entre os feixes de cabos, conforme indicado na Figura 8. Na segunda hipótese, deve-se respeitar uma distância mínima entre os circuitos de força e sinal, evitando-se as interferências entre ambos por acoplamento indutivo (ver seções “*Otimização da Rota de Condutores*” e “*Segregação de Vias para Cabos*”).

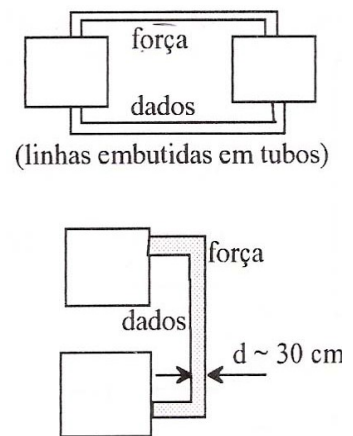


Figura 8

Problemas de interferência decorrentes da presença de “loops” também podem surgir quando há laços de maiores dimensões entre os cabos de força ou de sinal e seus respectivos condutores-terra (ou de referência), sendo desejável, sempre que possível, instalar os condutores de aterramento próximos aos circuitos de alimentação elétrica e de sinal a eles associados.

Um outro problema potencial de mesma trata-se da possibilidade de formação de “loops” de terra em circuitos de sinal. Esse problema pode ocorrer quando dois sub-sistemas estão aterrados em diferentes malhas de aterramento ou quando as conexões são feitas na mesma malha, porém, quando esta é submetida a diferenças de

potencial entre tais pontos (devido, por exemplo, à circulação de correntes provocadas por ruídos). Essa diferença de potencial atuará como uma fonte de tensão e provocará a circulação de correntes de modo-comum, conforme indicado na Figura 9.

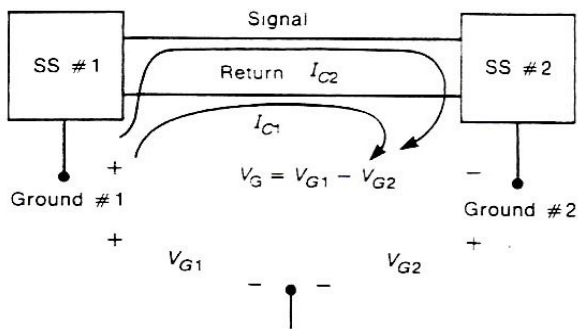


Figura 9

As bibliografias específicas abordam algumas formas de lidar com esse problema, tais como a utilização de filtros bloqueadores de ruídos de modo comum, acopladores óticos e transformadores isoladores. Adicionalmente, a adoção de uma configuração de aterramento que possibilite uma eficiente equalização de potenciais, associada à racionalização de percursos de cablagens, pode minimizar esse tipo de problema.

#### • Otimização de rotas e segregações para vias de cabos

Os condutores que transportam os sinais analógicos, digitais e cabos de força não deverão estar agrupados em um mesmo duto, principalmente os não blindados.

Uma das medidas para minimização / eliminação de EMI's adotada em projetos específicos e detalhada em textos técnicos e memoriais descritivos de projetos, refere-se à segregação das cablagens (no interior e no exterior dos recintos abrigados das SE's) de acordo com a função dos cabos. Os "ambientes de segregação" geralmente adotados são constituídos por calhas / bandejas metálicas tampadas ou eletrodutos metálicos independentes. Esses dutos deverão estar convenientemente aterrados em vários pontos (intervalos entre conexões de aterramento : 5 a 10 metros).

Alguns exemplos de cablagens que devem ser conduzidas em dutos separados são :

- .Cablagem eletrônica específica : cabos de controle de baixa energia e fibras óticas (essas apenas por uma questão de organização da instalação e proteção mecânica);
- .Cabos de controle CC ou CA de, por exemplo, 125 Vcc e 220 Vca;
- .Cabos de iluminação e força;
- .Cabos isolados de média tensão;
- .Cabos de telecomunicações.

Uma alternativa de mais baixo custo passível de adoção quando da impossibilidade de utilização de dutos independentes para cabos com funções distintas consiste na utilização de calhas metálicas compartimentadas, dotadas de septos (separações) internos também metálicos; porém, convém que essa alternativa esteja restrita apenas a cabos de força de circuitos de baixa tensão / potência (inferior a 5 kVA) e a cabos de lógica de sistemas considerados não vitais.

#### • Especificação de calhas metálicas / bandejas para cabos

Afim de comparar o desempenho de calhas fabricadas com diferentes materiais quanto ao surgimento de interferências em circuitos de sinal, foram realizados ensaios laboratoriais (conforme a norma MIL-STD-461/462) em 3 tipos de dutos disponíveis comercialmente, fabricados em PVC, chapa de aço galvanizado e chapa de alumínio extrudado. Esses ensaios consistem, basicamente, em fazer circular uma corrente elétrica em diferentes frequências por um cabo de força (simulando-se a introdução de um surto) e medindo-se a corrente resultante (induzida) em um cabo de sinal não blindado posicionado dentro e fora de um duto, porém, sempre à mesma distância do cabo de força. O mesmo ensaio é repetido invertendo-se os papéis, ou seja, injetando surtos no cabo de sinal e verificando os efeitos no cabo de força posicionado dentro e fora do duto.

Demonstrou-se em tais testes, que as calhas de alumínio proporcionam uma blindagem magnética mais eficaz em ambas as situações, sendo bem mais pronunciadas que com o aço ou o PVC (obviamente) principalmente para o caso dos efeitos medidos sobre o cabo de sinal. Essa situação decorre do fato de que quanto maior é o produto da permeabilidade magnética relativa pela condutividade relativa do material ( $\mu_r \cdot \sigma_r$ ) que constitui a blindagem, maior é a atenuação do ruído por efeito de absorção no material.

Além disso, os dutos de alumínio apresentam vantagens adicionais, tais como um menor peso que os dutos de chapa de aço e melhor resistência mecânica e química que os dutos de PVC.

Todos esses fatores agregados podem compensar o (provavelmente) maior investimento inicial.

#### • Utilização de Transformadores de Isolação

A utilização de um transformador de isolamento, com relação de transformação 1:1, no circuito de alimentação elétrica geral para os equipamentos sensíveis, dotado de blindagem eletrostática (devidamente aterrada), pode ser uma medida eficaz para atenuar a transferência de perturbações conduzidas oriundas no primário.

Em se tratando de bloqueio de ruídos, a principal ação de um transformador é desempenhada por sua indutância de dispersão, cuja reatância atua como um filtro, dificultando a transferência de sinais conduzidos de altas frequências e atenuando harmônicas eventualmente presentes. Todavia, para minimizar a possibilidade de transferência de algum ruído através das capacitâncias de acoplamento entre primário e secundário, os trafo-isoladores são dotados de blindagens eletrostáticas, através das quais os ruídos de modo-comum fluem para a terra.

Uma característica adicional desse sistema reside no fato de que o usuário pode definir uma nova referência de terra, aterrando o neutro do secundário (ligação em estrela, se na configuração trifásica) e tornando-o independente do neutro do primário. Dessa forma, as tensões secundárias para a terra são estabilizadas e controladas, favorecendo a proteção aos equipamentos eletrônicos sensíveis.

#### • Proteções contra descargas atmosféricas

No que tange às descargas atmosféricas, geralmente consideram-se duas situações distintas em subestações: o pátio de alta tensão (no caso das SE's ao tempo) e o prédio de controle / supervisão, onde encontram-se instalados os equipamentos eletrônicos sensíveis. Simplificadamente, pode-se afirmar que a forma de avaliação em ambos os casos é similar, diferindo apenas a forma de se definir a corrente crítica de blindagem. Para os equipamentos de alta / média tensão tal corrente é definida em função do NBI (Nível Básico de Impulso atmosférico) por eles suportada. Para os prédios, geralmente adota-se o valor de 5 kA.

Considerando-se a existência de equipamentos sensíveis, a proteção dos prédios deverá contemplar uma Gaiola de Faraday composta por cabos condutores dispostos em forma de malha, com dimensionamentos gerais (inclusive quanto ao aterramento) conforme a norma NBR-5419/2001 da ABNT ("*Proteção de Estruturas contra Descargas Atmosféricas*"). A blindagem oferecida pela própria estrutura das ferragens do concreto armado (assunto já amplamente abordado em artigos técnicos e na bibliografia específica) poderá ser utilizada (preferencialmente quando projetada prevendo-se tal função); porém, especialistas recomendam a confecção da gaiola externa adicionalmente, como forma de incrementar os níveis de proteção.

De qualquer modo, e considerando-se que um SPDA destina-se primordialmente à manutenção da integridade física de uma edificação, esses procedimentos não anulam a necessidade de previsão (obrigatória) de proteções contra surtos eventualmente introduzidos nas linhas elétricas e de comunicação por acoplamento indutivo, decorrentes de descargas atmosféricas (ver seção "*Supressão de Surtos*").

#### • Utilização de fibras óticas

Em situações mais críticas, principalmente em áreas externas de subestações, nas quais os circuitos de sinais de comunicação poderão estar bastante próximos de equipamentos e circuitos de potência, a utilização de fibras óticas pode tornar-se atrativa (ou mesmo imperativa), uma vez que esse sistema apresenta imunidade a EMI's. Também é importante salientar a confiabilidade e precisão obtida na transmissão de informações mesmo a distâncias muito longas e em uma faixa de frequências extremamente ampla.

Entretanto, em que pesem as vantagens, há também desvantagens a serem consideradas relativamente à utilização de condutores metálicos. Em que pese a redução dos preços com o passar do tempo, a instalação de sistemas com fibras óticas ainda é mais onerosa, requerendo maior preparação e mão-de-obra mais especializada. As fibras não são flexíveis e de acomodação física tão fácil como os cabos metálicos e as sistemáticas de instalação são geralmente delicadas. Além disso, como na grande maioria dos casos os sinais óticos devem ser reconvertidos em sinais elétricos nos pontos de recepção, o hardware necessário para essa função encarece o sistema e degrada um pouco sua confiabilidade geral. Apesar de tais desvantagens, pode-se considerar que as fibras óticas constituem-se em uma boa alternativa quando se requer elevada confiabilidade na transmissão de dados a distâncias de 20 metros a 2 quilômetros, fundamentalmente em ambientes potencialmente hostis sob o ponto de vista da CEM.

#### • Tecnologia emergente : Concreto Condutivo

O *Concreto Condutivo*, produto emergente já disponibilizado na América do Norte em escala comercial, tem sido utilizado em países com invernos rigorosos, nos quais torna-se necessário o rápido derretimento da neve acumulada em rodovias, pontes, coberturas de edificações e calçadas públicas, por exemplo. Essa função é obtida através de sua energização com baixas tensões, provocando seu aquecimento por meio da circulação de corrente elétrica em sua estrutura interna.

Basicamente, o material é obtido com o uso de cimento agregado a outros insumos condutivos tais como fibra de carbono, grafite e "coque-brezze" (partículas de carvão mineral de reduzida granulometria), de modo a se perfazer uma malha condutora contínua. Como resultado, obtém-se um concreto mecanicamente resistente (mesmo com apenas 70% da massa específica do concreto convencional) e com alta condutividade elétrica. Portanto, suas características podem aliar as necessidades da construção civil a requisitos de CEM em instalações internas próximas a fontes potenciais de geração de interferências eletromagnéticas, o que o torna uma alternativa

passível de análise particularmente para utilização em recintos elétricos e salas de controle e de equipamentos de automação.

Os fabricantes citam, baseados em vários testes realizados em amostras de concreto condutivo confeccionadas em painéis pré-moldados com espessura da ordem de apenas 10 a 15 cm, que o material pode proporcionar uma eficiência de blindagem magnética (atenuação) da ordem de 10 a 36 dB para uma elevada faixa de frequências, sendo mais eficaz que as chapas de aço para frequências acima de 25 MHz.

Portanto, tudo indica que, em um futuro próximo, a utilização desse tipo de material poderá ser cogitada, também no Brasil, para a construção / blindagem de recintos fechados em subestações e usinas, tais como as salas elétricas e os compartimentos destinados à instalação de equipamentos eletrônicos sensíveis.

#### **4. CONCLUSÕES**

Cada vez mais, à medida em que as aplicações da eletrônica e da informática se expandem, os equipamentos sensíveis são adotados para as funções de proteção, controle / automação, monitoramento e comunicação em subestações, usinas e demais recintos elétricos, estando expostos a surtos eletromagnéticos irradiados e conduzidos que podem incorrer em seu mau funcionamento ou até mesmo em sua destruição.

Esse trabalho buscou sistematizar uma série de informações obtidas em artigos e livros técnicos abordando aspectos que envolvem a Compatibilidade Eletromagnética em subestações de energia, fundamentalmente no que se refere às possíveis interferências em equipamentos eletrônicos sensíveis nelas instalados, bem como algumas medidas passíveis de adoção para a minimização de tais problemas.

O assunto é vasto, complexo, ainda polêmico e não completamente equacionado em todas as suas peculiaridades.

De qualquer modo, espera-se que as informações aqui apresentadas possam ser úteis no sentido de esclarecer as bases e os principais aspectos a serem avaliados com maiores detalhes quando da realização de projetos e procedimentos de adequação objetivando a melhoria dos níveis de CEM em instalações dessa natureza.

## FONTES DE CONSULTA / PESQUISA

- [1] Marcelo C. V. Martins – COPESP – Ministério da Marinha – “*Interferência Eletromagnética em Ambientes Industriais*” – Revista Eletricidade Moderna – Agosto / 1994.
- [2] Colin Hargis – Control Technics Plc – Reino Unido (tradução do Eng. Prof. Hilton Moreno) – “*CEM : Guia Prático para o Projetista e Instalador de Sistemas Elétricos*” – Revista Eletricidade Moderna – Maio / 2000
- [3] Guilherme A. D. Dias e Marcos Telló – PUC-RS – “*Compatibilidade Eletromagnética em Subestações de Alta Tensão*” – SNPTEE-1999 e Revista Eletricidade Moderna – Maio / 2000
- [4] Antônio Carlos Passos Sartin e Cezar José Sant’Anna – CTEEP (Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista) – “*Compatibilidade Eletromagnética em Usinas e Subestações*” – SNPTEE – 2001
- [5] Sergio T. Sobral (ST & SC Serviços Técnicos Ltda) David S. Rezende e José Eduardo D. Olesko (COPEL – Companhia Paranaense de Energia) – “*A Técnica de Disposição de Cablagem em Chicote para Reduzir os Ruídos de Modo Comum e Diferencial – Resultados de Medições*” – SNPTEE – 2001
- [6] José Osvaldo S. Paulino, Moacir Souza Jr. e Marisa Lages Murta – UFMG (Universidade Federal de Minas Gerais) – “*Técnicas de Blindagem de Campos Magnéticos de 60 Hz*” – Revista Eletricidade Moderna – Agosto / 2000
- [7] Sergio T. Sobral e S. C. Sobral – ST & SC Serviços Técnicos - “*Tecnologia de Blindagens em Instalações de Usinas, Linhas e Subestações*” – Revista Eletricidade Moderna – Agosto / 2000
- [8] Ronni M. Campaner (Intertechne) e Thutomu Fujino (COPEL) – “*Dificuldades no Cumprimento dos Critérios para Mitigação das Interferências*” – Revista Eletricidade Moderna – Fevereiro / 2001
- [9] Roberto Menna Barreto – QUEMC – “*Influência de Linhas de Transmissão / Distribuição em Sistemas Eletrônicos, de Telecomunicações e de Automação*” – texto técnico obtido na Internet
- [10] R. L. Araújo, N. S. R. Quoirin, L. M. Ardjomand (LACTEC – Centro Politécnico da UFPR) e M. N. Silva (CERJ) – “*Utilização Eficiente de Aterramentos para a Proteção de Equipamentos Sensíveis*” – Ciclo de P&D – ANEEL – 2003/2004
- [11] Lairton José Vilela Pinto – CEMIG – “*Interferência Eletromagnética em Cabos de Controle*” – capítulo extraído da apostila do Curso de Subestações – Vol. - PUC-MG / 1987
- [12] Fernando Chaves Dart e João Clavio Salari Filho (COPEL), Paulo Sergio Azambuja Rocha e Roberto Márcio Coutinho (CEMIG) – “*Requisitos Básicos para a Otimização do Aterramento de Subestações*” – Revista Eletricidade, Agosto / 1998
- [13] Hilton Moreno – Cobei/ABNT e Escola de Engenharia Mauá – “*Utilização de Canaletas de Alumínio para Instalações de Potência e Sinal*” – Revista Eletricidade Moderna – Dezembro / 1998
- [14] Clayton. R. Paul – Livro : “*Introduction to Electromagnetic Compatibility*” – Ed. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1992
- [15] Ara Kouyoumdjian – Livro : “*A Compatibilidade Eletromagnética*” – Groupe Schneider / MM Editora – 1998
- [16] João Mamede Filho – COELCE (Companhia Energética do Ceará) e UNIFOR (Universidade de Fortaleza) – Livro : “*Proteção de Equipamentos Eletrônicos Sensíveis*” – Editora Érica – 1997
- [17] Duílio Moreira Leite e Carlos Moreira Leita – Livro : “*Proteção Contra Descargas Atmosféricas*” – Oficina de Mydia Editora Ltda – 1994
- [18] Material didático e notas de aula – Curso de Especialização em Sistemas de Energia Elétrica – Ênfase : Qualidade da Energia – UFMG – Prof. Glássio C. de Miranda, PhD e Prof. José Osvaldo S. Paulino, PhD (UFMG)
- [19] Informações diversas / textos técnicos obtidos na WEB