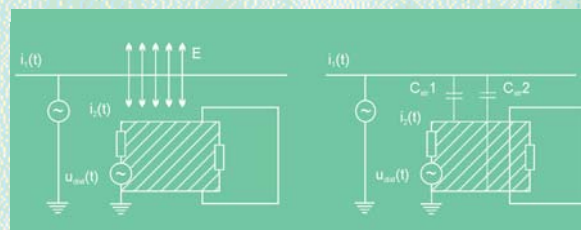
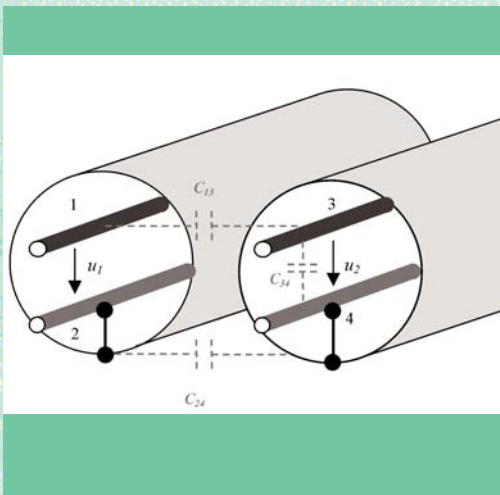


## *Aterramento & CEM* *Fundamentos da Compatibilidade Eletromagnética (CEM)*

6.1.2



# *Aterramento & CEM*

## *Fundamentos da Compatibilidade Eletromagnética (CEM)*

Prof Dr Wolfgang Langguth  
Hochschule für Technik und Wirtschaft  
May 2006



Este Guia foi produzido como parte do Leonardo Power Quality Initiative (LPQI), um programa de educação e treinamento europeu apoiado pela Comissão Europeia (sob o Programa Leonardo da Vinci) e pelo International Copper Association (ICA). Para informação adicional sobre o LPQI visite [www.lpqi.org](http://www.lpqi.org).



### **European Copper Institute (ECI)**

O European Copper Institute (ECI) (Instituto de Cobre Europeu) é uma joint venture entre o ICA (International Copper Association) e os fabricantes europeus. O ECI representa os maiores produtores de cobre do mundo e os fabricantes europeus mais importantes para promover o cobre na Europa. Criado em janeiro de 1996, o ECI é apoiado por uma rede de onze Associações de Desenvolvimento do Cobre ('CDAs') em Benelux, França, Alemanha, Grécia, Hungria, Itália, Polónia, Rússia, Escandinávia, Espanha e Reino Unido.



### **Instituto Brasileiro do Cobre - PROCOBRE**

É uma instituição sem fins lucrativos, constituída por empresas produtoras e transformadoras de cobre no Brasil com a missão de estimular o uso técnico e econômico do metal, promovendo sua utilização correta e eficiente. Desenvolve projetos nas várias áreas de aplicação do metal, divulgando as vantagens da utilização do cobre na energia elétrica, nas instalações hidráulicas e de gás, na arquitetura, no design e decoração de interiores, na saúde e muitas outras.

### **Aviso de Isenção de Responsabilidades**

O conteúdo deste documento não necessariamente reflete a posição da Comunidade Europeia, nem implica nenhuma responsabilidade por parte da Comunidade Europeia. O European Copper Institute, Hogeschool West-Vlaanderen, Labo Lemcko e Copper Development Association negam qualquer responsabilidade por qualquer dano direto, indireto, conseqüente ou incidental que possa resultar pelo uso da informação, ou pela impossibilidade do uso da informação ou dos dados contidos nesta publicação.

Copyright© European Copper Institute, Hogeschool West-Vlaanderen, Labo Lemcko and Copper Development Association.

Reprodução autorizada desde que o material esteja completo e a fonte mencionada.

# *Aterramento & CEM*

---

## **Fundamentos da Compatibilidade Eletromagnética (CEM)**

### **Introdução**

No passado, a maioria dos aparelhos usados nas instalações elétricas de edificações convencionais era composta por cargas lineares (como motores CA e CC, cargas resistivas, lâmpadas de filamento etc.), que não causavam interferências, ou causavam interferências muito pequenas entre itens diferentes dos equipamentos. Hoje em dia, no entanto, muitas das cargas em uso são não lineares (inversores de acionadores de motores CA, lâmpadas de descarga, lâmpadas economizadoras de energia, etc.). Estas cargas produzem ruídos de banda estreita (devido aos dispositivos que chaveiam em frequências fixas acima de 9 kHz) que podem se espalhar por toda a rede. Tipicamente, as Fontes de Energia de Modo Chaveado produzem este tipo de sinal de interferência conduzida (operando na faixa de 10 kHz a 100 kHz). Ao mesmo tempo, um aumento no uso de sistemas digitais pode ser observado, tais como equipamentos de TI para o gerenciamento técnico das instalações, para sistemas de automação de processos industriais, aplicações multimídias, etc.

Por um lado, os sistemas de alimentação de energia estão ficando mais potentes, o que pode resultar em interferência eletromagnética (IEM); por outro lado, as redes digitais estão se expandindo, ficando mais sensíveis, operando com taxas de transferência maiores, e sendo crescentemente usadas para tarefas relacionadas com segurança. Este desenvolvimento demanda instalações elétricas de alta qualidade em todas as edificações onde incompatibilidades eletromagnéticas levam a custos mais altos ou a reduções inaceitáveis das normas de segurança.

Basicamente, todos os componentes eletricamente condutivos das edificações e instalações têm um papel na interferência eletromagnética, ou como uma fonte (transmissor de IEM) ou como um dreno (receptor de IEM). Além dos condutores elétricos instalados, há tubulações metálicas, barras de reforço no concreto, fachadas metálicas e aço usado na construção que também podem se tornar parte da instalação relevante em relação à CEM e transmitir IEM. Frequentemente, parece que qualquer instalação pode agir simultaneamente como uma fonte e um dreno. Sistemas típicos são:

- Linhas de alimentação de energia;
- Dispositivos de medição e controle;
- Dispositivos de alarme;
- Instalações de computador, incluindo redes.

Uma instalação inadequada, junto com uma instalação em sistema TN-C, permite que os sinais de ruído se espalhem por toda a edificação e até mesmo alcançam edificações vizinhas da instalação.

A importância crescente da CEM foi percebida pela Comunidade Européia. De acordo com a diretiva de CEM da UE 89/336/EEC (emendada pelas diretivas 91/263/EEC, 92/31/EEC, 93/68/EEC e 93/97/EEC), qualquer instalação elétrica das edificações tem que também respeitar as normas internacionais para suscetibilidade e emissão de CEM. As pessoas responsáveis pelo projeto, engenharia e construção se tornam os “fabricantes” no âmbito da diretiva e assumem total responsabilidade pelo atendimento da instalação a todos os requisitos aplicáveis da diretiva quando colocada em serviço.

Para implementar uma instalação elétrica confiável, segura e com custo adequado em uma edificação, é absolutamente necessário executar uma análise de CEM e desenvolver um plano de CEM numa etapa muito cedo do planejamento do projeto.

Deveria ser exigido que todas as instalações elétricas fossem supervisionadas e implementadas por pessoal treinado em CEM. O objetivo deste artigo é fornecer uma visão geral e uma compreensão básica dos principais princípios físicos da interferência eletromagnética e uma introdução aos princípios de mitigação dos efeitos das perturbações. Como resultado, as medidas requeridas para se obter uma instalação que atende à CEM deveriam ser entendidas facilmente.

### **Campos como fontes fundamentais de interferência eletromagnética**

A compatibilidade eletromagnética (CEM) descreve a habilidade de qualquer sistema elétrico ou eletrônico, máquina, aparelho, etc. de operar sem mau funcionamento em um ambiente eletromagnético perturbado, ao mesmo tempo em que ele mesmo não perturba a operação de outros componentes do sistema.

As fontes fundamentais de qualquer interferência eletromagnética (IEM) são os campos e correntes básicos da eletrodinâmica. Em baixas frequências, os campos elétrico e magnético agem independentemente; em altas frequências, somente o campo eletromagnético propagante é importante.

Todos os campos em baixa, média e alta frequência são gerados por cargas e correntes elétricas. Em baixas frequências, os campos elétrico e magnético têm alcance relativamente curto, diminuindo em intensidade na medida em que se afastam da fonte, pelo menos inversamente proporcional à distância, e se concentram na vizinhança das linhas que conduzem alguma corrente ou tensão.

Uma vez que o campo elétrico é proporcional à tensão elétrica, ele somente será de intensidade suficiente para causar efeitos de IEM na vizinhança de instalações de alta tensão. Na maioria das instalações, porém, os campos elétricos não têm grande importância. Porém, em pequenas distâncias, como no caso, por exemplo, de cabos que são instalados juntos em bandejas, o campo elétrico tem que ser considerado como uma possível fonte de IEM.

O campo magnético é proporcional à intensidade da corrente elétrica. Em muitos sistemas de alimentação de energia, as correntes podem alcançar valores bastante altos, e então os campos magnéticos podem se tornar fortes e os perigos dos efeitos de IEM são grandes. Isto é particularmente provável de ocorrer em uma instalação com sistema de aterramento TN-C. Devido à combinação do condutor neutro (N) com o condutor de proteção (PE), resultando no condutor PEN, e as conseqüentes ligações com outras partes condutivas da edificação, as correntes podem alcançar todas as áreas da edificação e os campos magnéticos resultantes podem causar efeitos de IEM em quase em todos lugares. Uma vez que parte da corrente de retorno pelo neutro está fluindo por partes metálicas estranhas à instalação, a soma da corrente na própria rede TN-C é desequilibrada e o campo magnético resultante da rede TN-C aumenta em algumas ordens de magnitude.

Terminais de computadores que usam tubos de raios catódicos são facilmente afetados (cintilamento na tela) por campos magnéticos da ordem de 1,5 mT. Tal campo pode ser gerado por uma única linha de energia com 10 A, 50 Hz a uma distância de 1,3 m. Tubos maiores (>17 polegadas) são mais sensíveis a campos magnéticos externos. Se as correntes têm componentes de frequência mais altos, os campos magnéticos terão efeitos mais pronunciados.

Em altas frequências, os campos elétrico e magnético se combinam para formar o campo eletromagnético, que se propaga pelo espaço com a velocidade da luz. Conseqüentemente, há possibilidade de perturbações em distâncias muito maiores. Fontes típicas de campos eletromagnéticos são radar, transmissores de rádio e televisão, telefones móveis, redes sem fios (WLAN), links de Bluetooth® e instalações industriais na faixa de frequência de microondas. Porém, cabos de energia podem agir como antenas e propagar sinais de altas frequências que estão intencionalmente (por exemplo, comunicação através de linhas de energia) ou não intencionalmente (por exemplo, transitórios rápidos) presentes nas redes. Para imunizar as instalações elétricas contra campos eletromagnéticos devem ser realizados projetos cuidadosos e instaladas medidas de proteção adequadas.

## Tipos de acoplamentos eletromagnéticos

### Modelo de acoplamento elementar de IEM

Para descrever o mecanismo de interferência eletromagnética é mais fácil começar com um modelo muito simples. Ele consiste em uma fonte que causa a interferência, um mecanismo de acoplamento ou meio de acoplamento e o dispositivo afetado.

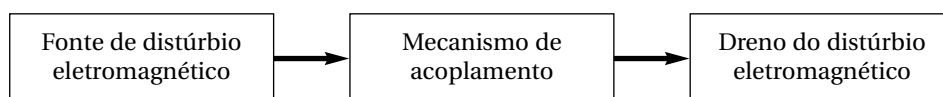


Figura 1 - Modelo de acoplamento elementar de IEM.

Exemplos de fontes podem, como mencionado anteriormente, ser as linhas do sistema de energia elétrica, antenas de sistemas LAN sem fios, etc. O acoplamento é estabelecido pela corrente se os condutores comuns através de circuitos diferentes são compartilhados pelos campos elétricos, magnéticos ou eletromagnéticos. Os drenos da perturbação podem ser qualquer tipo de aparelho ou qualquer

parte da instalação elétrica. Claro que a interação eletromagnética completa de todas as instalações em uma edificação ou instalação é uma combinação muito complexa destas interações elementares. Além disso, qualquer dreno também pode agir como uma fonte de IEM e vice-versa.

Durante a fase de planejamento de uma instalação nova ou reforma, deveria ser levantada uma matriz com todas as possíveis fontes, caminhos de acoplamento e objetos afetados. Com a ajuda desta matriz, a possível intensidade da interferência mútua deve ser estimada para avaliar quais perturbações de IEM podem ocorrer e quais são as mais relevantes. Somente com base nesta matriz de interação de IEM é que medidas de combate podem ser planejadas logo de início, assegurando assim o comissionamento da instalação rápido e efetivo em custo.

Podem ser identificados quatro tipos diferentes de IEM elementares:

- Acoplamento por impedância;
- Acoplamento indutivo;
- Acoplamento capacitivo;
- Acoplamento por radiação.

A Tabela 1 a seguir resume as propriedades físicas básicas dos diferentes métodos de acoplamento.

Fonte	Domínio da frequência	Acoplamento	Alcance	Drenos
Campo elétrico	Baixa frequência	Capacitivo	Curto	Cabos de alta e baixa tensão
Campo magnético	Baixa frequência	Indutivo	Curto	Cabos de alta e baixa tensão
Campo eletromagnético	Alta frequência	Por radiação	Longo	Cabos de alta e baixa tensão

Tabela 1 - Propriedades elementares dos tipos de acoplamentos de IEM.

Os fenômenos dominantes de perturbação em edificações são devidos ao acoplamento indutivo, seguido pelo capacitivo e pelo de impedância. O acoplamento por radiação, em geral, não tem sido o dominante até o momento, uma vez que as intensidades de campo estão normalmente bem abaixo dos valores limites exigidos nos ensaios de suscetibilidade da diretiva europeia para CEM. No entanto, o uso crescente de aplicações sem fios pode conduzir a um aumento nos fenômenos de IEM desta fonte no futuro.

## Acoplamento por impedância

O acoplamento galvânico acontece quando diferentes circuitos utilizam as mesmas linhas elétricas e/ou impedâncias de acoplamento. Isto pode acontecer, por exemplo, quando circuitos diferentes usam a mesma fonte de tensão. O princípio fundamental do acoplamento por impedância pode ser visto prontamente na Figura 2.

O circuito I pode ser parte de uma rede de alimentação de energia e o circuito II parte de uma rede de transferência de dados. A tensão, que é sobreposta ao sinal  $u_2$  devido à impedância de acoplamento comum  $Z_c = R_c + j\omega L_c$  é, para  $Z_c \ll Z_i + Z_L$ , dada por:

$$u_c = Z_c \cdot i_1 \approx \frac{u_1}{Z_i + Z_L} Z_c \quad (1)$$

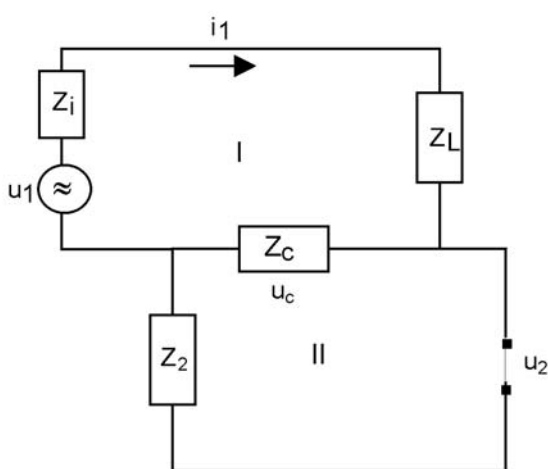


Figura 2 - Acoplamento por impedância.

Se a corrente  $i_1$  e/ou a impedância de acoplamento  $Z_c$  são grandes o bastante, a tensão sobreposta  $u_c$  pode também ser significativa quando comparada ao sinal  $u_2$  para perturbar os circuitos de dados.

A impedância da linha compartilhada consiste de componentes resistivos e indutivos,  $Z_c(\omega) = R_c + j\omega L_c$ . Enquanto que a parte resistiva do acoplamento permanece igualmente importante para todas as frequências (desprezando o efeito pelicular), a parte indutiva ganha importância crescente nas frequências altas. Para uma breve discussão, recorremos ao seguinte modelo:

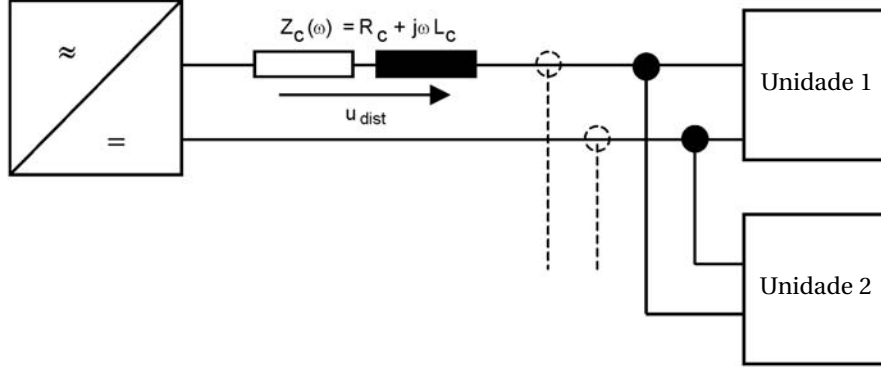


Figura 3 - Modelo simplificado de acoplamento por impedância.

A tensão de perturbação  $u_{dist}$ , desenvolvida através de  $Z_c$ , é sobreposta ao sinal da unidade 2 e depende da corrente  $i(t)$  e também de sua variação no tempo  $di(t)/dt$ . Em um modelo simplificado, a tensão de perturbação pode ser estimada por:

$$u_{dist} = u_{R,dist} + u_{L,dist} = R_c \cdot i(t) + L_c \cdot \frac{di(t)}{dt} \quad (2)$$

Se escolhermos um conjunto de parâmetros realistas para nosso modelo: (comprimento de linha  $l=2\text{ m}$ , auto-indutância  $L_c=1\mu\text{H/m}$ , resistência  $R_c=1\Omega$ , corrente  $i=1\text{A}$  e uma taxa de variação de corrente  $di/dt=1\text{A}/100\text{ns}$ ), obtemos as seguintes contribuições para o acoplamento galvânico:

$$\begin{aligned} u_{R,dist} &= R_c \cdot i(t) = 1\text{V} \\ u_{L,dist} &= L_c \cdot \frac{di(t)}{dt} = 20\text{V} \\ u_{dist} &= u_{R,dist} + u_{L,dist} = 21\text{V} \end{aligned} \quad (3)$$

Em altas frequências, a auto-indutância das linhas claramente predomina. Isto permanece verdadeiro mesmo se considerarmos o crescimento da resistência aparente da linha devido ao efeito pelicular, que não é desprezível para os transitórios rápidos e sinais digitais. Seguindo as Leis de Kirchhoff, os sinais de perturbação podem se distribuir pela própria instalação e podem até afetar instalações vizinhas. Para minimizar o acoplamento galvânico, é necessário evitar conexões entre sistemas independentes e, nos casos onde as conexões são necessárias, manter suas auto-indutâncias o mais baixo possível. Geralmente, o desacoplamento galvânico de circuitos de alimentação pode ser obtido mais facilmente quando um sistema TN-S é usado em lugar de um sistema TN-C.

## Acoplamento indutivo

Uma corrente externa que varia com o tempo  $i_1(t)$  gera um campo magnético  $B(t)$  que induz uma tensão de perturbação  $u_{dist}(t)$  em um circuito na vizinhança. Em um modelo de circuito equivalente, isto pode ser descrito por um acoplamento entre ambos os circuitos através de uma indutância de acoplamento  $M$ . A tensão  $u_{dist}(t)$  origina uma corrente de modo comum  $i_2(t)$ , que gera um campo magnético para enfraquecer o campo externo. A corrente  $i_2(t)$  é sobreposta às correntes do sistema perturbado e pode resultar em mau funcionamento do sistema. A acoplamento entre os campos magnéticos dos diferentes sistemas pode ser modelado por um circuito equivalente através de indutâncias mútuas dos circuitos acoplados (Figura 4).

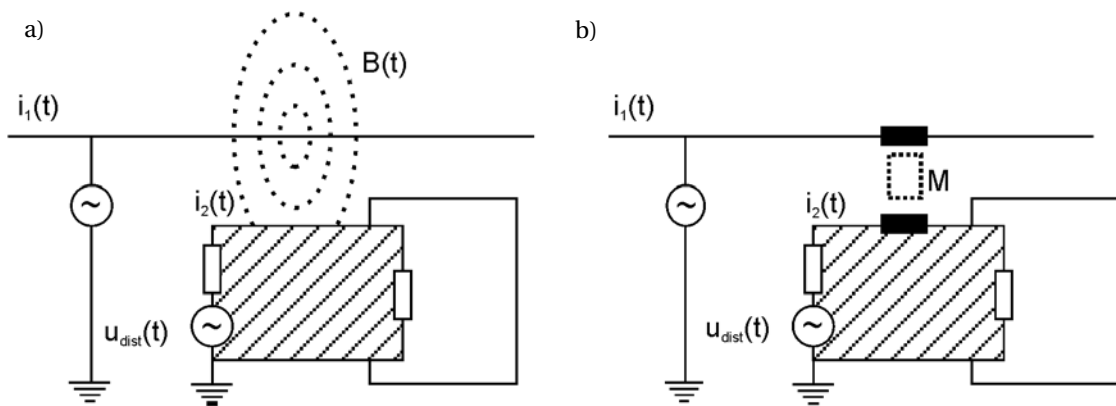


Figura 4 - Acoplamento indutivo: a) modelo de campo; b) circuito equivalente.

A intensidade do acoplamento depende principalmente de três parâmetros:

- Intensidade da corrente de perturbação;
- Distância entre fonte e dreno;
- Frequência do campo de perturbação.

O sinal de perturbação torna-se grande e significativo se:

- As correntes dos circuitos externos são grandes;
- As correntes de ida e retorno pelas linhas estão desequilibradas (como em um sistema TN-C);
- Os circuitos estão muito próximos e cobrem uma grande área;
- Os sinais do circuito externo variam rapidamente no tempo e, conseqüentemente, tem um grande conteúdo de altas frequências.

Porém, o acoplamento indutivo pode ser útil no controle de perturbações. Se a instalação de bandejas de cabos e de cabos coaxiais é corretamente executada, (ou seja, são ligados de modo confiável por meio de pequenas conexões com baixa impedância também em altas frequências), eles provêm blindagem dos cabos (por acoplamento indutivo) contra campos magnéticos externos, especialmente em frequências mais altas.

## Dependência geométrica do acoplamento indutivo

A sensibilidade do acoplamento indutivo em relação ao tipo de rede elétrica e à geometria da instalação pode ser demonstrada pelo seguinte exemplo. As conclusões são importantes para as instalações compatíveis com CEM.

Consideramos dois circuitos, uma linha simples e uma linha de ida e volta, e calculamos a influência de ambos os sistemas sobre um circuito, modelado por um laço retangular situado a uma distância  $r$ .

$$B_1(r) = \frac{\mu_0 \cdot i(t)}{2\pi \cdot r}, \quad B_2(r) = \frac{\mu_0 \cdot 2a \cdot i(t)}{2\pi \cdot (r-a)(r+a)}, \quad \text{onde } \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \left[ \frac{Vs}{Am} \right] \quad (4)$$

O campo magnético de cada configuração pode ser calculado exatamente:

O campo magnético é proporcional à corrente  $i(t)$ . Entretanto, enquanto o campo da linha simples diminui inversamente proporcional apenas à distância, o campo da linha de ida e retorno diminui inversamente proporcional ao quadrado da distância para distâncias grandes. Isto resulta em uma dependência da distância dramaticamente diferente para o acoplamento indutivo em função de cada modelo de rede. Este comportamento do campo magnético e do acoplamento indutivo por unidade de comprimento está mostrado na próxima Figura. A corrente  $i(t)$  foi escolhida como 1A e a distância  $a = 1.5$  mm.

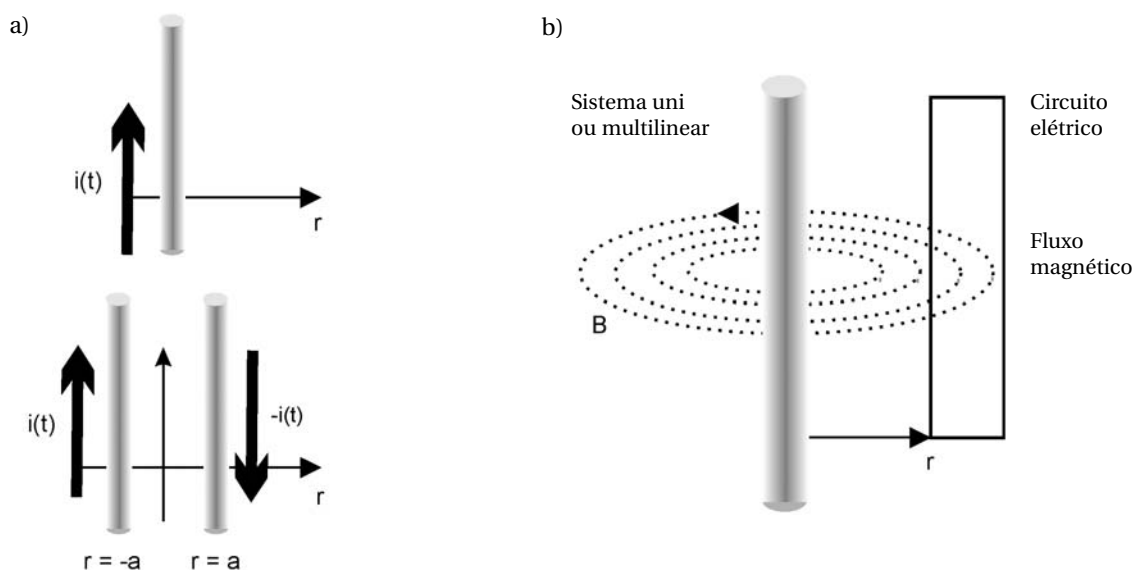


Figura 5 - a) linha simples e linha de ida e retorno escolhidas como fontes de um campo magnético; b) um circuito elétrico como um dreno.

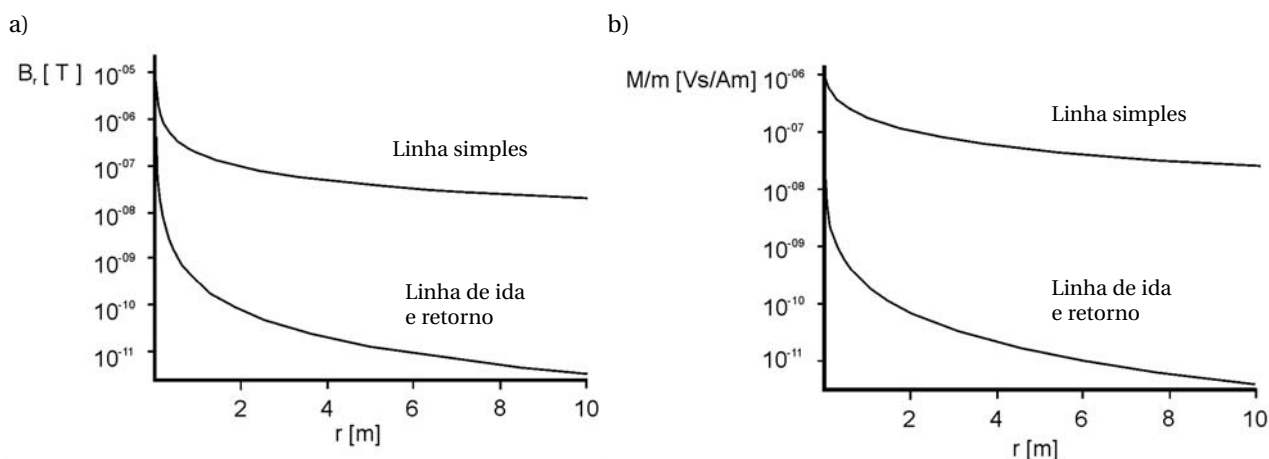


Figura 6 - a) campo magnético de uma linha simples e de uma linha de ida e retorno; b) a indutância de acoplamento por unidade de comprimento de um laço em relação a uma linha simples e a uma linha de ida e retorno.

O campo magnético da linha de ida e retorno equilibrada é duas ordens de grandeza menor decresce mais rapidamente do que a linha simples. O mesmo é verdade para a indutância de acoplamento. A dependência da indutância de acoplamento com a área do laço é bastante semelhante à da Figura 6b). Este exemplo apresenta o conhecimento mais elementar de algumas “regras de ouro” para o atendimento dos requisitos de CEM por uma instalação elétrica:

- Mantenha a área de qualquer instalação elétrica tão pequena quanto possível;
- Maximize a distância de linhas com altas correntes;
- Separe as linhas de energia das linhas de dados;
- Use somente sistemas de aterramento do tipo TN-S.

Somente redes TN-S são amigáveis à CEM. Em redes TN-C podem surgir correntes desequilibradas, de forma que a rede TN-C gera o campo magnético de uma linha simples percorrida por corrente desequilibrada. Para a mesma geometria da instalação, a corrente desequilibrada gera um campo magnético de pelo menos duas ordens de grandeza maior do que em uma rede TN-S.



## Dependência da frequência do acoplamento indutivo

O comportamento em relação à frequência do acoplamento indutivo fornece um valioso conhecimento sobre como uma instalação elétrica pode ser implementada para alcançar uma proteção ótima contra perturbações externas de altas frequências. Consideramos novamente uma montagem ideal semelhante à da Figura 5b). A Figura 7 mostra o circuito equivalente de um pequeno laço de auto-indutância  $L_2$  e resistência  $R_2$  que é influenciado por uma linha externa que conduz uma corrente  $i_1(t)$  com uma indutância de acoplamento  $M$ .

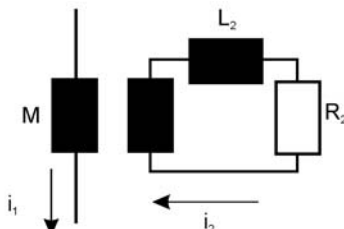


Figura 7 - Circuito equivalente para um acoplamento indutivo.

Se consideramos correntes de uma frequência definida  $\omega$ ,  $i_{1,2}(t) = i_{1,2}(\omega) e^{j\omega t}$ , a função de transferência da corrente de perturbação  $i_1(\omega)$  e da corrente induzida  $i_2(\omega)$  para este simples modelo podem ser calculadas exatamente e resultam na função de transferência da Equação 5.

$$i_2 = \frac{MR_2}{R_2 + sL_2} i_1, \quad s = j\omega, \quad j^2 = -1 \quad (5)$$

Para entender o que esta fórmula significa para uma instalação real, vamos considerar um laço de comprimento  $l = 0,3 \text{ m}$  e largura  $w = 0,1 \text{ m}$ , que está a uma distância  $d = 2 \text{ mm}$  longe da linha pela qual circula a corrente de perturbação. Para a resistência interna, escolhemos  $R_2 = 50 \Omega$ . A auto-indutância e a indutância mútua podem ser calculadas para este exemplo como  $L_2 = 0,9 \mu\text{H}$  e  $M = 0,2 \mu\text{H}$ . A intensidade da corrente de perturbação por unidade da corrente externa  $i_2(\omega)/i_1(\omega)$  é mostrada na Figura 8.

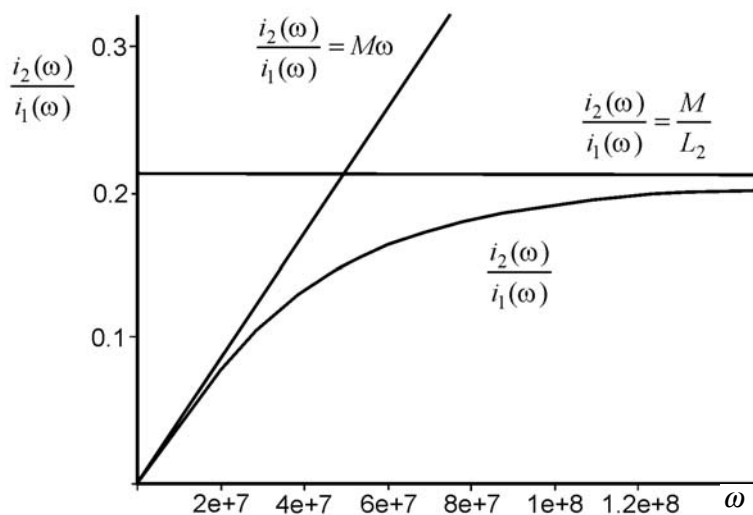


Figura 8 - Estudo de caso da função de transferência da corrente.

A corrente de perturbação  $i_2$  aumenta com a corrente externa  $i_1$  e sua frequência. Em baixas frequências ela aumenta proporcionalmente a  $\omega$ , enquanto que em altas frequências  $i_2$  atinge seu valor de saturação. Este valor de saturação é limitado pela relação  $M/L_2$ . Para minimizar os efeitos de IEM, uma instalação que atende à CEM tem que minimizar a indutância mútua  $M$  e maximizar auto-indutância  $L_2$  do circuito acoplado.

Uma vez que as perturbações rápidas contêm mais frequências altas, elas geram maiores distúrbios. Isto pode ser visto na Figura 9, onde a corrente de perturbação calculada que resulta de uma forma de onda de corrente trapezoidal, representando um sinal digital, é mostrada.

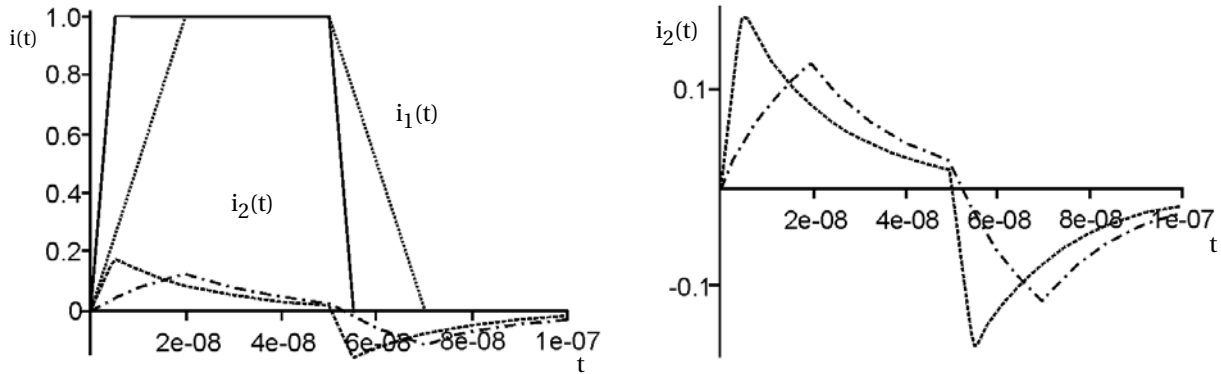


Figura 9 - Acoplamento indutivo de correntes trapezoidais lentas e rápidas.

Pode ser visto na Figura 9 que a corrente de perturbação alcança mais do que 10% da intensidade da corrente externa lenta e mais do que 15% da rápida. Estes valores altos resultam dos pequenos tempos de subida dos sinais digitais. Valores altos semelhantes são esperados em qualquer processo de chaveamento eletrônico, tais como dimmers com controle de ângulo de fase. O chaveamento do dimmer pode ser modelado pelo início do sinal trapezoidal. A parte restante do sinal de 50 Hz só dá uma contribuição desprezível.

Até agora, olhamos o pequeno laço como um dreno de IEM. Neste caso, as propriedades elétricas têm que ser otimizadas para minimizar a corrente de perturbação  $i_2(t)$ . A propriedade da corrente induzida  $i_2(t)$  de gerar um campo magnético que debilita o campo externo também pode ser usada para blindar sistemas elétricos ou eletrônicos sensíveis. Neste caso, os parâmetros elétricos do pequeno laço têm que ser escolhidos para otimizar o campo contrário gerado pela corrente  $i_2(t)$  e minimizar o fluxo magnético resultante através do laço. Exemplos práticos desta aplicação são a blindagem de qualquer cabo blindado, bandejas de cabos, veias de cabos não utilizadas, etc. O fluxo magnético resultante através da área de nosso circuito formado pelo pequeno laço pode ser calculado por:

$$\Phi_{loop}(i_2) = \frac{MR_2}{R_2 + sL_2} i_1, s = j\omega, j^2 = -1 \quad (6)$$

Pode ser visto que o fluxo magnético resultante é minimizado para valores pequenos de  $R_2$ . As propriedades de blindagem de nosso modelo de circuito com o pequeno laço, para vários valores de  $R_2$ , são mostradas na Figura 10.

A efetividade da blindagem aumenta drasticamente com a diminuição da resistência do circuito do laço, indicadas aqui para valores de  $R_2 = \text{infinito}, 500, 50, 5 \Omega$ .

Deste resultado surgem importantes regras de instalações de edificações. Todas as conexões de instalações blindadas, tais como bandejas de cabos, eletrocalhas, armários e gabinetes, etc. têm que ser de baixa resistência em altas frequências. Devido ao efeito pelicular, a resistência de qualquer condutor elétrico aumenta com a frequência do sinal. Então, as geometrias dos condutores devem ser escolhidas de forma a minimizar a resistência aparente em altas frequências. A geometria ótima de um condutor é a fita plana, seja sólida ou trançada, onde a área de superfície é grande e a espessura é pequena. Condutores usuais de seção circular não são ideais.

Obviamente, um laço somente funciona eficientemente como um dispositivo de blindagem se a corrente de proteção puder fluir e não houver nenhuma desconexão no laço. As blindagens têm que ser ligadas ao aterramento em ambas as extremidades para permitir o fluxo da corrente de blindagem.

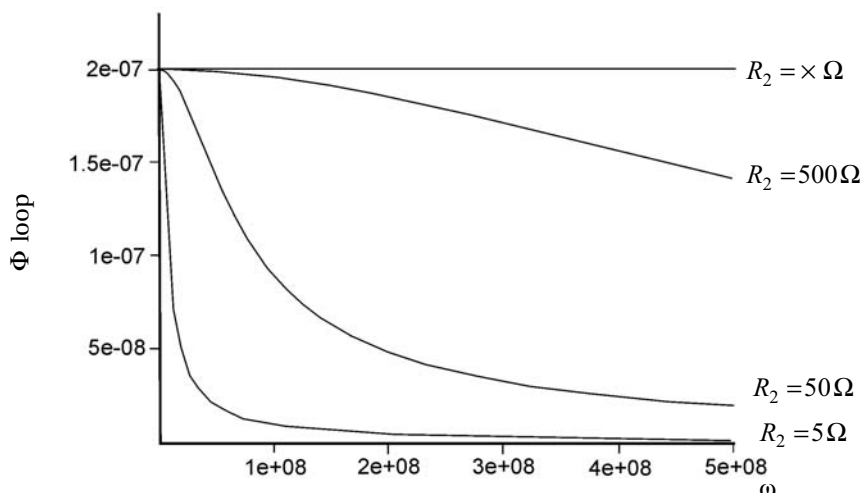


Figura 10 - Efetividade da blindagem de um laço para vários valores de sua resistência  $R_2$ .

## Acoplamento capacitivo

O campo elétrico que varia com o tempo em um sistema externo produz cargas variáveis no sistema perturbado. O fluxo das correntes de deslocamento pode ser modelado por um circuito equivalente de capacitâncias parasitas que ligam os dois sistemas e causam as tensões de perturbação.

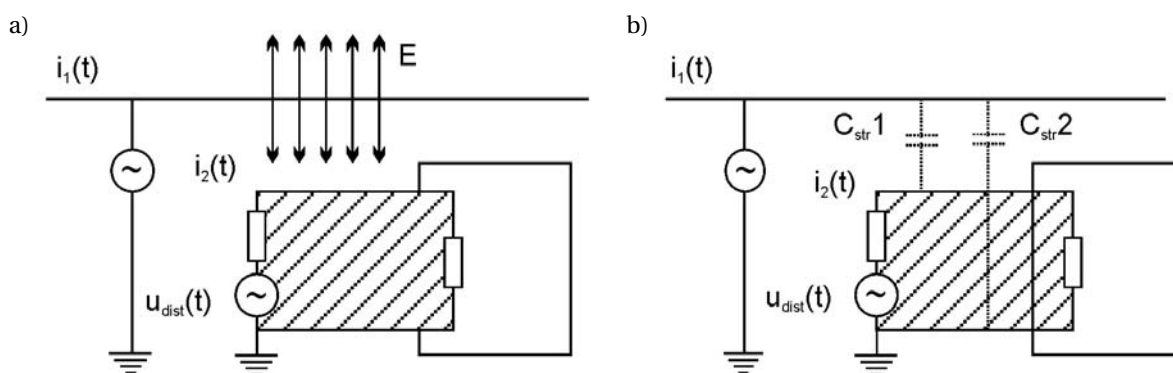


Figura 11 - Acoplamento capacitivo: a) modelo de campo, b) circuito equivalente.

O campo elétrico que varia com o tempo em um sistema externo produz cargas variáveis no sistema perturbado. O fluxo das correntes de deslocamento pode ser modelado por um circuito equivalente de capacitâncias parasitas que ligam os dois sistemas e causam as tensões de perturbação.

Semelhante ao caso de acoplamento indutivo, o acoplamento capacitivo aumenta se:

- Os dois circuitos estão muito próximos;
- A diferença de tensão entre os dois circuitos é grande;
- Os sinais no circuito externo estão variando rapidamente no tempo e então possuem um grande conteúdo de altas frequências.

Como exemplo, pode-se considerar os cabos de um circuito de energia e outros de uma LAN, que podem estar instalados em bandeja, paralelos uns aos outros e separados por uma distância de 10 m. Se a corrente no cabo de energia tem uma forma de onda senoidal pura em 50 Hz e 230 V, o sinal de perturbação nos cabos de dados atinge uma intensidade de 10 V, que pode ser aceitáveis. Porém, se a corrente no cabo de energia possuir componentes de alta frequência gerados por cargas não lineares, o sinal de perturbação no cabo de dados pode atingir mais de 90 V, o que pode resultar num baixo desempenho ou mau funcionamento das LANs.

Se os requisitos de cabeamento e blindagem são planejados corretamente, e a instalação é executada cuidadosamente, estes tipos de perturbações podem ser evitados ou, pelo menos, podem ser minimizados a um nível tolerável.

Para discutir os aspectos mais importantes do acoplamento capacitivo, consideramos um modelo elementar novamente, que pode ser resolvido analiticamente. O modelo consiste em dois circuitos que usam, por simplicidade, uma retorno comum. O circuito equivalente do sistema é mostrado na Figura 12.

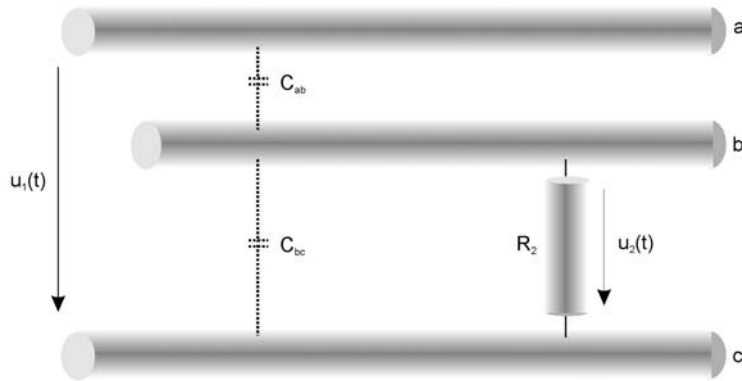


Figura 12 - Modelo de três linhas para acoplamento capacitivo.

As linhas a e c são parte do sistema externo, e as linhas b e c são do sistema perturbado. Se consideramos tensões de uma frequência definida  $\omega$ ,  $u_{1,2}(t) = u_{1,2}(\omega) e^{j\omega t}$ , a relação entre a tensão de perturbação  $u_1\omega$  e a tensão acoplada  $u_2\omega$  para este modelo simples pode ser calculada exatamente:

$$u_2 = \frac{sR_2 C_{ab}}{1+sR_2 (C_{ab}+C_{bc})} u_1, s = j\omega, j^2 = -1 \quad (7)$$

Escolhemos para os parâmetros do modelo  $R_2=1k\Omega$ ,  $C_{ab} = C_{cb} =100 \text{ pF}$ , o que é razoável para cabos paralelos de espessura 1 mm, a uma distância de 5 mm ao longo de um comprimento de 10 m, e uma tensão externa  $u_1=220 \text{ V}$ . O comportamento da dependência da frequência da tensão de acoplamento capacitivo  $u_2$  é mostrada na Figura 13.

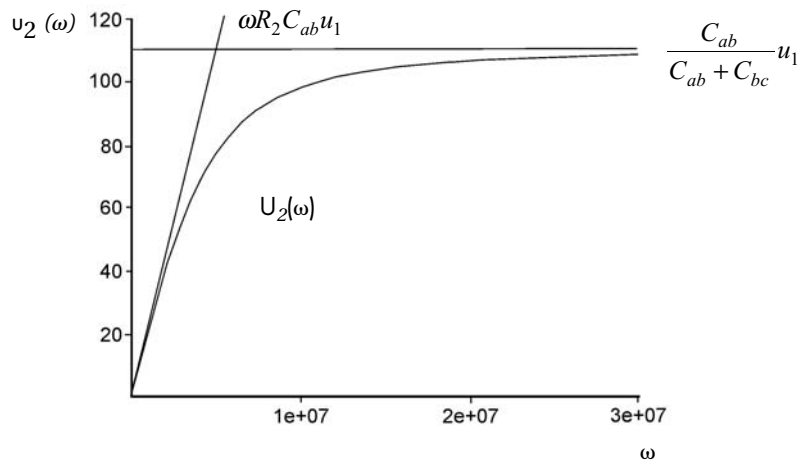


Figura 13 - Comportamento da frequência em acoplamento capacitivo.

O comportamento do acoplamento capacitivo é muito similar ao do acoplamento indutivo. A tensão de perturbação  $u_2$  aumenta em baixas frequências linearmente com a frequência do sinal de perturbação e atinge um valor de saturação em altas frequências. Novamente, sinais rápidos de perturbação que contêm componentes de altas frequências influenciarão maciçamente o circuito perturbado. A Figura 14 mostra a tensão acoplada de uma forma de onda senoidal de 50 Hz, 220 V e um dimmer com controle de ângulo de fase.

A onda senoidal produz um sinal de perturbação senoidal com intensidade de cerca de 7 mV que, na maioria dos casos, pode ser desprezado. Em contraste, o processo de chaveamento do dimmer resulta em um pico de tensão de 110 V.O acoplamento capacitivo pode ser reduzido usando-se cabos blindados.

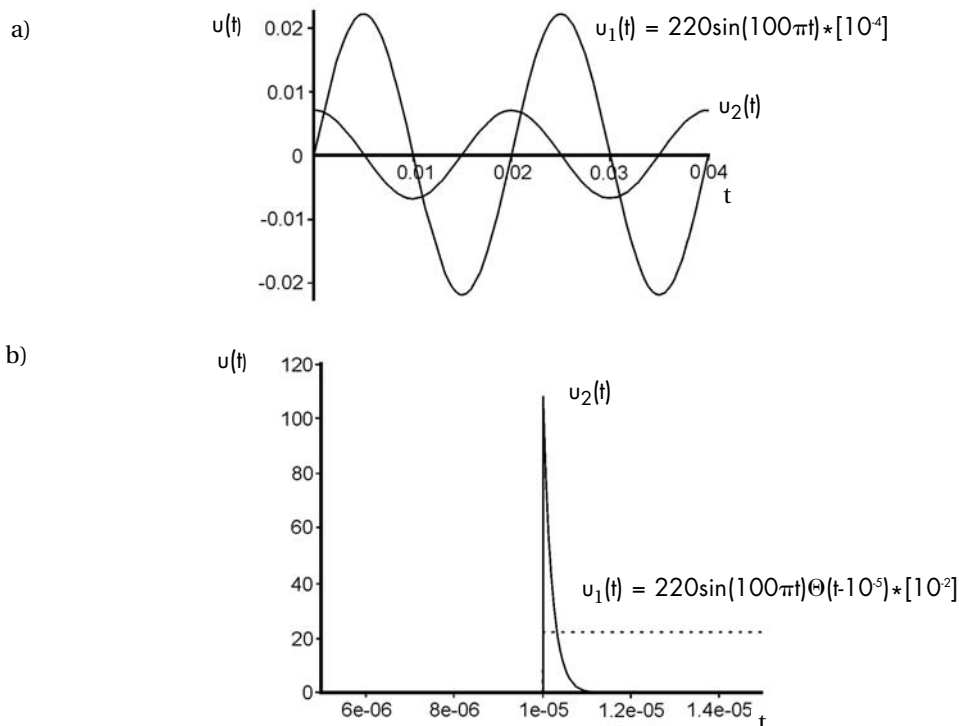


Figura 14 - Sinais acoplados capacitivamente de: a) onda senoidal de 50 Hz, b) dimmer por controle de ângulo de fase.

O modelo de um par de cabos blindados é mostrado na Figura 15.

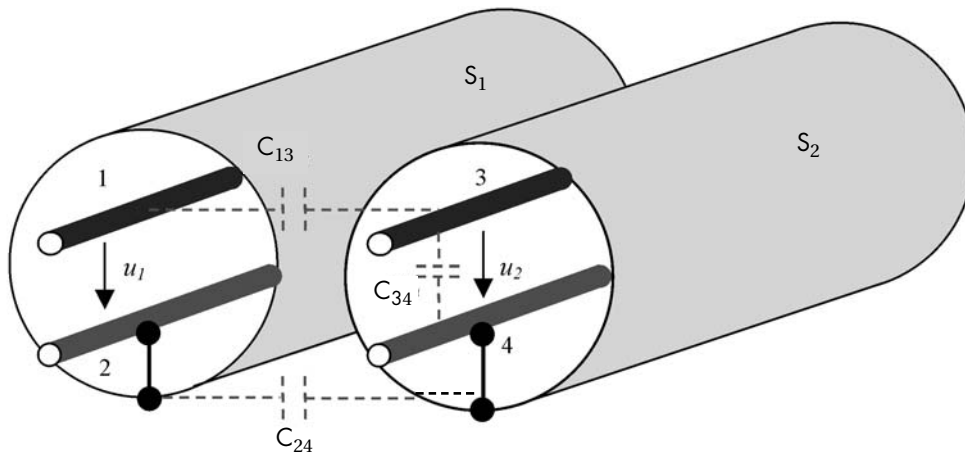


Figura 15 - Acoplamento capacitivo de dois cabos blindados.

As blindagens condutivas  $S_1$  e  $S_2$  são ligadas em um único ponto do sistema. O comportamento da frequência da tensão perturbada  $u_2$  é a mesma da equação 7, onde:

$C_{ab}$  tem que ser substituído por  $C_1 = \frac{C_{13}C_{24}}{C_{13} + C_{24}}$  e  $C_{bc}$  por  $C_{34}$ .

A tensão máxima, que poderia ser acoplada, é dada por:  $u_2 = \frac{1}{1 + C_{34}/C_{13} + C_{34}/C_{24}} u_1$ , ela mostra que

uma boa conexão capacitiva  $C_{34}$  entre o condutor e a blindagem melhora a efetividade da blindagem. Para vários acoplamentos capacitivos, a efetividade de um cabo blindado contra um pulso transitório rápido é mostrada na Figura 16.

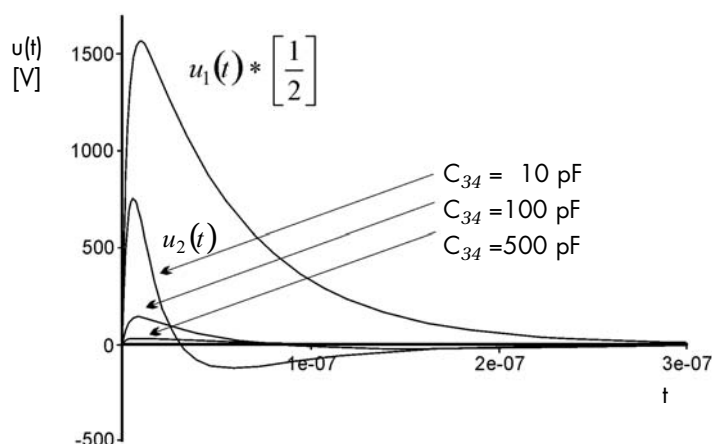


Figura 16 - Blindagem de um pulso para diferentes acoplamentos capacitivos.

## Acoplamento por irradiação

Os campos eletromagnéticos se propagam pelo espaço com a velocidade da luz  $c = 2,998 \times 10^8$  m/s e podem influenciar as instalações elétricas nas regiões próximas ou distantes da fonte. Fontes típicas de campos eletromagnéticos são transmissores de rádio e televisão, telefones móveis ou quaisquer outros tipos de aplicações sem fios. As partes de altas frequências de sinais rápidos ou de transitórios rápidos (surtos, descargas atmosféricas, etc.) também podem resultar na irradiação de campos eletromagnéticos por cabos ou outras partes condutivas da instalação elétrica e podem causar perturbações em sistemas elétricos em outras partes da edificação.

Se as perturbações na alimentação de energia ou na rede de dados contêm componentes de altas frequências altas, outros elementos da instalação podem agir como antenas e irradiar os campos eletromagnéticos. O Dipolo de Hertz pode servir como um modelo elementar para calcular a intensidade de campos irradiados. Todas as partes condutivas da instalação elétrica podem servir como antenas, incluindo:

- Cabos;
- Aberturas de gabinetes, cubículos etc.;
- Placas de circuitos impressos.

Aberturas de gabinetes de equipamentos irradiam perturbações nas vizinhanças, afetando assim outros objetos no ambiente e/ou transmitindo campos eletromagnéticos do exterior para o interior dos sistemas.

Como um exemplo, podemos observar uma descarga eletrostática de um corpo humano sobre uma placa de metal. O arco da descarga eletrostática não só transporta uma corrente significativa, mas também gera um campo eletromagnético que pode alcançar facilmente uma intensidade de 0,5 a 4 kV a uma distância menor do que 1 m. Estes campos eletromagnéticos podem perturbar o sistema elétrico dentro de um cubículo inadequado através das propriedades de antena das aberturas.

Elementos condutivos, tais como cabos e aberturas, começam a irradiar quando suas dimensões lineares excedem aproximadamente a metade do comprimento de onda. O comprimento de onda de uma onda eletromagnética e sua frequência  $f$  estão relacionados pela velocidade da luz através da relação  $\lambda = c / f$ . Alguns pares típicos de valores são mostrados na Tabela 2.

f [MHz]	$\lambda$ [m]
0,1	3000
1	300
10	30
100	3
1000	0,3

Tabela 2 - Alguns valores de frequências e comprimentos de onda correspondentes.

Na prática, os invólucros não podem ser fechados completamente. Aberturas tais como passagens de cabos e ventilação e espaços ao redor de portas são inevitáveis. Estas aberturas reduzem a eficiência da blindagem de qualquer invólucro.

Por meio de uma construção inteligente do invólucro, pode ser obtido um nível aceitável de blindagem.

A quantidade de fuga por uma descontinuidade na blindagem depende principalmente de três fatores.

- A máxima dimensão linear da abertura;
- A impedância da onda;
- A frequência da fonte.

Para aberturas de comprimento  $\lambda = l/2$ , a efetividade da blindagem é determinada por:

$$S = 20 \log \left( \frac{\lambda}{2l} \right) \quad (8)$$

Diminuindo-se o comprimento da abertura por um fator de 2, aumenta-se a blindagem em 6 dB. A Figura 17 mostra a efetividade da blindagem para várias frequências de acordo com o comprimento da abertura.

Em instalações práticas, o comprimento máximo das aberturas deveria ser menor que 1/20 do comprimento de onda para garantir uma efetividade da blindagem de pelo menos 20 dB. Da Equação 8 ou da Figura 17, pode ser obtido o correspondente comprimento máximo para uma efetividade da blindagem requerida.

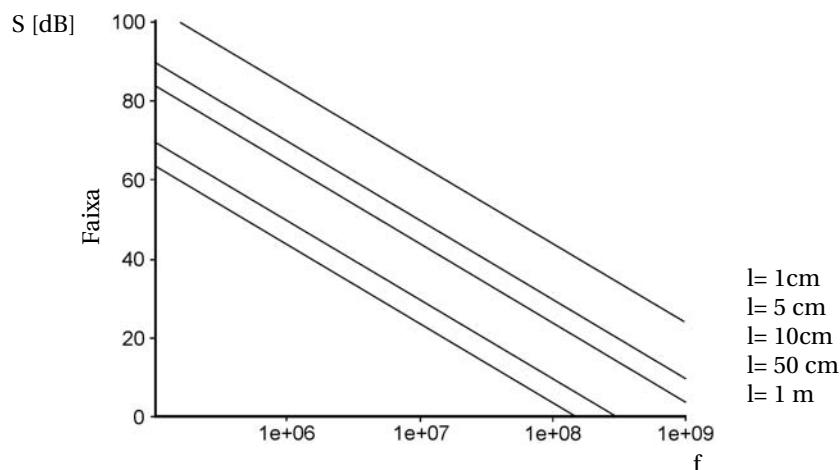


Figura 17 - Efetividade da blindagem de uma abertura de vários comprimentos em função da frequência.

## Complexa IEM na prática

Em uma situação prática de IEM, todos os acoplamentos elementares discutidos anteriormente coexistem em uma complexa combinação. Um exemplo simples de um sistema de automação (Figura 18) mostra que todos os acoplamentos se aplicam a um único sistema em contato com seu ambiente ao mesmo tempo.

Qualquer sistema isolado está embutido em uma rede de outros sistemas e juntos eles formam um sistema de inter-relações complexas de IEM. Para garantir um funcionamento adequado do sistema completo, a chamada matriz de CEM tem que ser feita e avaliada no processo de planejamento, tanto para edificações novas quanto reformas.

## A diretiva CEM e sua relevância para as instalações em edificações

As diretivas européias pretendem assegurar que todos os produtos fabricados ou vendidos na Comunidade Européia estejam conforme normas harmonizadas e possam ser vendidos para todos os Estados Membros sem regulamentos adicionais. No caso da CEM, a diretiva EU 89/336, emendada pelas diretivas 91/263/EEC, 92/31/EEC, 93/68/EEC e 93/97/EEC, apresenta normas gerais para que qualquer produto

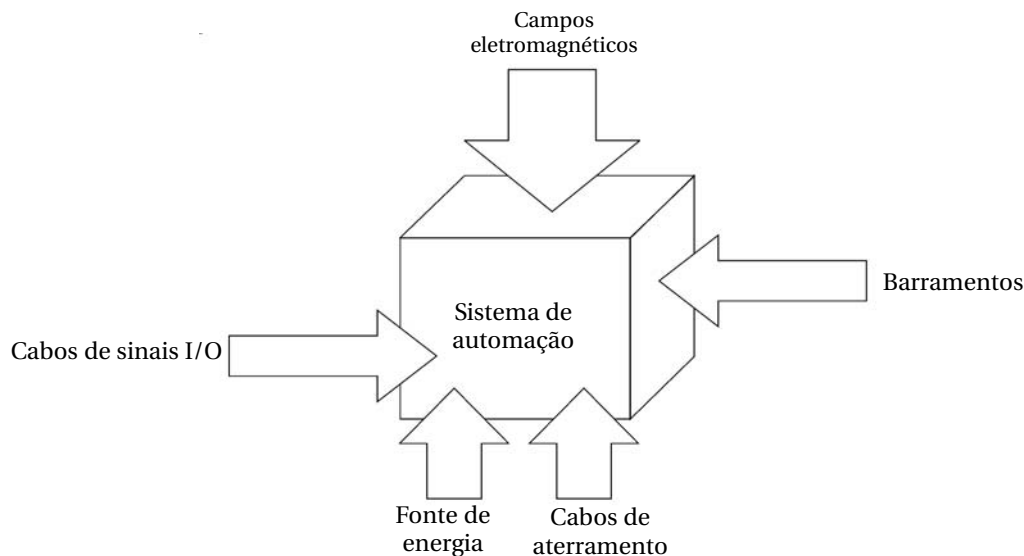


Figura 18 - Vários caminhos de acoplamento em um sistema de automação

possa garantir compatibilidade eletromagnética através da restrição do nível de emissão máximo do produto e sua imunidade mínima para IEM externa. O fabricante de qualquer produto transportável tem que declarar a conformidade do produto com as normas da União Européia (EU). O produto tem que ser marcado com o sinal “CE” para certificar sua adequação com a CEM e outras diretivas para o consumidor.

A declaração de conformidade e o sinal “CE” não são requeridos para as instalações elétricas, porém o atendimento das normas das diretivas da UE tem que ser garantidas. Esta é a tarefa dos responsáveis pelo projeto, engenharia e montagem da instalação elétrica. Há meios de garantir e verificar esta conformidade. O primeiro é usar módulos de CEM qualificados, que são instalados por pessoal treinado em CEM. O segundo é usar qualquer módulo disponível e certificar o atendimento à CEM da instalação por medição realizada por um laboratório de CEM ou um organismo acreditado. Em qualquer caso, o planejador tem que atestar a conformidade com as normas de CEM das diretivas da EU através de documentos apropriados. Além disso, o “fabricante” da instalação tem que fornecer instruções claras para operação e manutenção de acordo com o Anexo III diretiva da UE. Estas instruções têm que dar informação sob as condições de instalação, montagem, ajuste, comissionamento, uso e manutenção. Onde necessário, devem ser incluídas advertências sobre limitações de uso.

O modo mais seguro para garantir a conformidade de uma instalação elétrica de uma edificação pode ser a obediência às regras seguintes:

- Considerar a CEM desde o início e utilizar os serviços de um especialista em CEM, se necessário;
- Usar apenas módulos e materiais que são certificados para CEM;
- Usar pessoal treinado em CEM para os trabalhos de instalação;
- Engenheiros qualificados em CEM deveriam supervisionar o trabalho de instalação.

Como o assunto de CEM foi introduzido em cursos de treinamento relativamente recentes, há necessidade de educação adicional neste assunto.



## Referências

- G Durcansky: EMC Correct Design of Apparatus (in German), Francis, 1995.*
- Electromagnetic Compatibility (EMC), Guide to the Application of Directive 89/336/EEC, European Communities 1997.*
- S Fassbinder: Disturbances of the Power Supply Network by Active and Passive Components (in German), VDE Verlag 2002.*
- J Goedbloed: Electromagnetic Compatibility (in German), Pflaum Verlag, 1990.*
- M Grapentin: EMC for the Installation of Buildings (in German), Verlag Technik, 2000.*
- E Habiger: Electromagnetic Compatibility (in German), Hüthig, 1998.*
- B Keiser: Principles of EMC, Artech House, 1987.*
- VP Kodali: Engineering Electromagnetic Compatibility, IEEE Press, 1996.*
- A Kohling: EMC of Buildings, Facilities and Apparatus (in German), VDE-Verlag, 1998.*
- G Lehner: Theory of Electromagnetic Fields (in German), Springer, 1994.*
- H W Ott: Noise Reduction Techniques in Electronic Systems, A Wiley, 1988.*
- C R Paul: Introduction to Electromagnetic Compatibility, John Wiley, 1992.*
- D Peier: Electromagnetic Compatibility (in German), Hüthig, 1990.*
- A Rodewald: Electromagnetic Compatibility (in German), Vieweg, 1995 .*
- W Rudolph, O Winter: EMC according VDE 0100 (in German), VDE-Verlag, 2000.*
- W Rudolph: An EMC Primer for Electricians (in German), VDE-Verlag, 2001.*
- Guideline Electromagnetic Compatibility (in German), EMC-Guideline ZX62920D, 1998, Groupe Schneider.*
- A Schwab: Electromagnetic Compatibility (in German), Springer, 1996.*
- DIN/VDE 0848 : Safety in Electrical, Magnetic and Electromagnetic Fields (in German).*



# Referências & Membros Fundadores

European Copper Institute* (ECI) <a href="http://www.eurocopper.org">www.eurocopper.org</a>	ETSII - Universidad Politécnica de Madrid <a href="http://www.etsii.upm.es">www.etsii.upm.es</a>	LEM Instruments <a href="http://www.lem.com">www.lem.com</a>
Akademia Gorniczko-Hutnicza (AGH) <a href="http://www.agh.edu.pl">www.agh.edu.pl</a>	Fluke Europe <a href="http://www.fluke.com">www.fluke.com</a>	MGE UPS Systems <a href="http://www.mgeups.com">www.mgeups.com</a>
Centre d'Innovació Tecnològica en Convertidors Estàtics i Accionaments (CITCEA-UPC) <a href="http://www.citcea.upc.es">www.citcea.upc.es</a>	Hochschule für Technik und Wirtschaft* (HTW) <a href="http://www.htw-saarland.de">www.htw-saarland.de</a>	Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg <a href="http://www.uni-magdeburg.de">www.uni-magdeburg.de</a>
Comitato Elettrotecnico Italiano (CEI) <a href="http://www.ceiuni.it">www.ceiuni.it</a>	Hogeschool West-Vlaanderen Departement PIH <a href="http://www.pih.be">www.pih.be</a>	Polish Copper Promotion Centre* (PCPC) <a href="http://www.miedz.org.pl">www.miedz.org.pl</a>
Copper Benelux* <a href="http://www.copperbenelux.org">www.copperbenelux.org</a>	International Union for Electricity Applications (UIE) <a href="http://www.uie.org">www.uie.org</a>	Università di Bergamo* <a href="http://www.unibg.it">www.unibg.it</a>
Copper Development Association* (CDA UK) <a href="http://www.cda.org.uk">www.cda.org.uk</a>	ISR - Universidade de Coimbra <a href="http://www.isr.uc.pt">www.isr.uc.pt</a>	University of Bath <a href="http://www.bath.ac.uk">www.bath.ac.uk</a>
Deutsches Kupferinstitut* (DKI) <a href="http://www.kupferinstitut.de">www.kupferinstitut.de</a>	Istituto Italiano del Rame* (IIR) <a href="http://www.iir.it">www.iir.it</a>	The University of Manchester <a href="http://www.manchester.ac.uk">www.manchester.ac.uk</a>
Engineering Consulting & Design* (ECD) <a href="http://www.ecd.it">www.ecd.it</a>	Katholieke Universiteit Leuven* (KU Leuven) <a href="http://www.kuleuven.ac.be">www.kuleuven.ac.be</a>	Wroclaw University of Technology* <a href="http://www.pwr.wroc.pl">www.pwr.wroc.pl</a>
EPRI Solutions Inc <a href="http://www.epri.com/epriolutions">www.epri.com/epriolutions</a>	Laborelec <a href="http://www.laborelec.com">www.laborelec.com</a>	

## Conselho Editorial

David Chapman (Chief Editor)	CDA UK	david.chapman@copperdev.co.uk
Prof. Angelo Baggini	Università di Bergamo	angelo.baggini@unibg.it
Dr. Araceli Hernández Bayo	ETSII - Universidad Politécnica de Madrid	ahernandez@etsii.upm.es
Prof. Ronnie Belmans	UIE	ronnie.belmans@esat.kuleuven.ac.be
Dr. Franco Bua	ECD	franco.bua@ecd.it
Jean-Francois Christin	MGE UPS Systems	jean-francois.christin@mgeups.com
Prof. Anibal de Almeida	ISR - Universidade de Coimbra	adealmeida@isr.uc.pt
Hans De Keulenaer	ECI	hdk@eurocopper.org
Prof. Jan Desmet	Hogeschool West-Vlaanderen	jan.desmet@howest.be
Dr. ir Marcel Didden	Laborelec	marcel.didden@laborelec.com
Dr. Johan Driesen	KU Leuven	johan.driesen@esat.kuleuven.ac.be
Stefan Fassbinder	DKI	sfassbinder@kupferinstitut.de
Prof Zbigniew Hanzelka	Akademia Gorniczko-Hutnicza	hanzel@uci.agh.edu.pl
Stephanie Horton	ERA Technology s	tephanie.horton@era.co.uk
Dr. Antoni Klajn	Wroclaw University of Technology	antoni.klajn@pwr.wroc.pl
Kees Kokee	Fluke Europe BV	kees.kokee@fluke.nl
Prof. Wolfgang Langguth	HTW	wlang@htw-saarland.de
Prof. Henryk Markiewicz	Wroclaw University of Technology	henryk.markiewicz@pwr.wroc.pl
Carlo Masetti	CEI	masetti@ceiuni.it
Mark McGranaghan	EPRI Solutions	mmcgranaghan@epriolutions.com
Dr. Jovica Milanovic	The University of Manchester	jovica.milanovic@manchester.ac.uk
Dr. Miles Redfern	University of Bath	eesmar@bath.ac.uk
Dr. ir Tom Sels	KU Leuven	tom.sels@esat.kuleuven.ac.be
Prof. Dr-Ing Zbigniew Styczynski	Universität Magdeburg	Sty@E-Technik.Uni-Magdeburg.de
Andreas Sumper	CITCEA-UPC	sumper@citcea.upc.edu
Roman Targosz	PCPC	cem@miedz.org.pl
Dr. Ahmed Zobaa	Cairo University	azmailinglist@link.net



*Prof. Dr. Wolfgang Langguth*



Hochschule für Technik und Wirtschaft  
EMC Laboratory  
University of Applied Sciences  
Goebenstrasse. 40  
66 117 Saarbrücken  
Germany

Tel: 0049 681 5867279  
Fax: 0049 681 5867122  
Website: [www.htw-saarland.de](http://www.htw-saarland.de)



Av. Brigadeiro Faria Lima, 2128 - cj.203  
Cep 01451-903  
São Paulo - SP  
Brasil

Tel./Fax: 55 11 3816-6383  
e-mail: [procobrebrasil@eurocopper.org](mailto:procobrebrasil@eurocopper.org)  
Internet: [www.procobre.org](http://www.procobre.org)



European Copper Institute  
168 Avenue de Tervueren  
B-1150 Brussels  
Belgium

Tel: 00 32 2 777 70 70  
Fax: 00 32 2 777 70 79  
e-mail: [eci@eurocopper.org](mailto:eci@eurocopper.org)  
Website: [www.eurocopper.org](http://www.eurocopper.org)