EMI - Interferência Eletromagnética em instalações industriais e muito mais

Introdução

A convivência de equipamentos em diversas tecnologias diferentes somada à inadequação das instalações facilita a emissão de energia eletromagnética e com isto é comum que se tenha problemas de compatibilidade eletromagnética (EMC).Veja as figuras 1a até 1e.

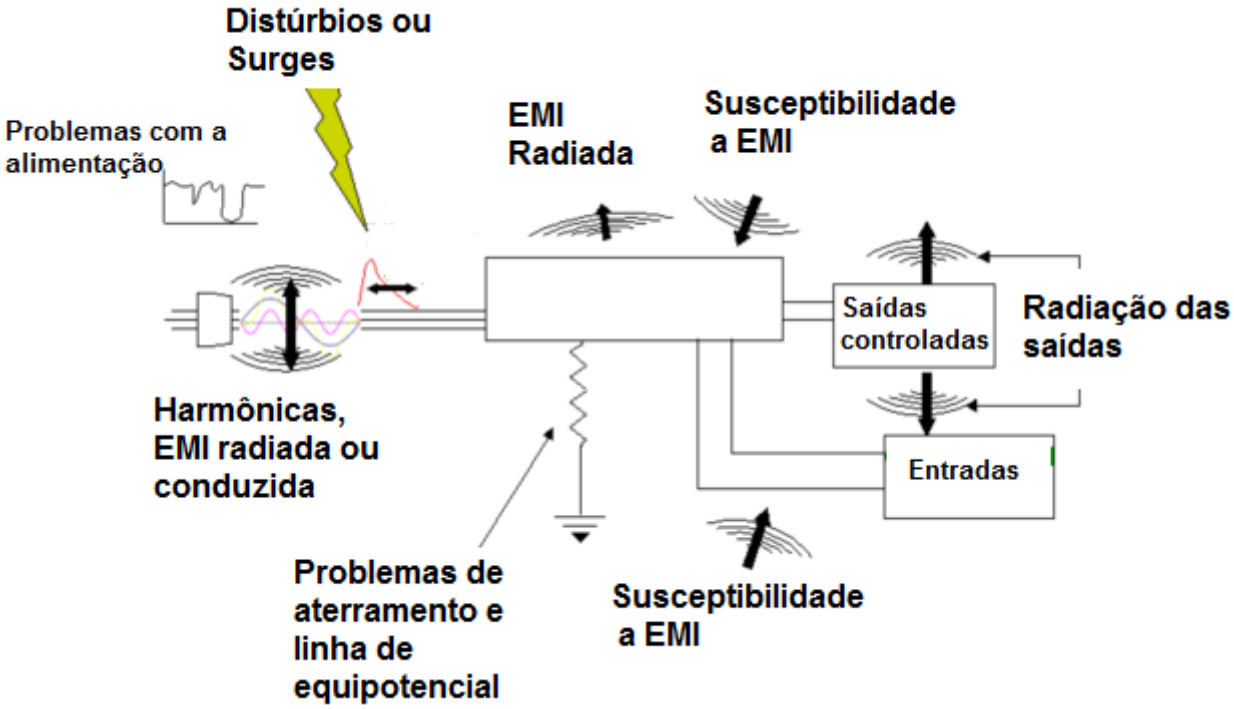


Figura 1a – Fontes de EMC

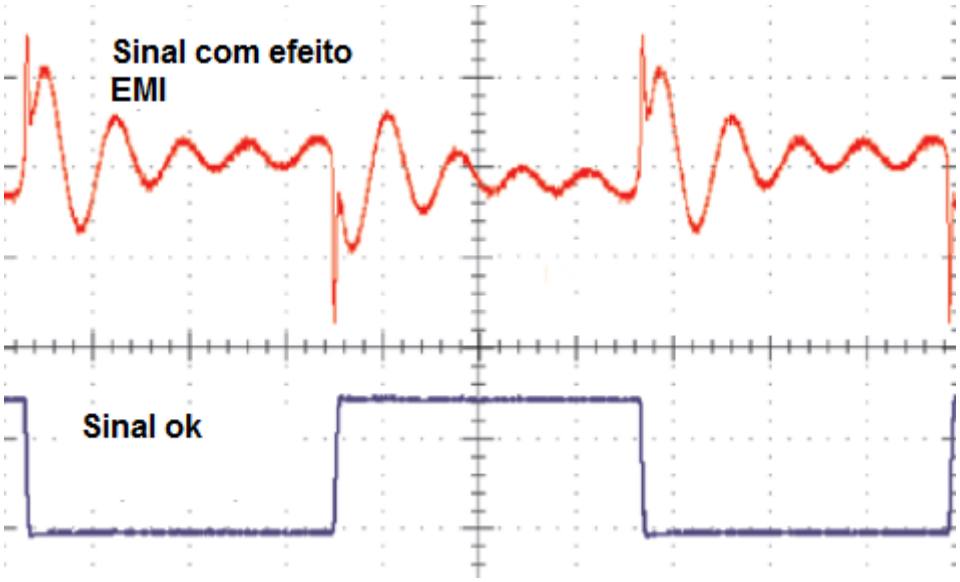


Figura 1b – Sinal afetado por efeitos EMI



Figura 1c – Problemas com EMI

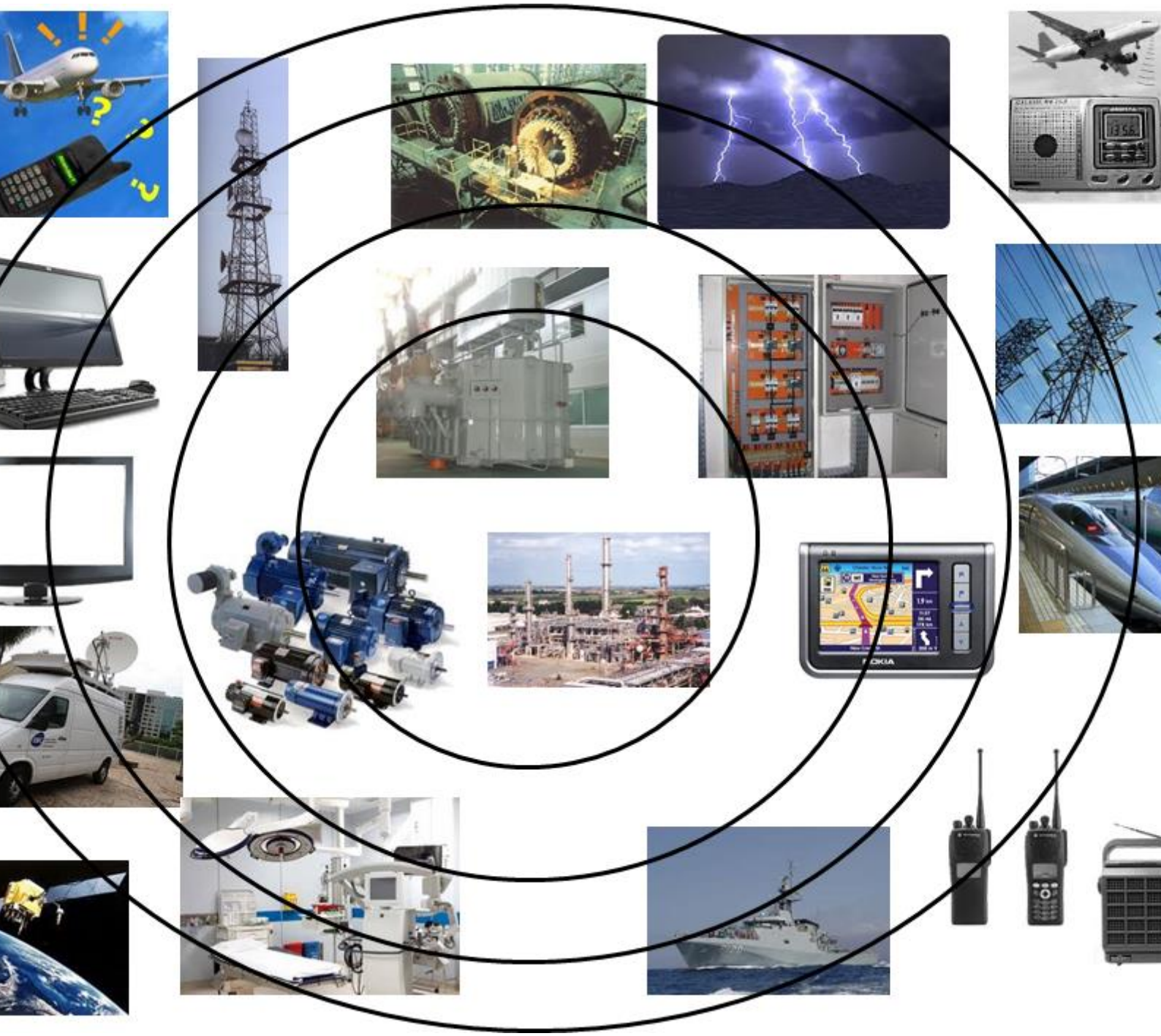


Figura 1d – Ambiente Eletromagnético

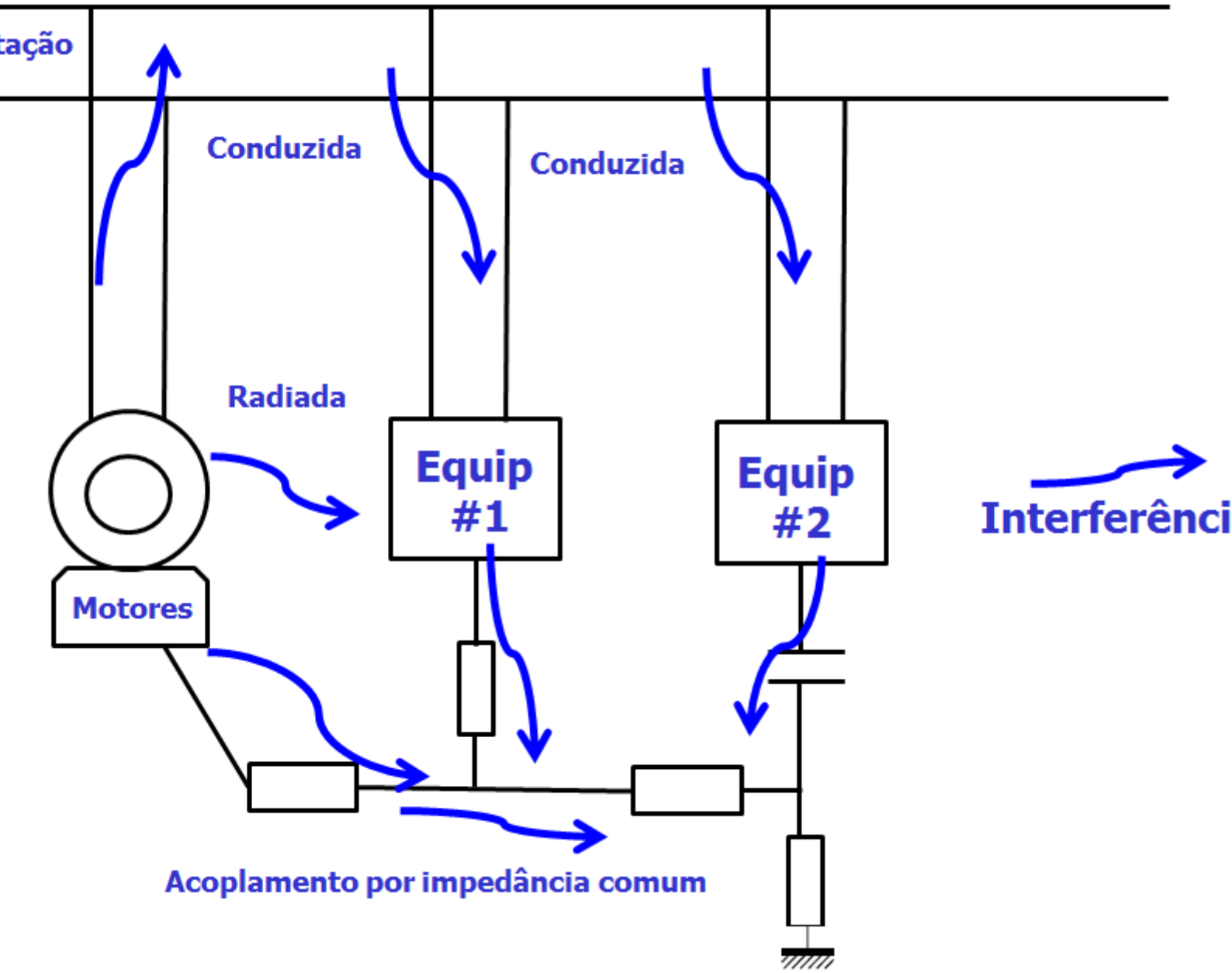


Figura 1e – Ambiente Eletromagnético e instalação típica com suas interferências

Veja o espectro eletromagnético na figura 2.

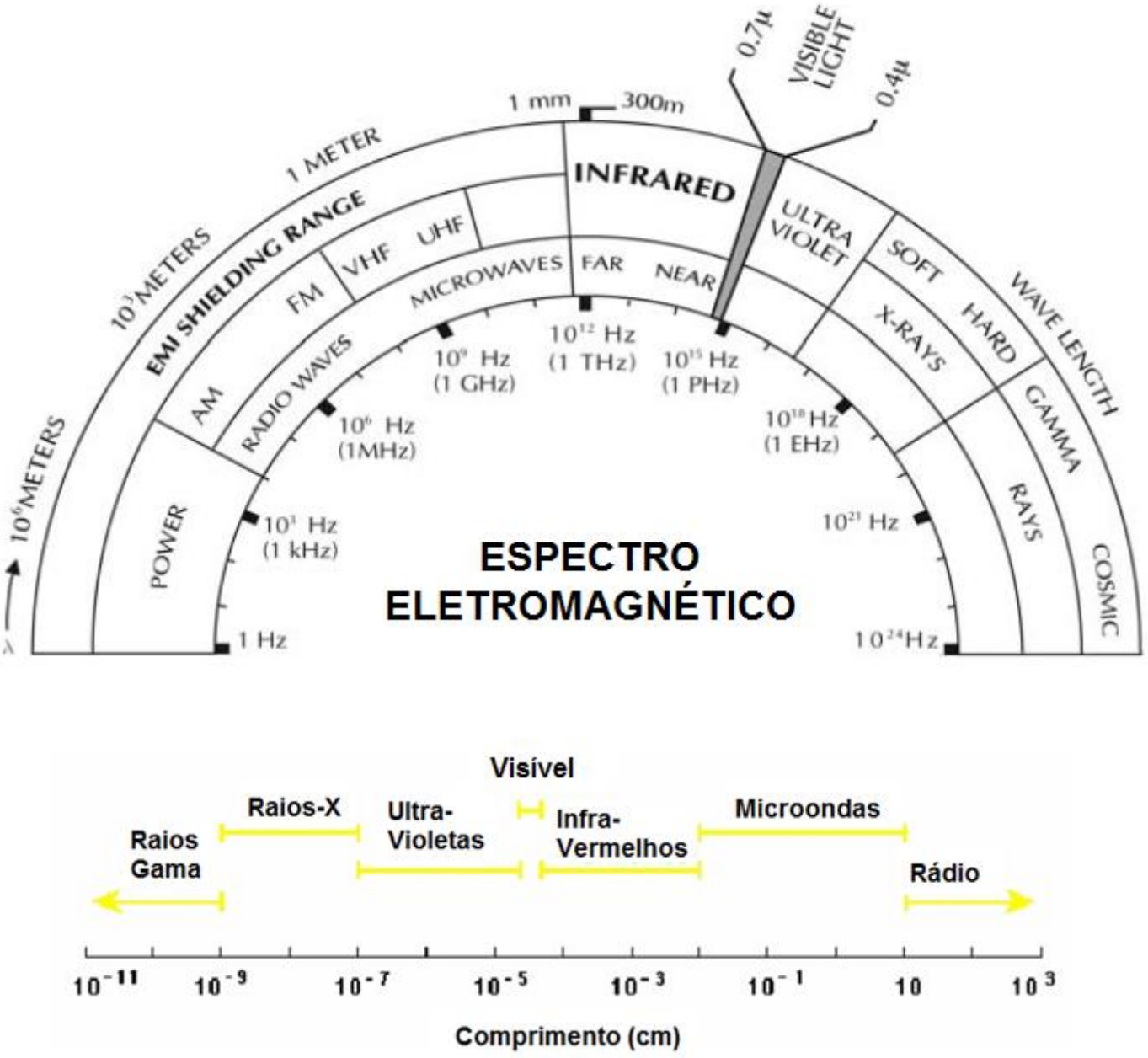


Figura 2 - Espectro eletromagnético

Espectro de Radiação Eletromagnética				
Região	**Comp. Onda (Angstroms)**	**Comp. Onda (centímetros)**	**Frequência (Hz)**	**Energia (eV)**
Rádio	$> 10^9$	> 10	$< 3 \times 10^9$	$< 10^{-5}$
Micro-ondas	$10^9 - 10^6$	10 - 0.01	$3 \times 10^9 - 3 \times 10^{12}$	$10^{-5} - 0.01$
Infra-vermelho	10^6 - 7000	$0.01 - 7 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{12} - 4.3 \times 10^{14}$	0.01 - 2
Visível	7000 - 4000	$7 \times 10^{-5} - 4 \times 10^{-5}$	$4.3 \times 10^{14} - 7.5 \times 10^{14}$	2 - 3
Ultravioleta	4000 - 10	$4 \times 10^{-5} - 10^{-7}$	$7.5 \times 10^{14} - 3 \times 10^{17}$	$3 - 10^3$
Raios-X	10 - 0.1	$10^{-7} - 10^{-9}$	$3 \times 10^{17} - 3 \times 10^{19}$	$10^3 - 10^5$
Raios Gama	< 0.1	$< 10^{-9}$	$> 3 \times 10^{19}$	$> 10^5$

Tabela 1a - Comprimento de onda, frequência e energia para regiões selecionadas do espectro eletromagnético

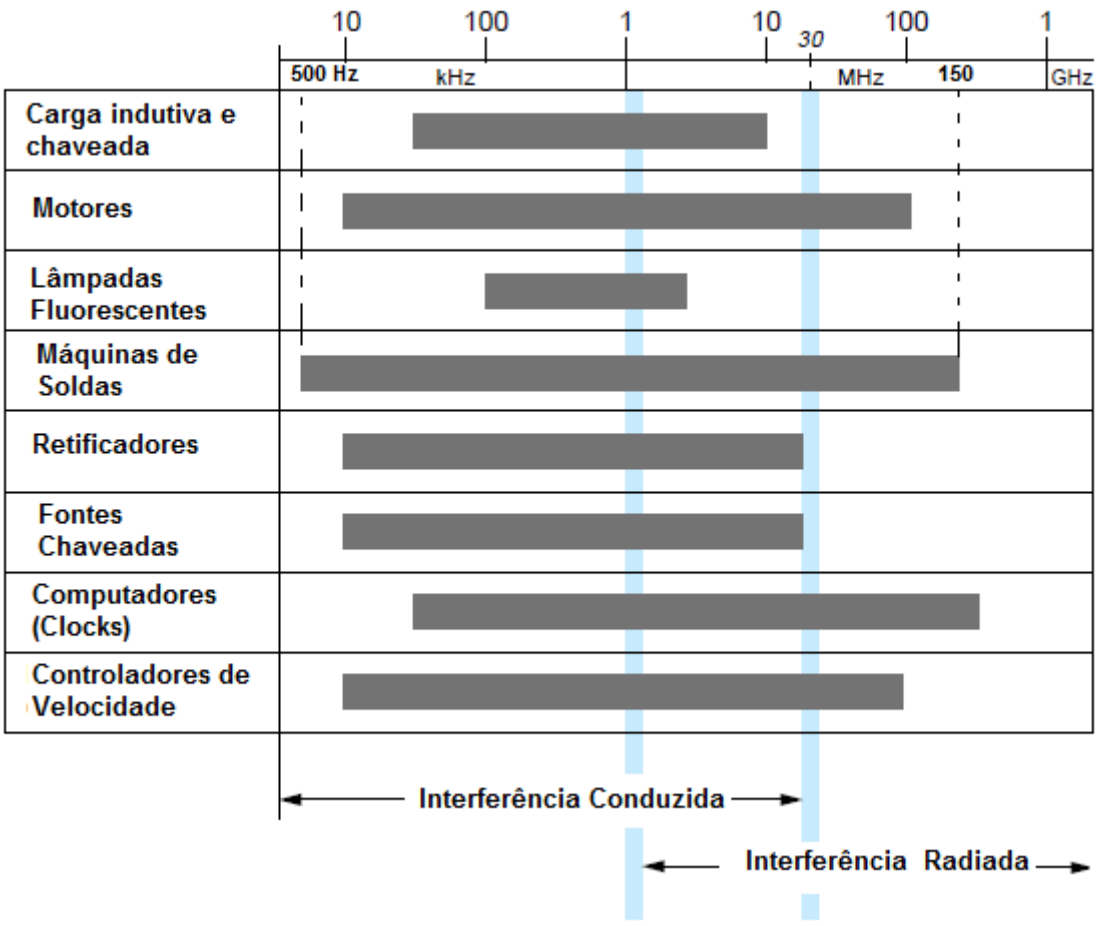


Tabela 1b – Espectro de Interferência

Classificação	Nível de sinal/m
Residência Rural	até 3 V/m
Residência Urbano	até 10 V/m
Comercial	até 10 V/m
Indústria - Leve	até 3 V/m
Indústria - Pesada	até 30 V/m
Tráfego	até 30 V/m
Centros de Comunicações dedicados	até 1 V/m
Hospital	até 3 V/m

Tabela 1c - Ambiente Eletromagnético de acordo com a IEC

A EMI é a energia que causa resposta indesejável a qualquer equipamento e que pode ser gerada por centelhamento nas escovas de motores, chaveamento de circuitos de potência, em acionamentos de cargas indutivas e resistivas, acionamentos de relés, chaves, disjuntores, lâmpadas fluorescentes, aquecedores, ignições automotivas, descargas atmosféricas e mesmo as descargas eletrostáticas entre pessoas e equipamentos, aparelhos de microondas, equipamentos de comunicação móvel, etc.

Tudo isto pode provocar alterações causando sobretensão, subtensão, picos, transientes, etc. e que em uma rede de comunicação pode ter seus impactos. Isto é muito comum nas indústrias e fábricas, onde a EMI é muito freqüente em função do maior uso de máquinas (máquinas de soldas, por exemplo), motores (CCMs) e as redes digitais e de computadores próximas a essas áreas.

O maior problema causado pela EMI são as situações esporádicas e que degradam aos poucos os equipamentos e seus componentes. Os mais diversos problemas podem ser gerados pela EMI, por exemplo, em equipamentos eletrônicos, podemos ter falhas na comunicação entre dispositivos de uma rede de equipamentos e/ou computadores, alarmes gerados sem explicação, atuação em relés que não seguem uma lógica e sem haver comando para isto e, queima de componentes e circuitos eletrônicos, etc. É muito comum a presença de ruídos na alimentação pelo mau aterramento e blindagem, ou mesmo erro de projeto.

A topologia e a distribuição do cabeamento, os tipos de cabos, as técnicas de proteções são fatores que devem ser considerados para a minimização dos efeitos de EMI. Lembrar que em altas frequências, os cabos se comportam como um sistema de transmissão com linhas cruzadas e confusas, refletindo energia e espalhando-a de um circuito a outro. Mantenha em boas condições as conexões. Conectores inativos por muito tempo podem desenvolver resistência ou se tornar detectores de RF.

Um exemplo típico de como a EMI pode afetar o comportamento de um componente eletrônico, é um capacitor que fique sujeito a um pico de tensão maior que sua tensão nominal especificada, com isto pode-se ter a degradação do dielétrico (a espessura do dielétrico é limitada pela tensão de operação do capacitor, que pode produzir um gradiente de potencial inferior à rigidez dielétrica do material), causando um mau funcionamento e em alguns casos a própria queima do capacitor. Ou ainda, podemos ter a alteração de correntes de polarização de transistores levando-os a saturação ou corte, ou dependendo da intensidade a queima de componentes por efeito joule.

Uma instalação inadequada ou o uso de um equipamento em aplicações não recomendadas podem prejudicar a performance de um sistema e conseqüentemente, a performance do processo, além de representar uma fonte de perigo e acidentes. Recomenda-se assim a utilização somente de profissionais treinados e qualificados para instalação, operação e manutenção.

Muitas vezes a confiabilidade de um sistema de controle é frequentemente colocada em risco devido às suas más instalações. Comumente, os usuários fazem vistas grossas e em análises mais criteriosas, descobre-se problemas com as instalações, envolvendo cabos e suas rotas e acondicionamentos, blindagens e aterramentos.

É de extrema importância que haja a conscientização de todos os envolvidos e mais do que isto, o comprometimento com a confiabilidade, segurança operacional e pessoal em uma planta.

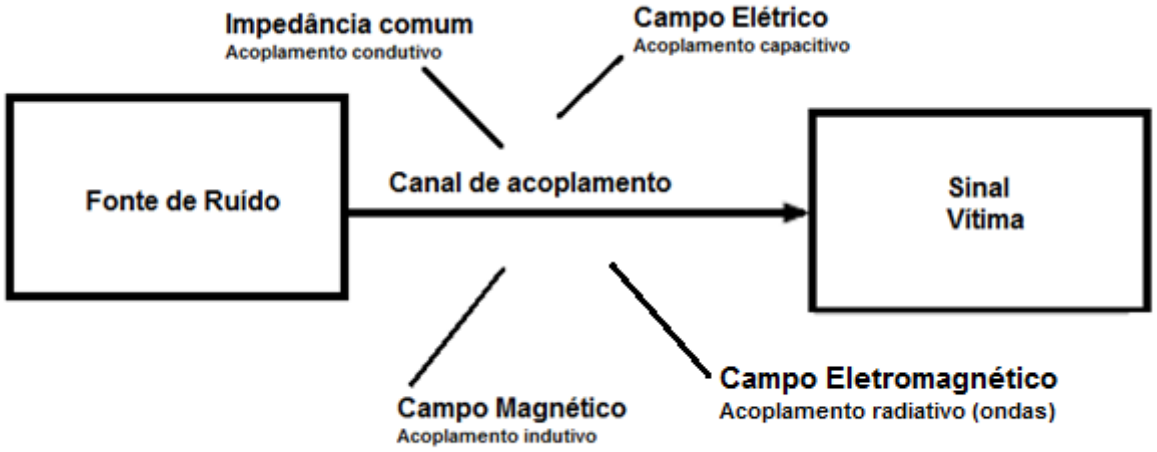
Controlar o ruído em sistemas de automação é vital, porque ele pode se tornar um problema sério mesmo nos melhores instrumentos e hardware de aquisição de dados e atuação.

Qualquer ambiente industrial contém ruído elétrico em fontes, incluindo linhas de energia AC, sinais de rádio, máquinas e estações, etc.

Felizmente, dispositivos e técnicas simples, tais como, a utilização de métodos de aterramento adequado, blindagem, fios trançados, os métodos média de sinais, filtros e amplificadores diferenciais podem controlar o ruído na maioria das medições.

Por exemplo, os inversores de frequências contêm circuitos de comutação que podem gerar interferência eletromagnética (EMI). Eles contêm amplificadores de
alta energia de comutação que podem gerar EMI significativa nas frequências de 10
MHz a 300 MHz. Certamente existe potencial de que este ruído de comutação possa gerar intermitências em equipamentos em suas proximidades. Enquanto a maioria dos fabricantes toma os devidos cuidados em termos de projetos para minimizar este efeito, a imunidade completa não é possível. Algumas técnicas então de layout, fiação, aterramento e blindagem contribuem significativamente nesta minimização.

A redução da EMI irá minimizar os custos iniciais e futuros problemas de funcionamento em qualquer sistema.



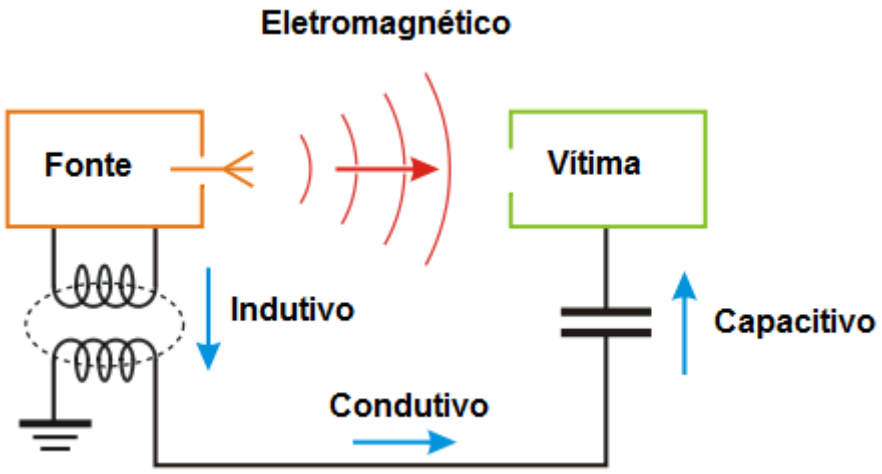


Figura 3a – Vários tipos de acoplamento gerando ruído em instalações industriais

Os sinais podem variar basicamente devido a:

- Flutuação de tensão;
- Harmônicas de corrente;
- RF conduzidas e radiadas;
- Transitórios (condução ou radiação);
- Campos Eletrostáticos;
- Campos Magnéticos;
- Reflexões;
- Crosstalk;
- Atenuações;
- Jitter (ruído de fase);
- Etc.

As principais fontes de interferências e que veremos a seguir em detalhes são:

- Acoplamento capacitivo (interaçãormo de campos elétricos entre condutores);
- Acoplamento indutivo (acompanhadas por um campo magnético. O nível de perturbação depende das variações de corrente (di /dt) e da indutância de acoplamento mútuo);
- Condução através de impedância comum (aterramento): Ocorre quando as correntes de duas áreas diferentes passam por uma mesma impedância. Por exemplo, o caminho de aterramento comum de dois sistemas

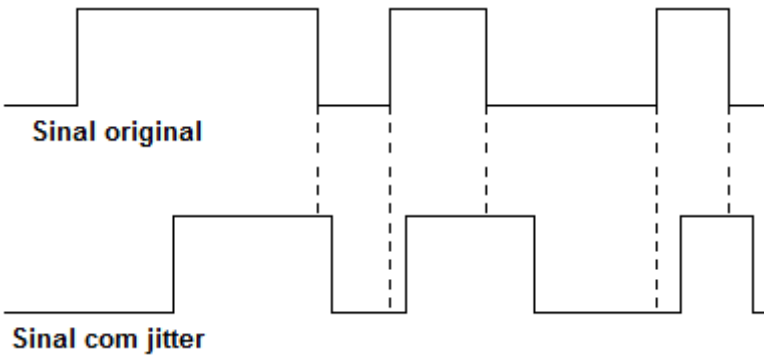


Figura 3b – Sinal alterado por deslocamento de fase (jitter)

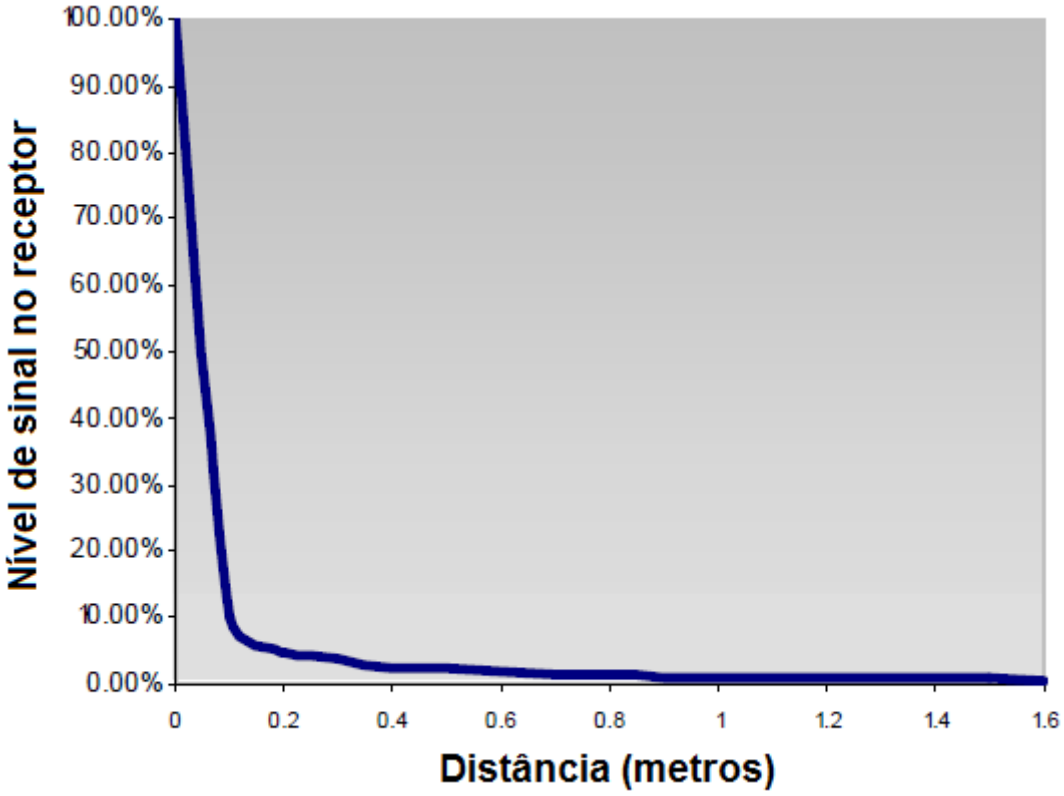


Figura 3c – Exemplo de nível de sinal RF atingindo um dispositivo

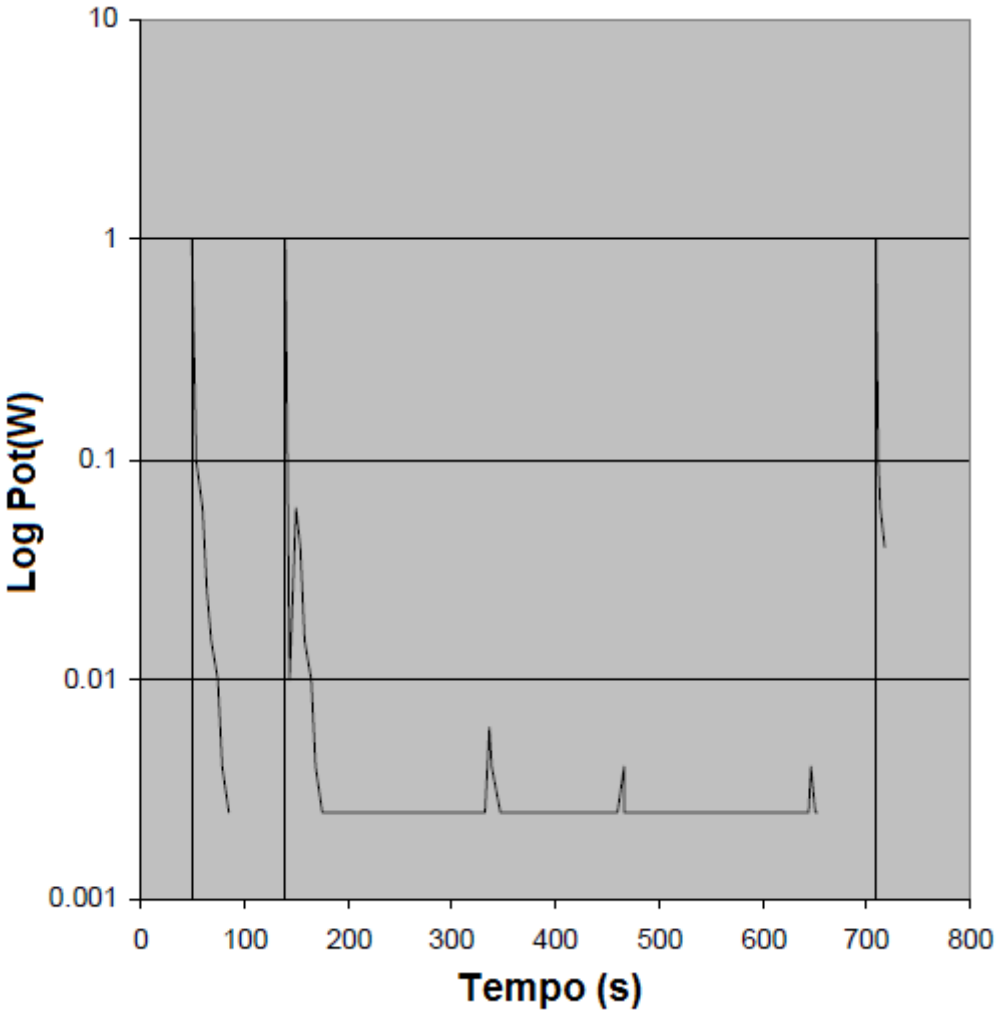


Figura 3d – Nível de potência de 3 chamadas de telefone celular a 900/1800 MHz

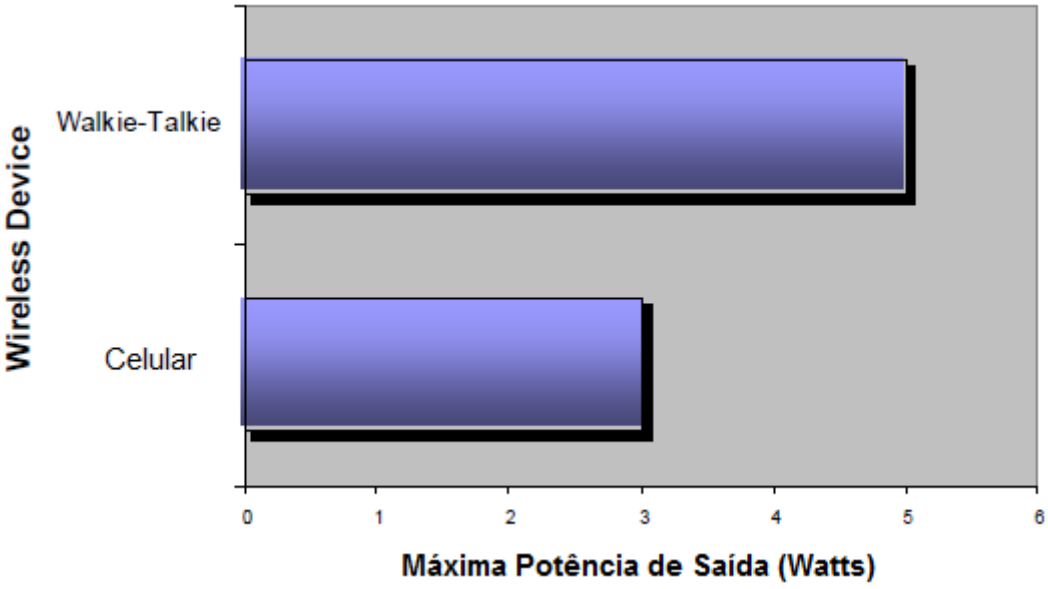


Figura 3e – Nível de potência de rádios e celulares

Alguns pontos importantes para entender os princípios de EMC

Existem alguns conceitos básicos e importantes que é interessante equalizarmos para entender melhor os efeitos de emissão eletromagnética:

- Tudo que for sinal AC em nível de tensão ou corrente é realmente energia eletromagnética (Watts, Joules) propagando como onda.
- Ondas eletromagnéticas consistem de campo elétrico(E) e campo magnético(H).
- Quando um condutor é exposto a uma onda eletromagnética, seus elétrons livres se movem ao redor em resposta a esta onda, gerando o que chamamos de corrente. Isto é chamado de princípio de *reciprocidade*.
- A propagação de ondas eletromagnéticas e seus associados campos, são moldados pelas “antenas acidentais” formadas pelos caminhos de ida e volta da corrente e dos materiais dielétricos ao seu redor.A idéia é projetar caminhos que minimizam as “antenas acidentais”, reduzindo as emissões e aumentando a imunidade.
- Existem os acoplamentos capacitivos, indutivos e por impedância comum.
- Os elétrons são naturalmente forçados a fluir próximo a superfície do condutor.É o chamado efeito *skin* .
- As correntes de retorno automaticamente tomam caminhos que minimizam a energia total.
- Tudo apresenta uma impedância para as ondas eletromagnéticas.
- Onda eletromagnética é uma **combinação de um campo elétrico e um campo magnético**, esses campos se propagam numa mesma direção porém em planos ortogonais. É de conhecimento nosso que uma variação no campo magnético induz um campo elétrico e vice-versa, portanto numa onda eletromagnética o campo elétrico é gerado pelo campo magnético que por sua vez é gerado pelo campo elétrico, ambos se nutrindo num arranjo perfeito, veja a figura 4a.

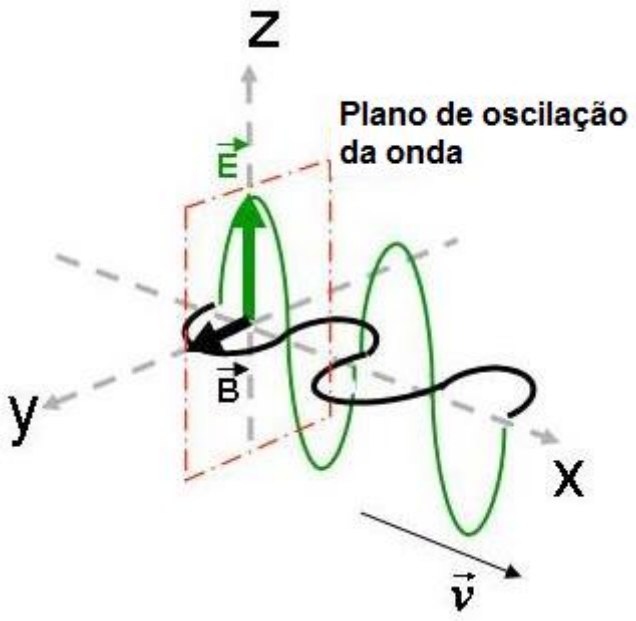


Figura 4a – Onda eletromagnética

- Além disso, os campos

  $\vec{E}$ e

  $\vec{B}$ são perpendiculares um ao outro e também à direção de propagação da onda que se desloca com velocidade v. Isso nos permite classificar a onda eletromagnética como onda **transversal.** A figura 4a mostra-nos a disposição dos campos elétricos e magnéticos de uma onda eletromagnética, e a direção e o sentido de sua propagação.

Tipos de interferências

Existem dois tipos de interferência, a interna e a externa. Pode ser contínua ou intermitente. Cada tipo tem sua própria causa. As causas mais comuns de interferência contínua são:

· 50/60 Hz Alimentação
· Motor Elétrico (Especialmente Comutador)
· Sinais de rádio de alta energia
· Fontes chaveadas
· Microondas

As causas de ruídos constantes são menos difícieis de se encontrar do que os problemas com ruídos intermitentes.

A fonte de ruído mais comum é constante, é aquela causada por uma fonte de alimentação 50/60 Hz. Alimentação é o componente de ruído mais comum porque é uma tensão oscilante, tem alta potência e tem um sistema de antena enorme.

Quase todos os sistemas tem filtros para 50/60 Hz. Esta filtragem pode evitar ou minimizar ruídos desta natureza.

Motores elétricos muitas vezes criam ruído de banda larga. Eles podem irradiar ruído em qualquer equipamento que esteja em sua proximidade. Motores DC frequentemente têm fontes chaveadas de modo que geram ruído de alta frequência através do terra comum. Este ruído de banda larga pode ser transmitido de volta através das linhas de fornecimento de energia ou através de um terra comum.

Rádio local, estações de televisão, radares e estações de rádio amador podem causar ruído de frequência de rádio.

Estas estações geram kW de energia e muitas vezes podem estar perto de áreas industriais.

A alimentação comutada é a fonte de ruído mais comum. É popular, faz parte dos equipamentos eletroeletrônicos. Ela cria grandes quantidades de harmônicas frequências.

Os ruídos intermitentes são difíceis de se encontrar as causas.

Um exemplo é um raio que, tipicamente, pode conter de 20 a 40 kA e milhões de Volts. Além disso, o raio transmite ruído de banda larga que cobre todo o espectro de frequência DC. Isto, em conjunto com a corrente

e alta tensão, faz com que seja impossível se filtrar este ruído. O melhor método é proteger os dispositivos com shunts e supressores.

Outro exemplo comum em ambientes industriais é o comutar de relés que geralmente provoca o ruído relé de comutação. Este ruído é criado pelo campo magnético quando o relé é comutado.

O ruído gerado por máquinas de soldas é parecido com os ruídos de um raio, de alta de frequência e de banda larga. A diferença que neste caso pode ser facilmente identificado.

Vale ainda citar o ruído estático(gerado pela estática). Neste caso é muito difícil de se identificar como uma fonte de ruído, pois é invisível e muito intermitente. Embora muitas vezes pode ser gerada pelo homem, também pode ser de origem natural. O ruído estático também é semelhante ao raio com todos os seus atributos, porém em uma escala menor.

Perturbações eletromagnéticas

Qualquer fenômeno eletromagnético pode degradar o desempenho de um sistema. Vejamos algns itens relacionados a estas perturbações:

- Tensão de alimentação · esta sofre uma variedade de efeitos perturbadores durante a sua distribuição. Estas perturbações podem ser causadas por fontes na rede de alimentação ou pelos seus usuários, ou por cargas dentro de uma instalação. Seguem alguns distúrbios típicos neste caso:
    - Interrupções
    - Quedas de energia
    - Surges e Transientes
    - Distorções em forma de onda
    - Variações de amplitude e frequência
    - Flutuações de tensão
    - DC em AC redes
    - Linha elétrica carregando sinais

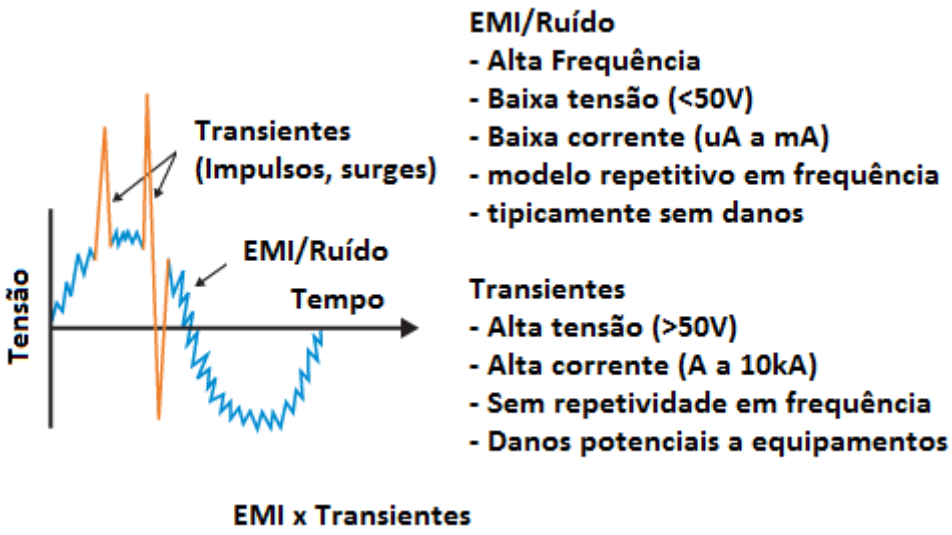


Figura 4b – EMI x Transientes

Causas e consequências da EMI

As conseqüências da EMI podem ser classificadas em diferentes categorias, dependendo da sua criticidade.

Vejamos algumas conseqüências dos efeitos de EMI:

- Falha de um item de segurança crítica em máquinas e equipamentos
- O funcionamento irregular do equipamento
- Um dispositivo de segurança pode ignorar um sinal
- Uma operação pode parar sem motivo aparente
- Um equipamento pode ter a sua função pretendida não executada e neste caso, com várias situações, desde a que não é percebida até a uma situação mais grave de um acidente.

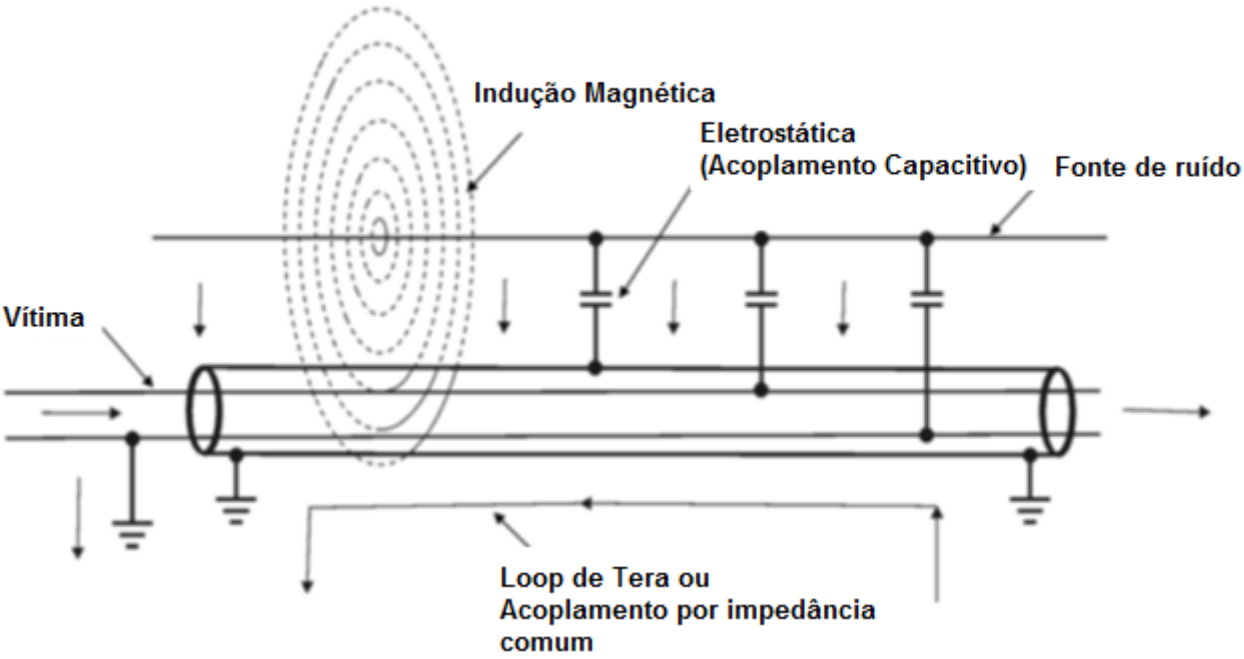


Figura 5 – Situação real de acoplamentos

Acoplamento Capacitivo

O acoplamento capacitivo é representado pela interação de campos elétricos entre condutores. Um condutor passa próximo a uma fonte de ruído (perturbador), capta este ruído e o transporta para outra parte do circuito (vítima). É o efeito de capacitância entre dois corpos com cargas elétricas, separadas por um dielétrico, o que chamamos de efeito da capacitância mútua.

Se o ruído resulta de um campo elétrico, a atuação do shield é eficaz, pois Q2 não existirá dentro de um invólucro fechado e aterrado.

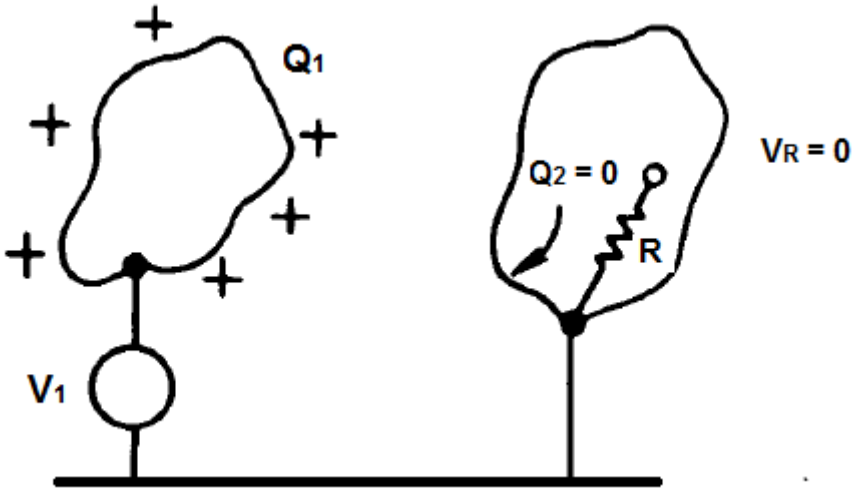


Figura 6 – A Carga Q1 não pode criar cargas em um invólucro metálico fechado e aterrado

Um acoplamento por campo elétrico é modelado como uma capacitância entre os dois circuitos, vide figura 5. A figura 7 mostra o modelo físico.

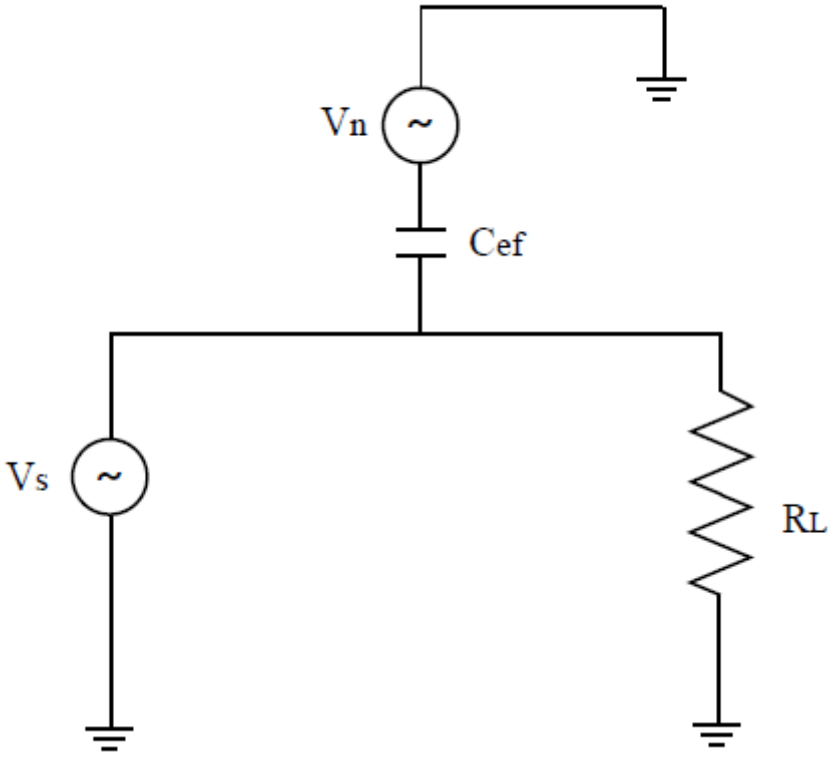


Figura 7 – Circuito equivalente do acoplamento capacitivo

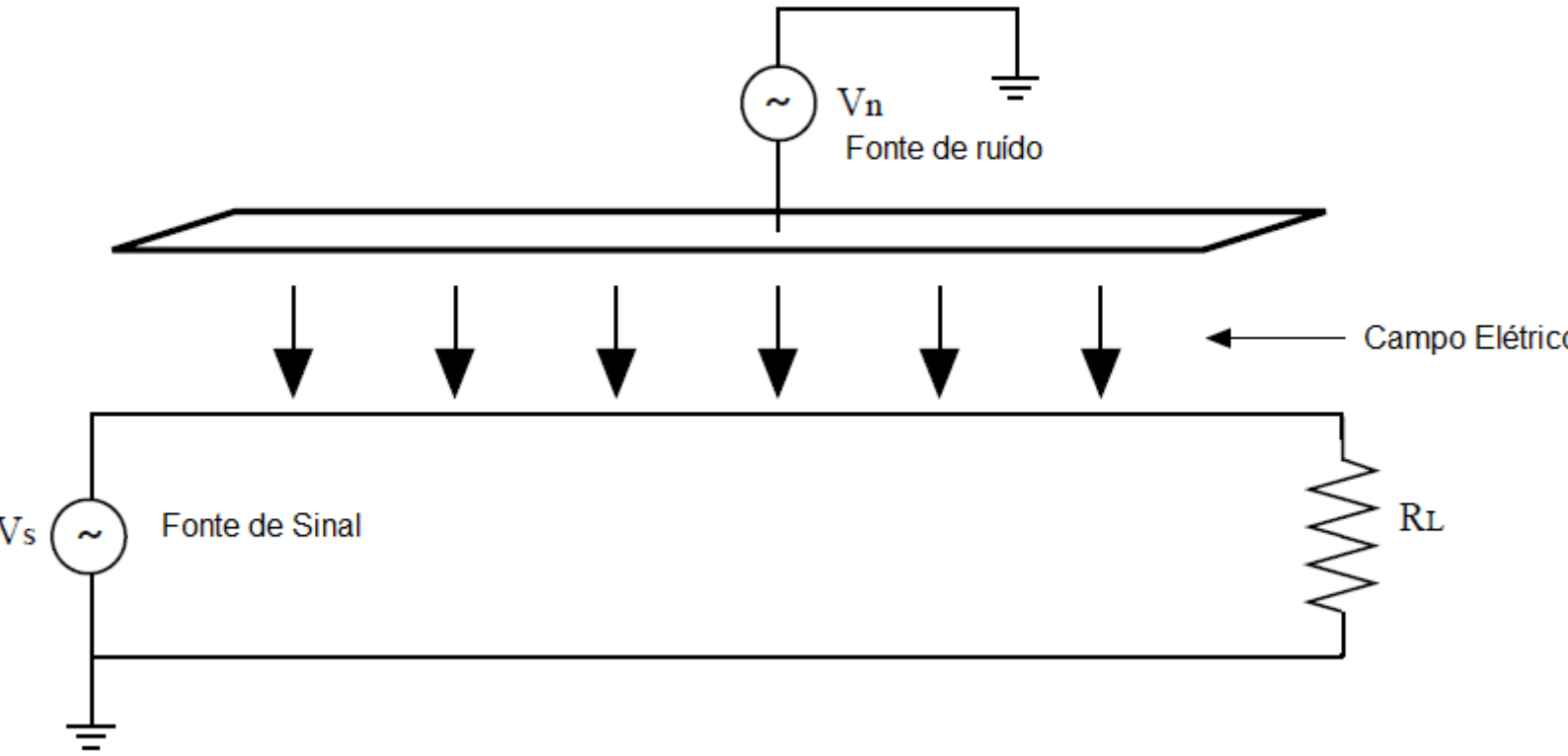


Figura 8 – Representação física do acoplamento capacitivo

A capacitância equivalente, Cef, é diretamente proporcional a área de atuação do campo elétrico e inversamente proporcional à distância entre os dois circuitos. Assim, aumentando-se a separação ou minimizando a área, a influência de Cef será minimizada e, consequentemente, o acoplamento capacitivo afetará menos o sinal.

É o efeito de capacitância entre dois corpos com cargas elétricas, separadas por um dielétrico, o que chamamos de efeito da capacitância mútua.

O efeito do campo elétrico é proporcional à frequência e inversamente proporcional à distância.

O nível de perturbação depende das variações da tensão (dv/dt) e o valor da capacitância de acoplamento entre o “cabo perturbador” e o “cabo vítima”.

A capacitância de acoplamento aumenta com:

- O inverso da frequência: O potencial para acoplamento capacitivo aumenta de acordo com o aumento da frequência (a reatância capacitiva, que pode ser considerada como a resistência do acoplamento capacitivo, diminui de acordo com a frequência, e pode ser vista na fórmula: XC = 1/2fC).
- A distância entre os cabos perturbadores e vítima e o comprimento dos cabos que correm em paralelo
- A altura dos cabos com relação ao plano de referência (em relação ao solo)
- A impedância de entrada do circuito vítima (circuitos de alta impedância de entrada são mais vulneráveis)
- O isolamento do cabo vítima (r do isolamento do cabo), principalmente para pares de cabos fortemente acoplados

As figuras 9 e 10 mostram exemplos de acoplamentos capacitivos.

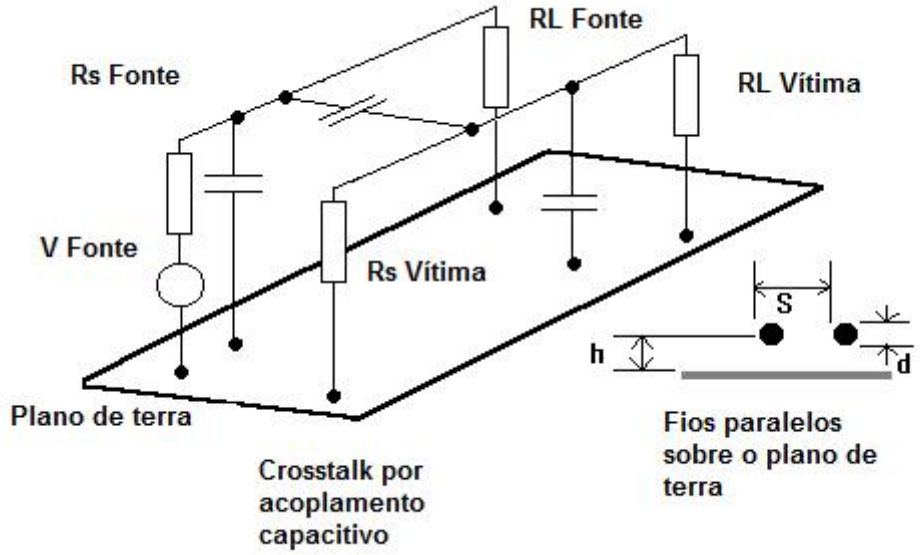


Figura 9 - Efeito por acoplamento capacitivo

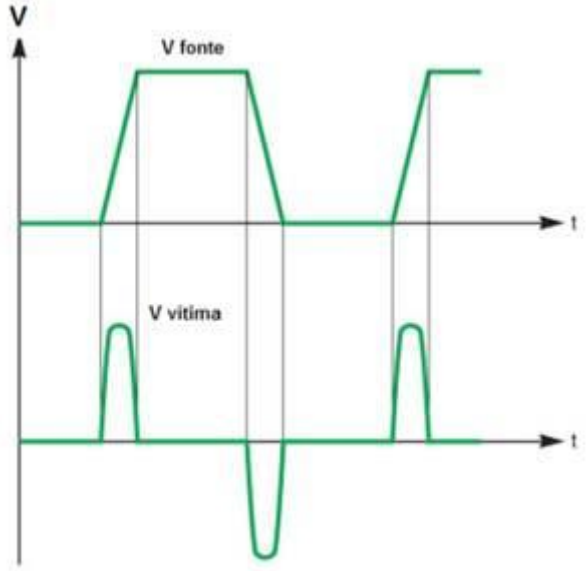
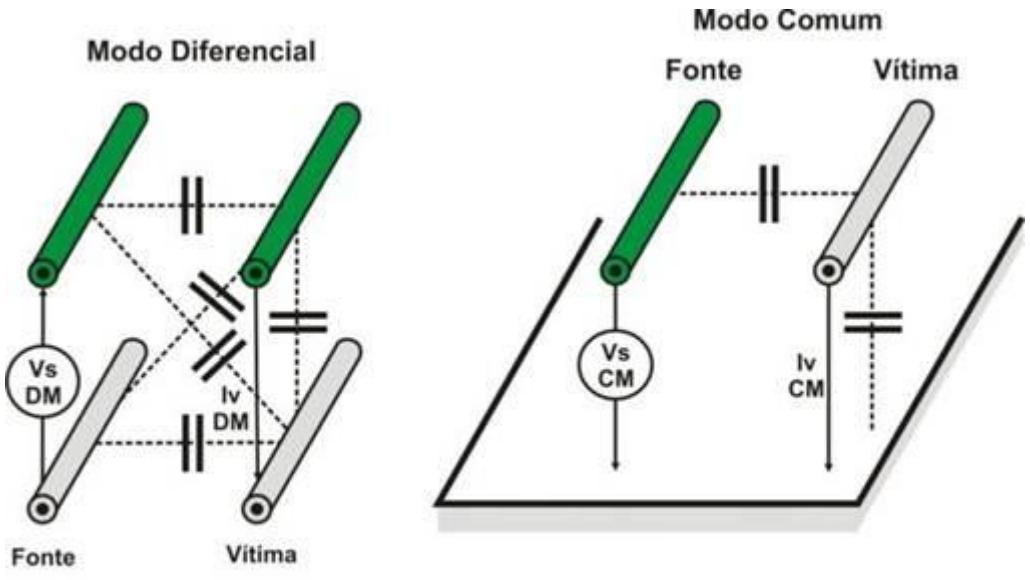


Figura 10 – Exemplo de efeito por acoplamento capacitivo

Na figura 11 podemos ver o acoplamento e suas fontes de tensão e corrente em modo comum e diferencial.



VsDM: (modo diferencial) - Fonte de distúrbio de tensão
IvDM: (modo diferencial) - Corrente de distúrbio no circuito vítima
VsDM: (modo comum) - Fonte de distúrbio de tensão
IvCM: (modo comum) - Corrente de distúrbio no circuito vítima

Figura 11 – Modo diferencial e modo comum – Acoplamento capacitivo

Medidas para reduzir o efeito do acoplamento capacitivo

- Limite o comprimento de cabos correndo em paralelo
- Aumente a distância entre o cabo perturbador e o cabo vítima
- Aterre uma das extremidades dos shields nos dois cabos
- Reduza o dv/dt do sinal perturbador, aumentando o tempo de subida do sinal, sempre que possível (baixando a frequência do sinal)

Envolva sempre que possível o condutor ou equipamento com material metálico (blindagem de Faraday). O ideal é que cubra cem por cento da parte a ser protegida e que se aterre esta blindagem para que a capacitância parasita entre o condutor e a blindagem não atue como elemento de realimentação ou de crosstalk. A figura 12 mostra a interferência entre cabos, onde o acoplamento capacitivo entre cabos induz transiente (pickups eletrostáticos) de tensão.Nesta situação a corrente de interferência é drenada ao terra pelo shield, sem afetar os níveis de sinais.

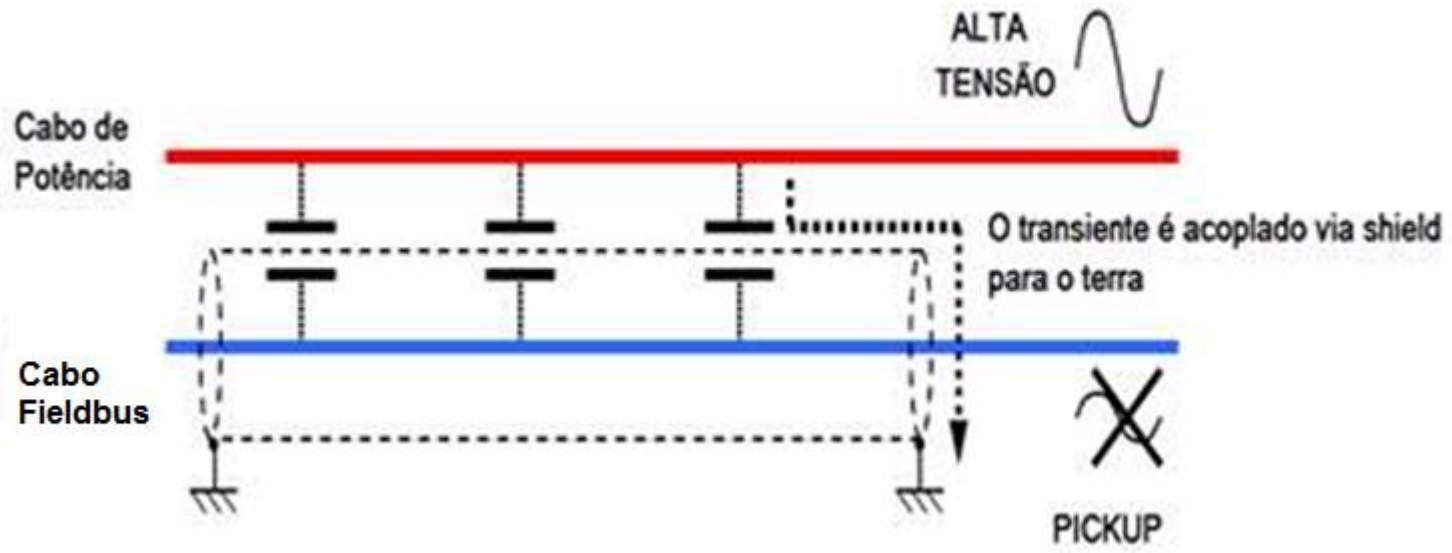
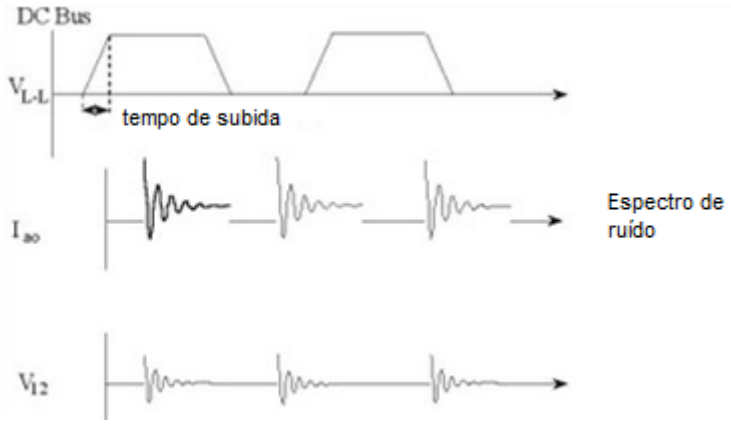
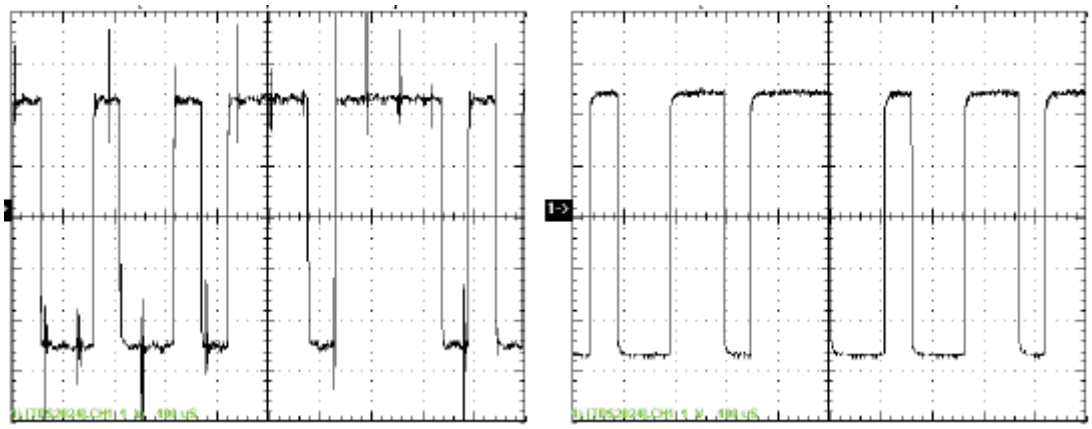


Figura 12 – Interferência entre cabos: o acoplamento capacitivo entre cabos induz transiente (pickups eletrostáticos) de tensão





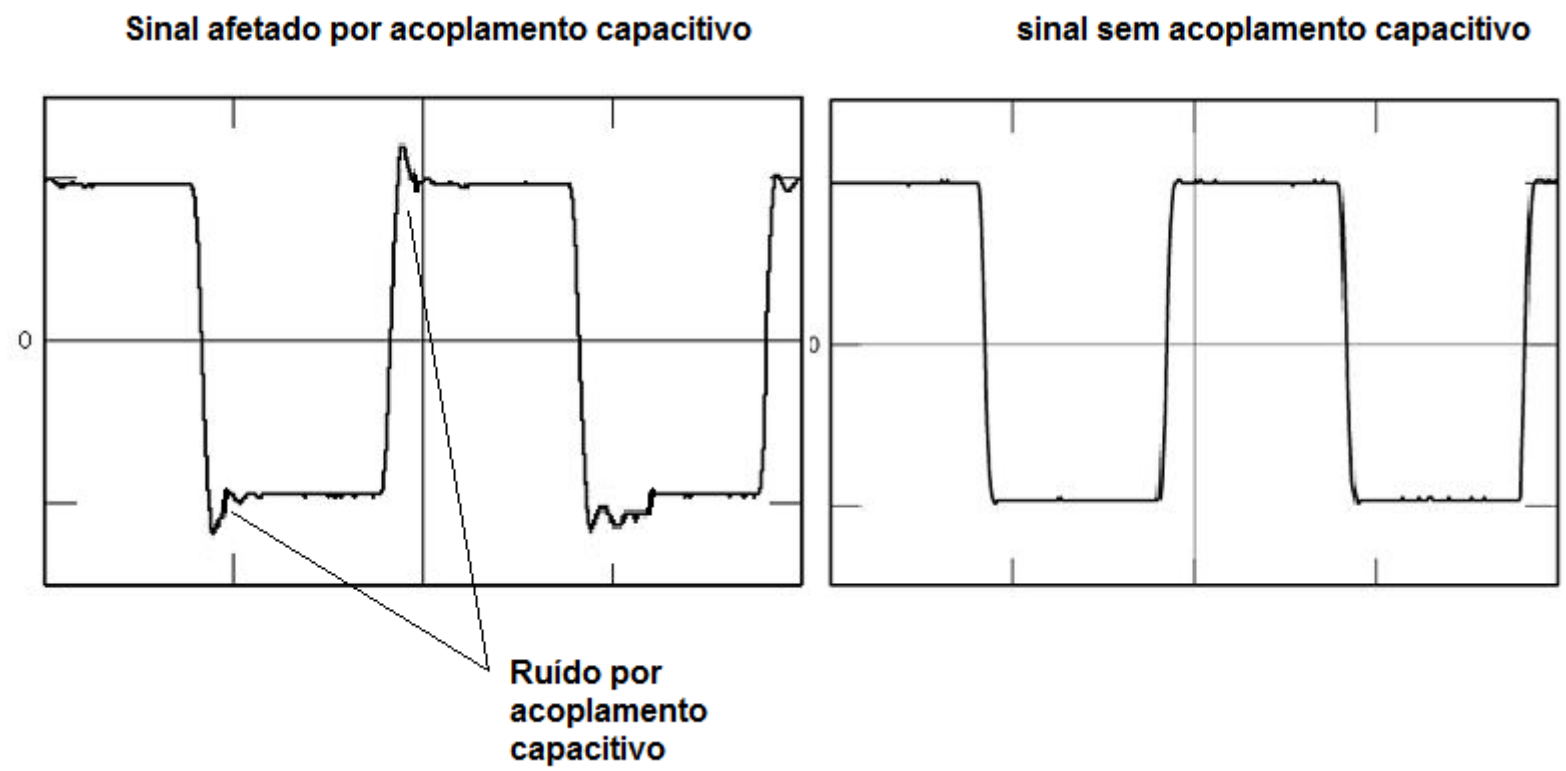


Figura 13 – Interferência entre cabos: o acoplamento capacitivo entre cabos induz transiente (pickups eletrostáticos) de tensão que podem atingir altas taxas de frequência

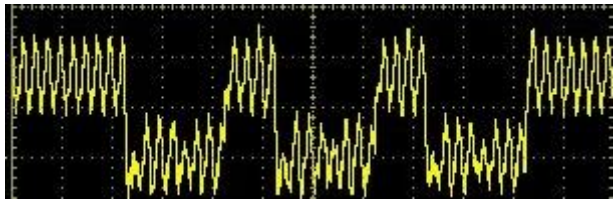


Figura 14 – Efeito capacitivo em cabo sem shield

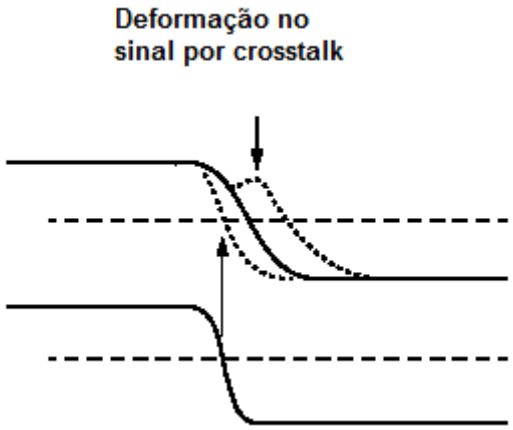


Figura 15 – Alterações em tempos de subida e descida

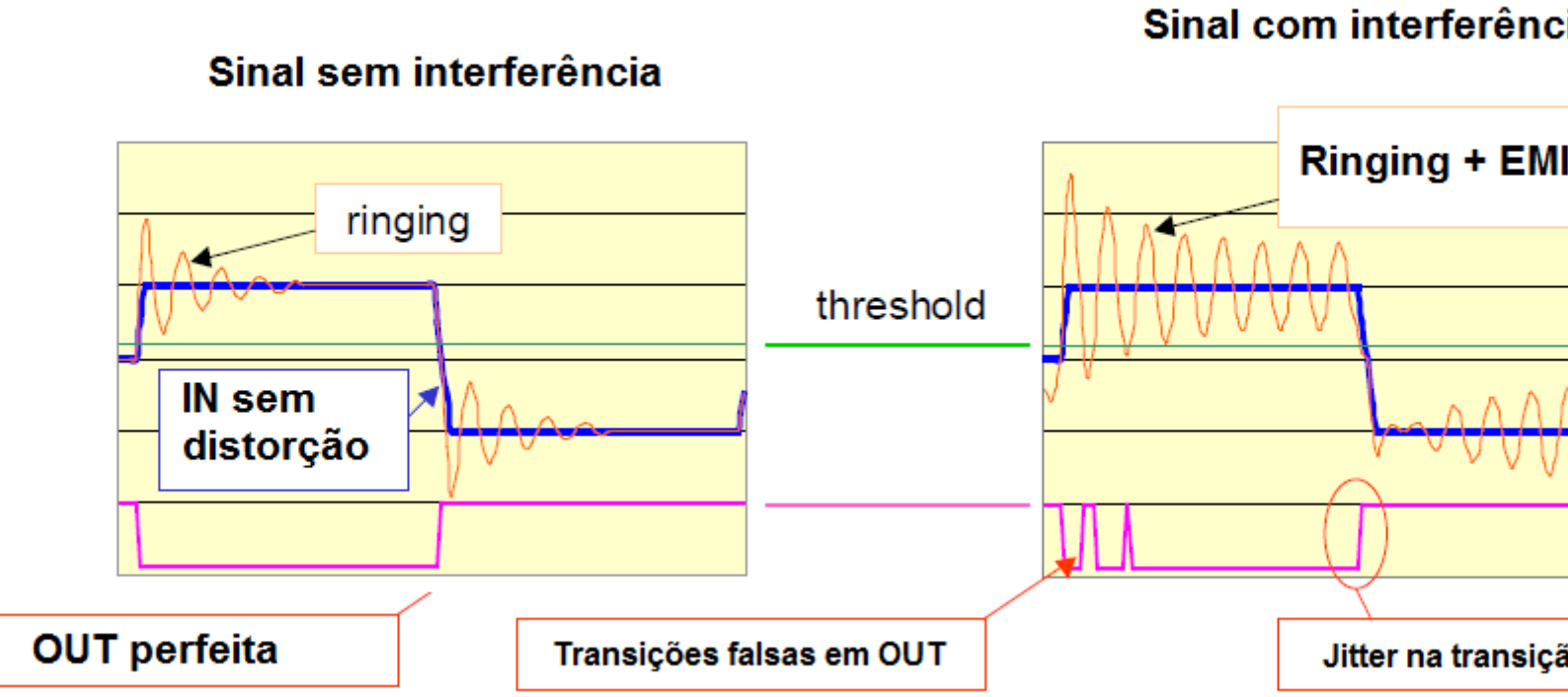


Figura 16a – Falsas transições na saída – Efeito EMI

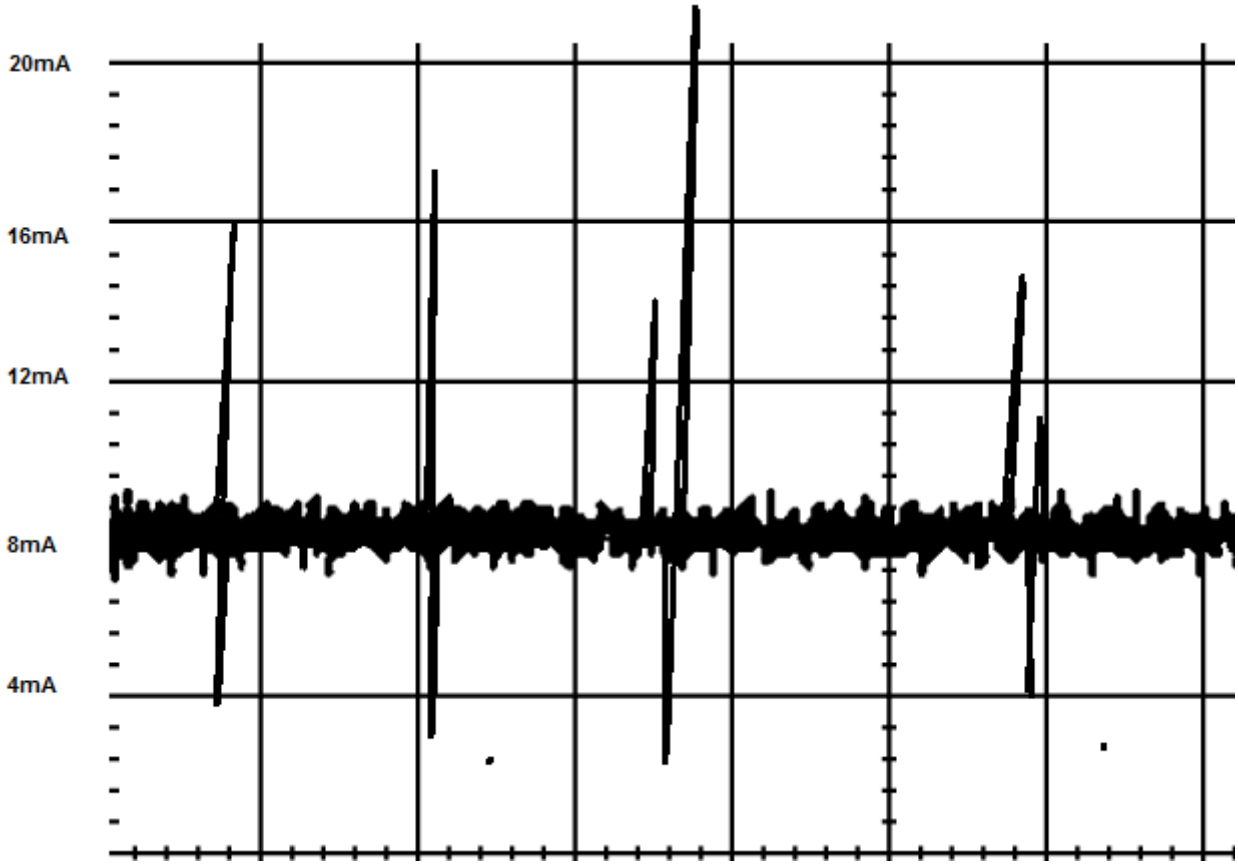
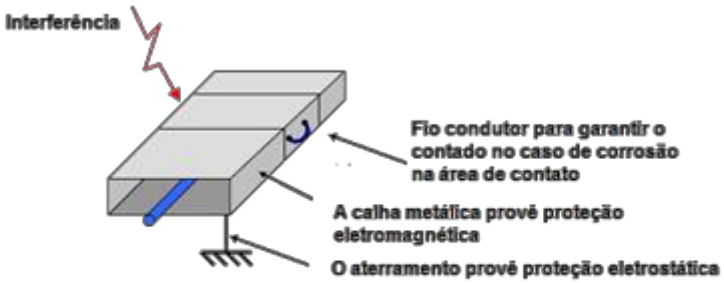


Figura 16b – Efeito EMI em sina 4-20mA

Quando se tem um sinal analógico em 4-20mA como o da figura 16b, o ruído em algumas situações passa despercebido, pois de uma forma geral afetará a média do sinal, às vezes, por exemplo, abrindo ou fechando mais uma válvula, implicando em perda de eficiência do controle do processo. Em medições críticas, como medições fiscais, acrescenta erros às medições.

A figura 17 mostra exemplo de proteção contra transientes.



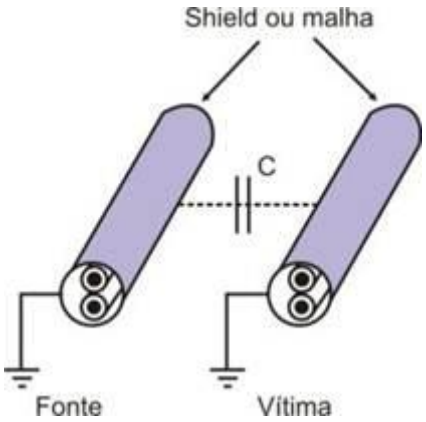


Figura 17 - Exemplo de proteção contra transientes (melhor solução contra corrente de Foucault)

Interferências eletrostáticas podem ser reduzidas:

1. Aterramento e blindagens adequadas

2. Isolação Ótica
3. Pelo uso de canaletas e bandejamentos metálicos aterrados

A influência pode ser minimizada usado-se adequadamente o shield que atuará como uma blindagem (gaiola de Faraday). A blindagem deve ser colocada entre os condutores capacitivamente acoplados e ligada à terra apenas em um ponto, no lado da fonte de sinal. Vide figura 19. A figura 18 mostra uma condição inadequada, onde se tem a corrente de loop circulando pelo shield.

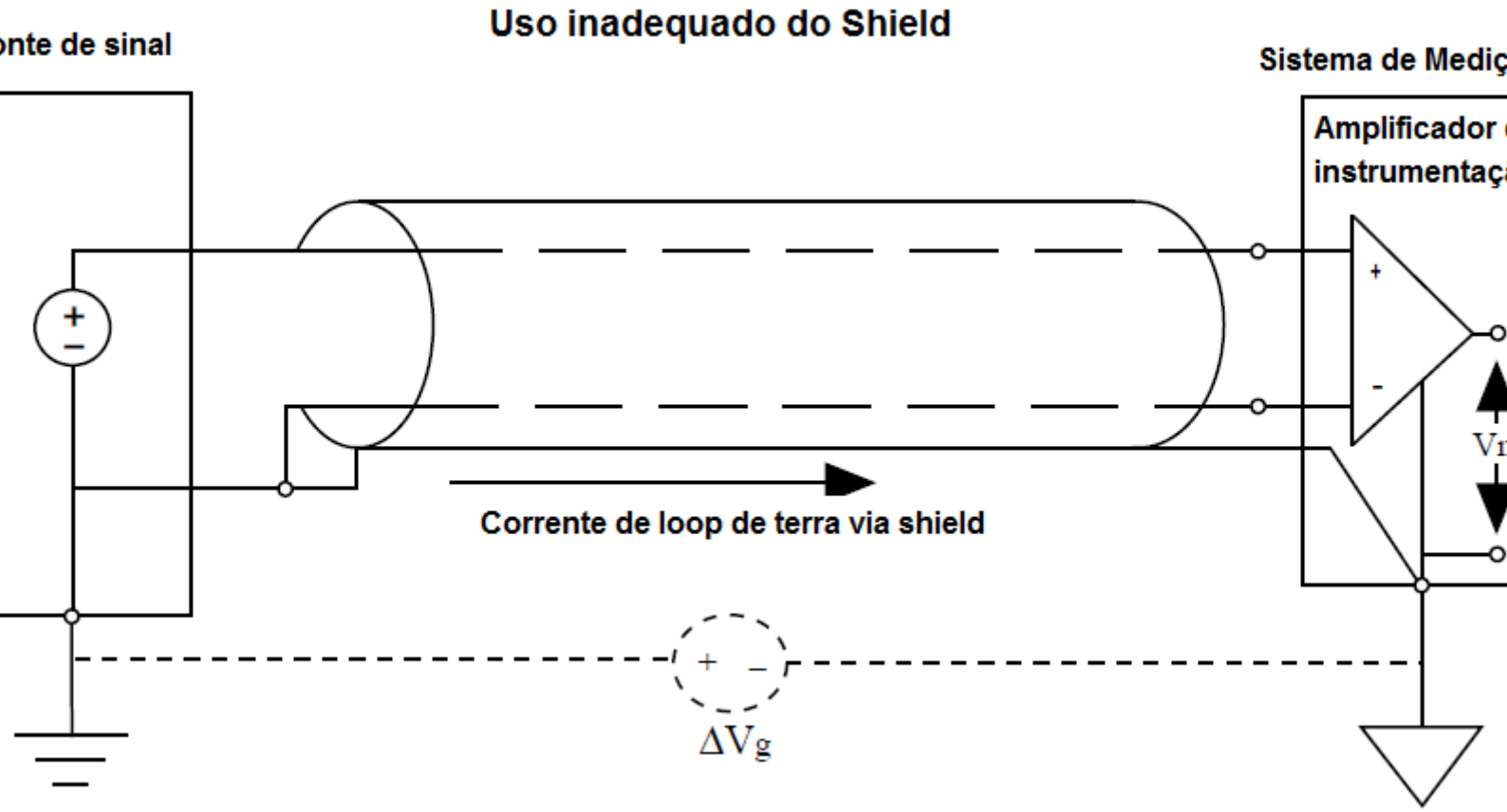


Figura 18 – Uso inadequado do shield, aterrado em mais de um ponto.

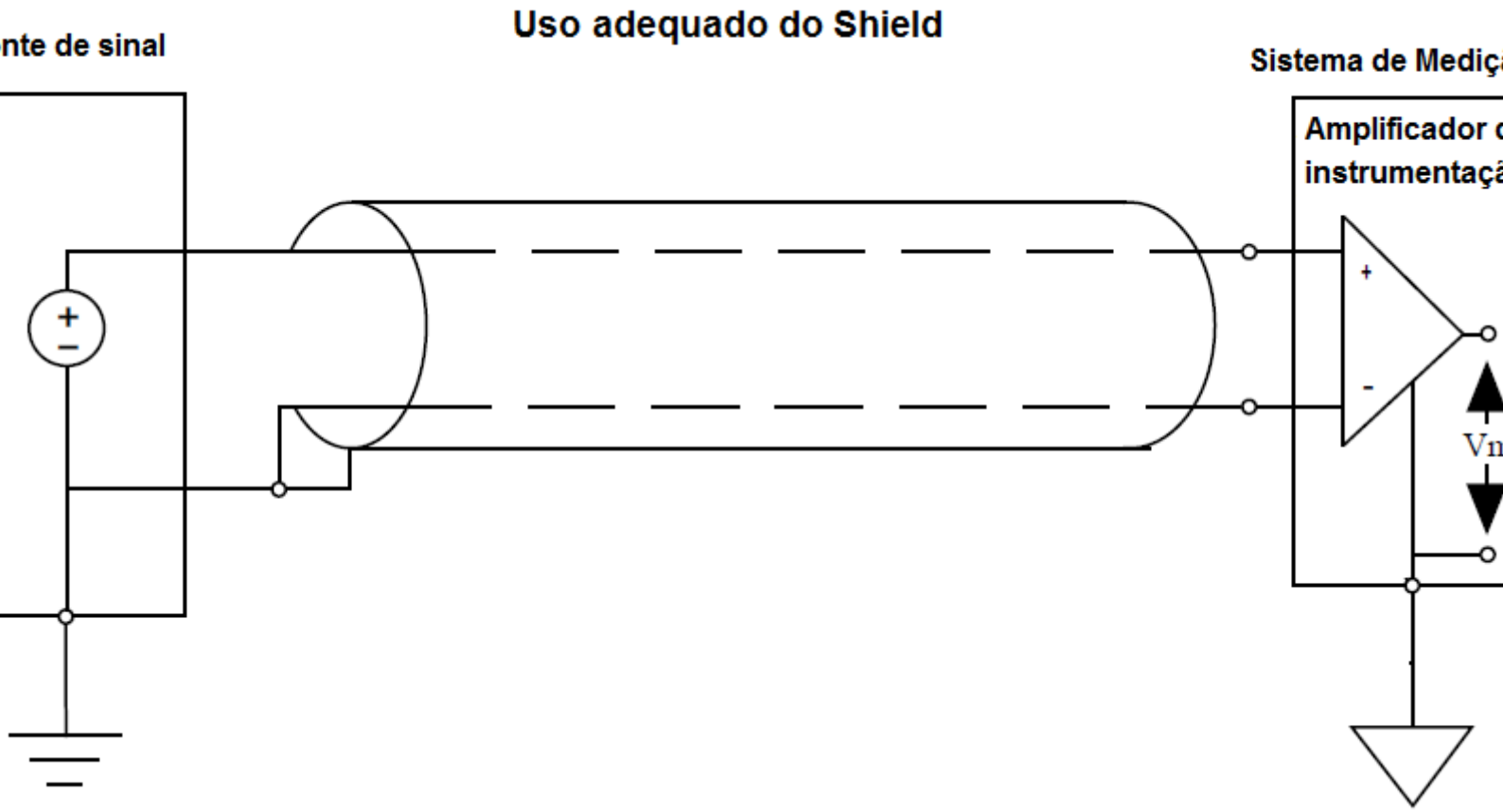


Figura 19 – Uso adequado do shield, aterrado em um único ponto.

Acoplamento Indutivo

O “cabo perturbador” e o “cabo vítima” são acompanhadas por um campo magnético, veja figura 20. O nível de perturbação depende das variações de corrente (di /dt) e da indutância de acoplamento mútuo.

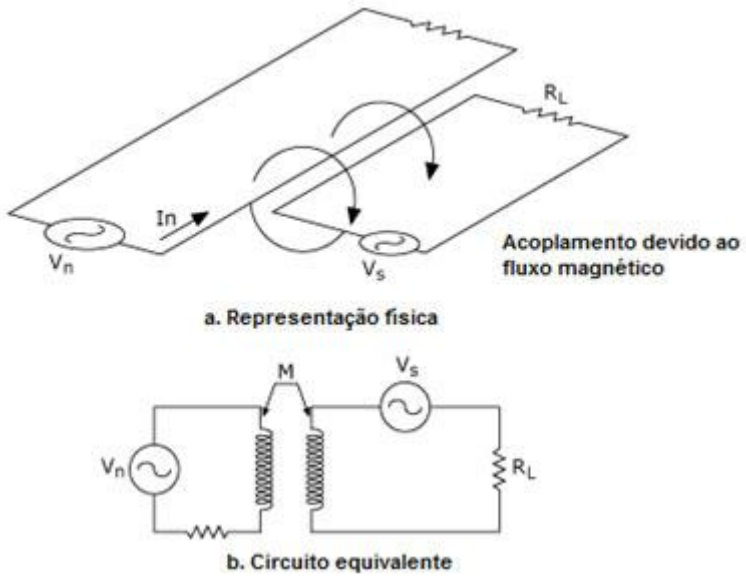


Figura 20 – Acoplamento indutivo – Representação física e circuito equivalente

O acoplamento indutivo aumenta com:

- A frequência: a reatância indutiva é diretamente proporcional à frequência (XL = 2fL)
- A proximidade entre os cabos perturbadores e vítima e o comprimento dos cabos que correm em paralelo
- A altura dos cabos com relação ao plano de referência (em relação ao solo)
- A impedância de carga do cabo ou circuito perturbador.

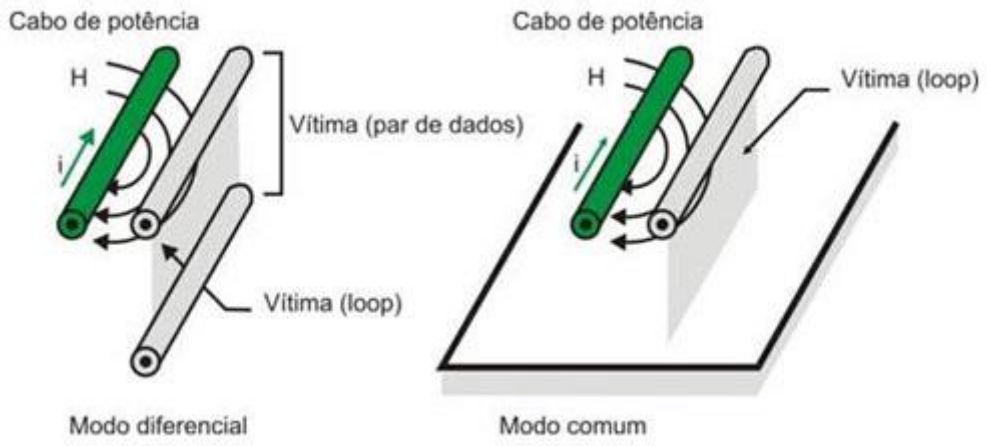


Figura 21 – Acoplamento indutivo entre condutores

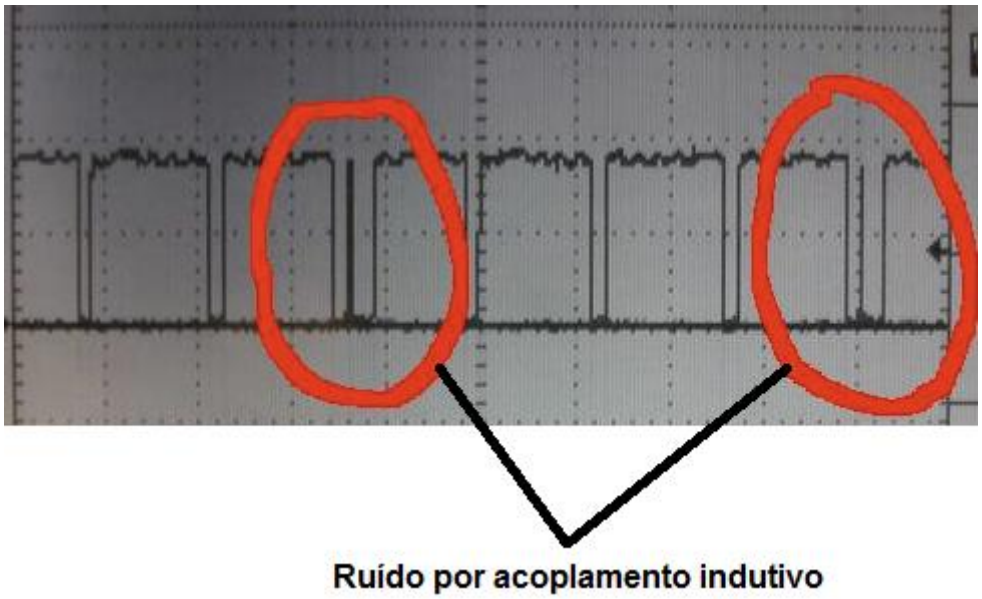


Figura 22a – Exemplo de ruído por Acoplamento indutivo

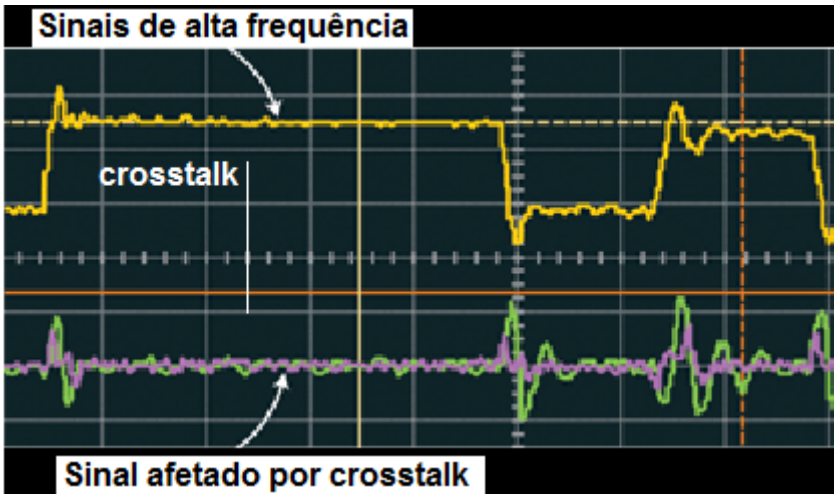


Figura 22b – Exemplo de ruído por crosstalk

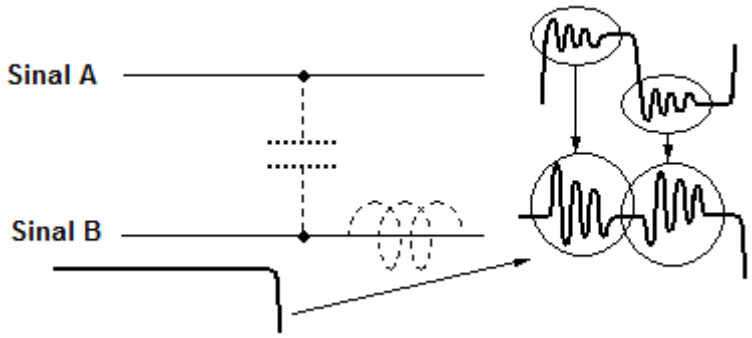


Figura 22c – Exemplo de ruído por crosstalk, onde a influência é maior com efeito capacitivo e indutivo

Medidas para reduzir o efeito do acoplamento indutivo entre cabos

1. Limite o comprimento de cabos correndo em paralelo
2. Aumente a distância entre o cabo perturbador e o cabo vítima
3. Aterre uma das extremidades dos shields dos dois cabos
4. Reduza o dv/dt do perturbador aumentando o tempo de subida do sinal, sempre que possível (Resistores conectados em série ou resistores PTC no cabo perturbador, anéis de ferrite nos perturbadores e / ou cabo vítima)

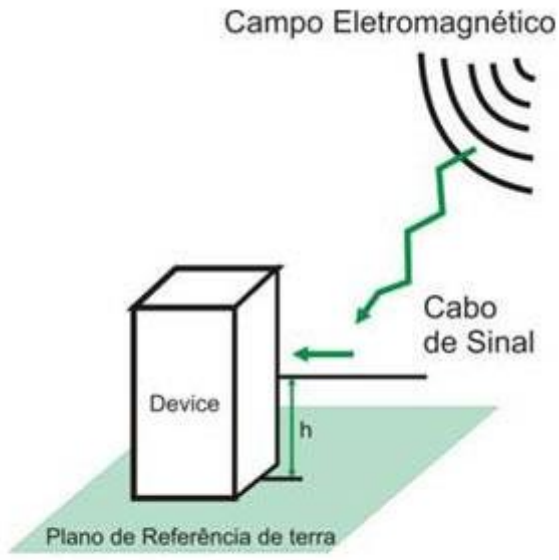


Figura 23– Acoplamento indutivo entre cabo e campo

Medidas para reduzir o efeito do acoplamento indutivo entre cabo e campo

1. Limite a altura h do cabo ao plano de terra
2. Sempre que possível coloque o cabo junto à superfície metálica
3. Use cabos trançados
4. Use ferrites e filtros de EMI

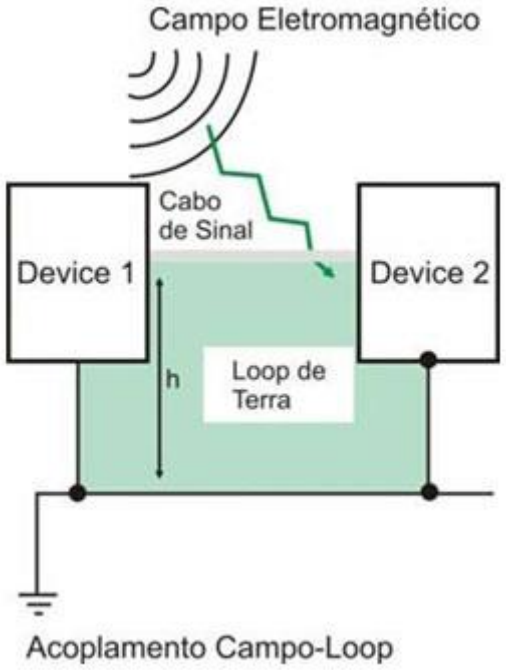


Figura 24 – Acoplamento indutivo entre cabo e loop de terra

Medidas para reduzir o efeito do acoplamento indutivo entre cabo e loop de terra

- Reduza a altura (h) e o comprimento do cabo.
- Sempre que possível coloque o cabo junto à superfície metálica.
- Use cabos trançados.
- Em altas frequências aterre o shield em dois pontos (cuidado!) e em baixas frequências em um ponto só.

	Cabo de Comunicação Digital	*Cabos com e sem shield: 60Vdc ou 5Vac e < 400Vac*	*Cabos com e sem shield: > 400Vac*	*Qualquer cabo sujeito à exposição de raios*
Cabo de comunicação Digital		***10 cm***	***20 cm***	***50 cm***
Cabos com e sem shield: 60Vdc ou 25Vac e< 400Vac	***10 cm***		***10 cm***	***50 cm***
Cabos com e sem shield: > 400Vac	***20 cm***	***10 cm***		***50 cm***
Qualquer cabo sujeito à exposição de raios	***50 cm***	***50 cm***	***50 cm***	

Tabela 2 – Distâncias entre cabos de comunicação digital e outros tipos de cabos para garantir a proteção a EMI

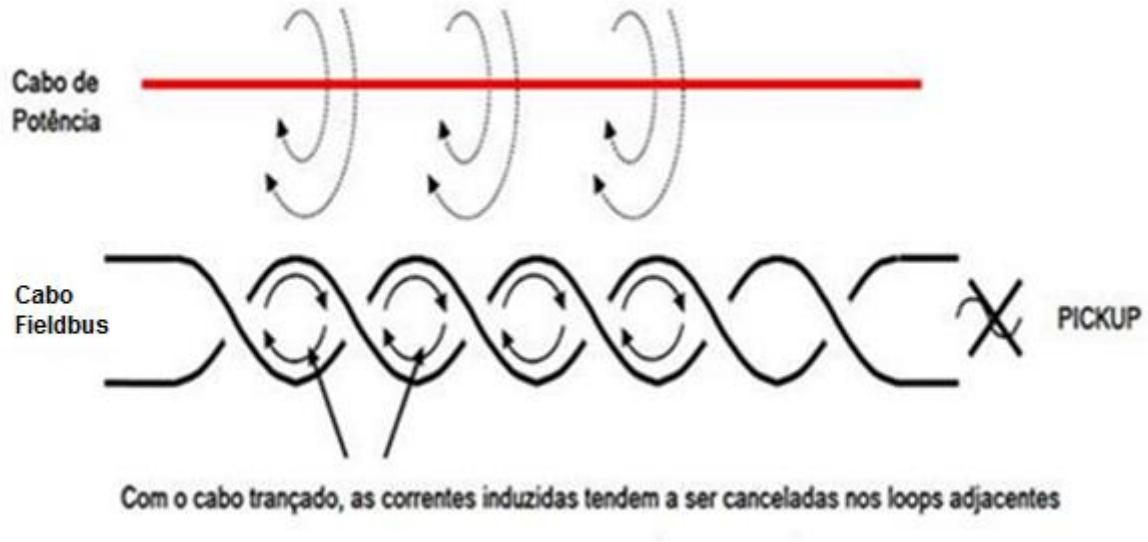


Figura 25a – Interferência entre cabos: campos magnéticos através do acoplamento indutivo entre cabos induzem transientes (pickups eletromagnéticos) de corrente



Figura 25b - Segregação de cabos indevida(cabos Profibus, AS-i, alta potência, etc)

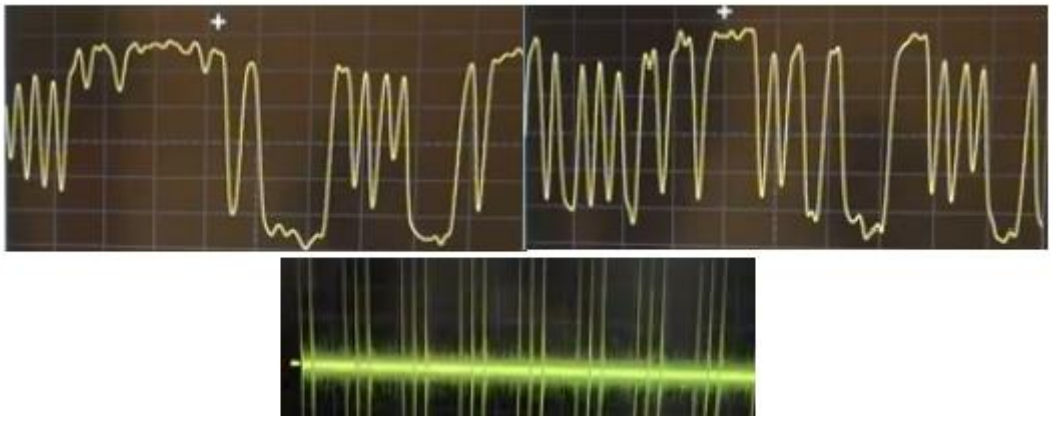


Figura 26c – Sinal degradado por ruído por indução

As Interferências Eletromagnéticas podem ser reduzidas:

1. Cabo trançado
2. Isolação Ótica
3. Pelo uso de canaletas e bandejamentos metálicos aterrados

Para minimizar o efeito de indução deve-se usar o cabo de par trançado que minimiza a área (S) e diminuem o efeito da tensão induzida Vb em função do campo B, balanceando os efeitos (média dos efeitos segundo as distâncias):

$$V_b = \frac{d}{dt}\int_{"loop"} \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

O cabo de par trançado é composto por pares de fios. Os fios de um par são enrolados em espiral a fim de, através do efeito de cancelamento, reduzir o ruído e manter constantes as propriedades elétricas do meio por toda a sua extensão.O efeito de redução com o uso da trança tem sua eficiência em função do cancelamento do fluxo, chamada de Rt (em dB):

Rt = -20 log{(1/(2nl +1))*[1+2nlsen(/n)]} dB ,

onde n é o número de voltas/m e l é o comprimento total do cabo. Veja figuras 25 a 31.

O efeito de cancelamento reduz a diafonia (crosstalk) entre os pares de fios e diminui o nível de interferência eletromagnética/radiofrequência. O número de tranças nos fios pode ser variado a fim de reduzir o acoplamento elétrico. Com sua construção proporciona um acoplamento capacitivo entre os condutores do par.Tem um comportamento mais eficaz em baixas frequências (< 1MHz).Quando não é blindado, tem a desvantagem com o ruído em modo-comum. Para baixas frequências, isto é quando o comprimento do cabo é menor que 1/20 do comprimento de onda da frequência do ruído, a blindagem (malha ou shield) apresentará o mesmo potencial em toda sua extensão, neste caso recomenda-se conectar a blindagem em um só ponto de terra. Em altas frequências, isto é quando o comprimento do cabo é maior que 1/20 do comprimento de onda da frequência do ruído, a blindagem apresentará alta suscetibilidade ao ruído e neste caso recomenda-se que seja aterrada nas duas extremidades.

No caso indutivo **Vruído = 2BAcos** onde B é o campo e é o ângulo em que o fluxo corta o vetor área(A) ou ainda em função da indutância mútua M:

Vruído = 2fMI onde I é a corrente no cabo de potência.

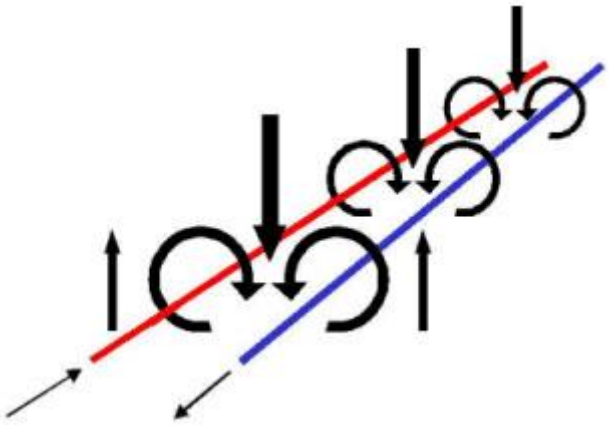




Figura 26 – Efeito de acoplamento indutivo em cabos paralelos

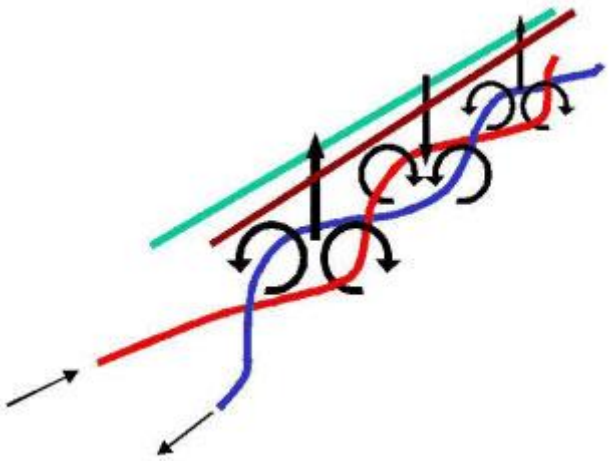


Figura 27 – Minimização do efeito de acoplamento indutivo em cabos torcidos

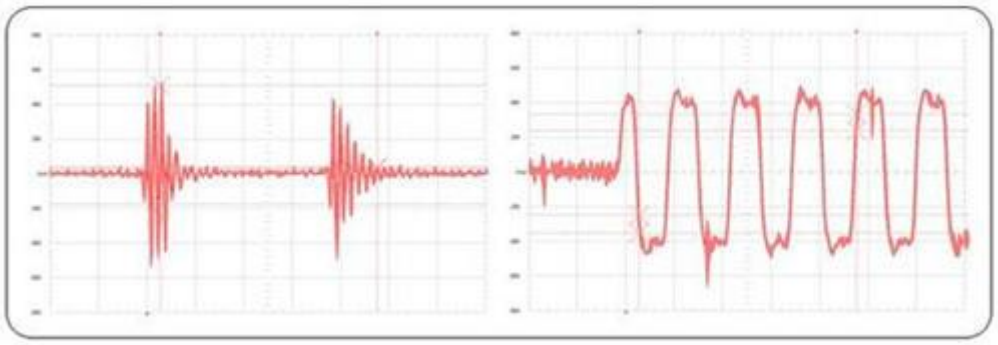


Figura 28 – Exemplo de ruído por indução

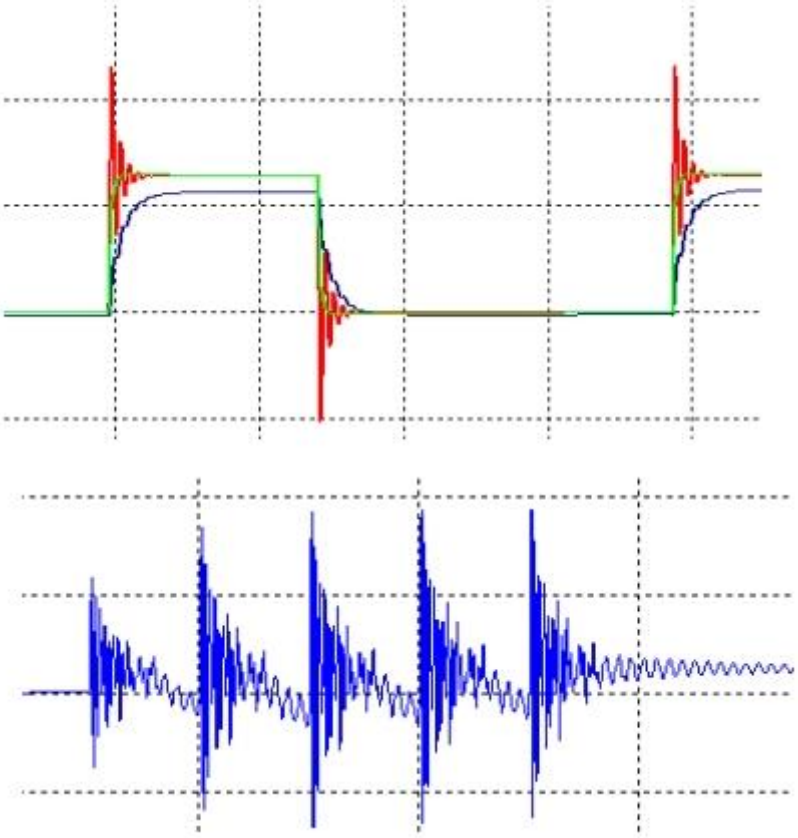


Figura 29 – Exemplo de ruído por indução

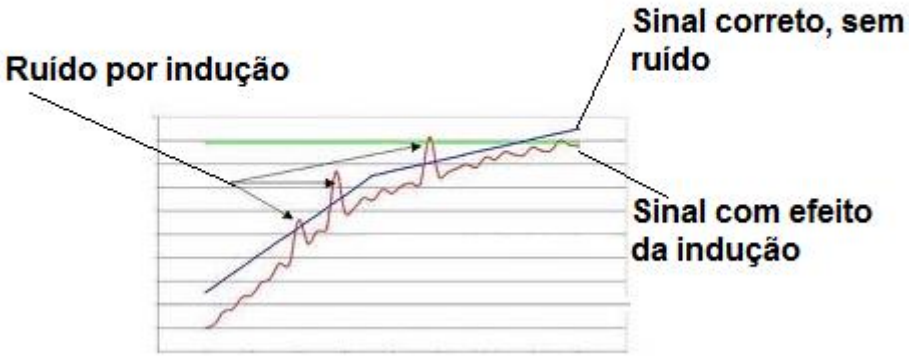


Figura 30 – Exemplo de ruído por indução



Figura 31– Exemplo de Cabos Profibus próximos a cabo de potência

O uso de cabo de par trançados é muito eficiente desde que a indução em cada área de torção seja aproximadamente igual a indução adjacente. Seu uso é eficiente em modo diferencial, circuitos balanceados e tem baixa eficiência em baixas frequências em circuitos desbalanceados. Em circuitos de alta frequência com multipontos aterrados, a eficiência é alta uma vez que a corrente de retorno tende a fluir pelo retorno adjacente. Contudo, em altas frequências em modo comum o cabo tem pouca eficiência.

Acoplamento Capacitivo e Indutivo - Capacitância e Indutância mútuas em função da distância entre condutores perturbador e vítima

Ambos acoplamentos são afetados diretamente pela distância ente os condutores fontes de ruído e vítima. A figura a seguir mostra como são afetados em função da distância entre os condutores.

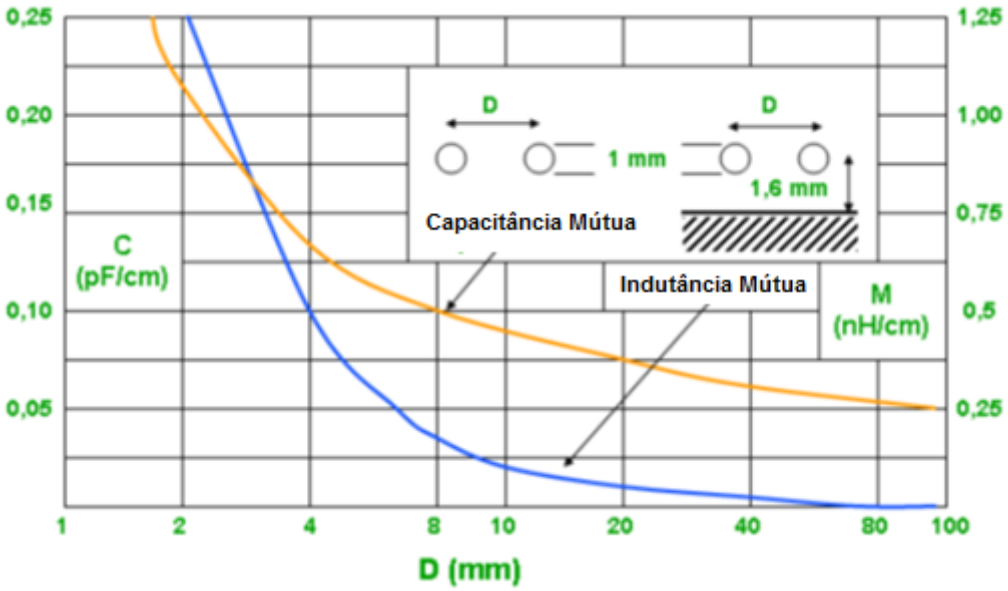


Figura 32 – Capacitância e Indutância mútuas em função da distância entre condutores perturbador e vítima

Modos de acoplamentos

Alguns pontos merecem a atenção para entendermos os efeitos da EMI. Temos os conceitos de acoplamentos em modo diferencial, modo comum, modo irradiado via antena.Eles se aplicam ao acoplamento de emissões e de interferência.

- Modo diferencial

Na maioria dos casos, o sinal desejado é produzido em modo diferencial. Vejamos a figura abaixo, onde temos dois equipamentos inteligados por um cabo. Um campo radiado pode se acoplar a este sistema e induzir quaisquer interferências em modo diferencial entre os dois fios do cabo. Da mesma forma, a corrente diferencial irá induzir um campo radiado próprio. O plano de terra não desempenha nenhum papel neste acoplamento.

- Modo comum

O cabo de modo comum também transporta correntes em modo comum e na mesma direção. Estas correntes muitas vezes não têm nada a ver com as correntes do sinal. Eles podem ser induzidas por um campo externo entre o loop do cabo, o plano de terra e as diferentes impedâncias.

As capacitâncias parasitas e indutâncias associadas com a fiação e gabinete de cada equipamento são partes integrantes do circuito de acoplamento de modo comum e têm um papel importante na determinação da distribuição da amplitude e espectro das correntes de modo comum. Estas impedâncias estão dispersas e não fazem parte do equipamento em nível de componentes e por isto que é difícil de se controlar seus efeitos.Certamente, existem técnicas para minimizá-las.

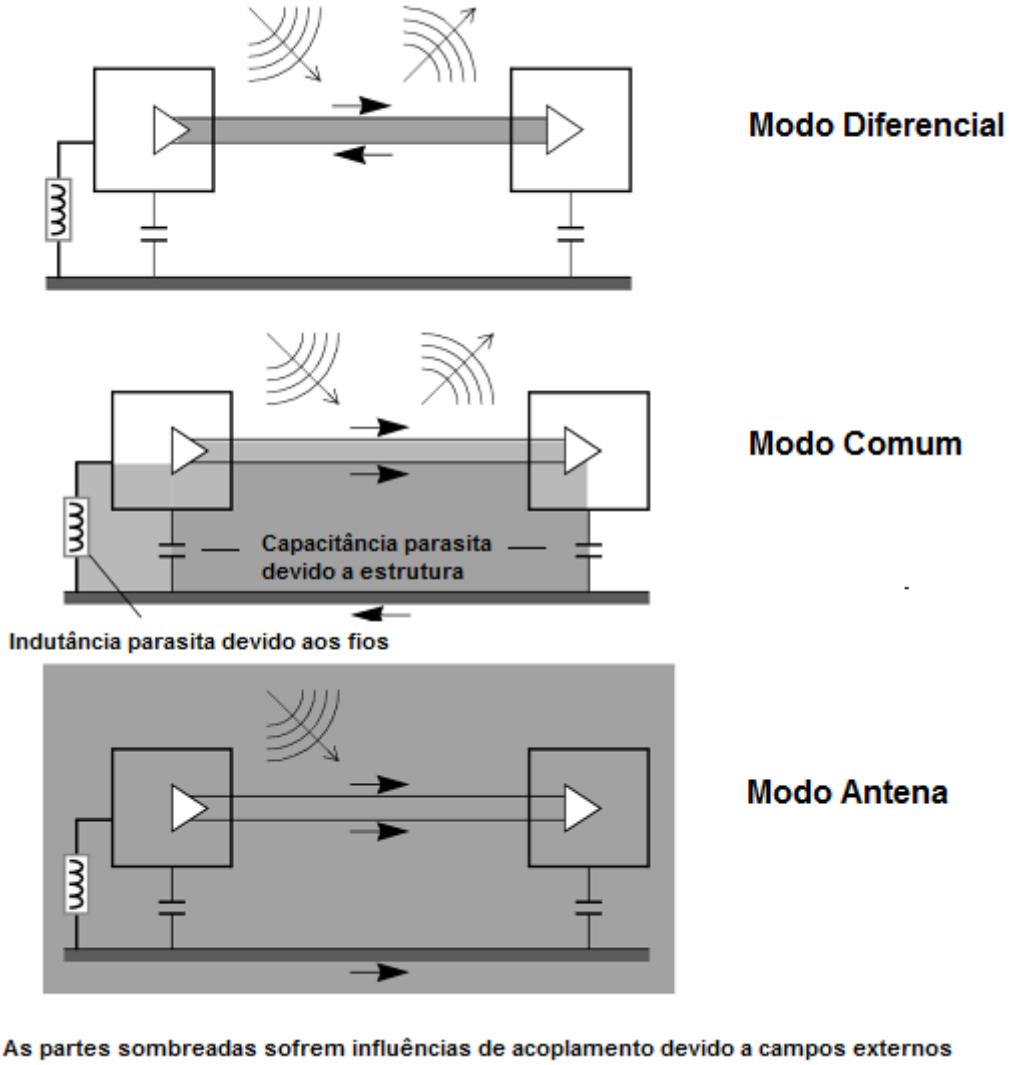


Figura 33 – Modos de acoplamentos radiados

- Modo de antena

Neste modo as correntes são transportadas no mesmo sentido por meio do cabo e do plano de referência de terra. Elas aparecem quando todo o sistema (incluindo o plano de terra) é exposto a um campo externo. Correntes geradas via modo antena tornam-se um grave problema para a susceptibilidade a campo irradiado em sistemas independentes quando elas são convertidas em correntes em outros modos (ou seja, o diferencial ou modo comum), variando impedâncias nos diferentes caminhos.

Transitórios

Transitórios e picos são outros exemplos de EMI geradas continuamente. Podem ser causados por descarga eletrostática (ES) ou por chaveamentos de potência. A figura a seguir mostra a curva típica de um transiente.

Transientes rápidos podem ser acoplados (geralmente capacitivamente) em cabos de sinais em modo comum, especialmente se o cabo estiver póximo ou é encaminhado ao lado de uma fonte de interferência impulsiva.

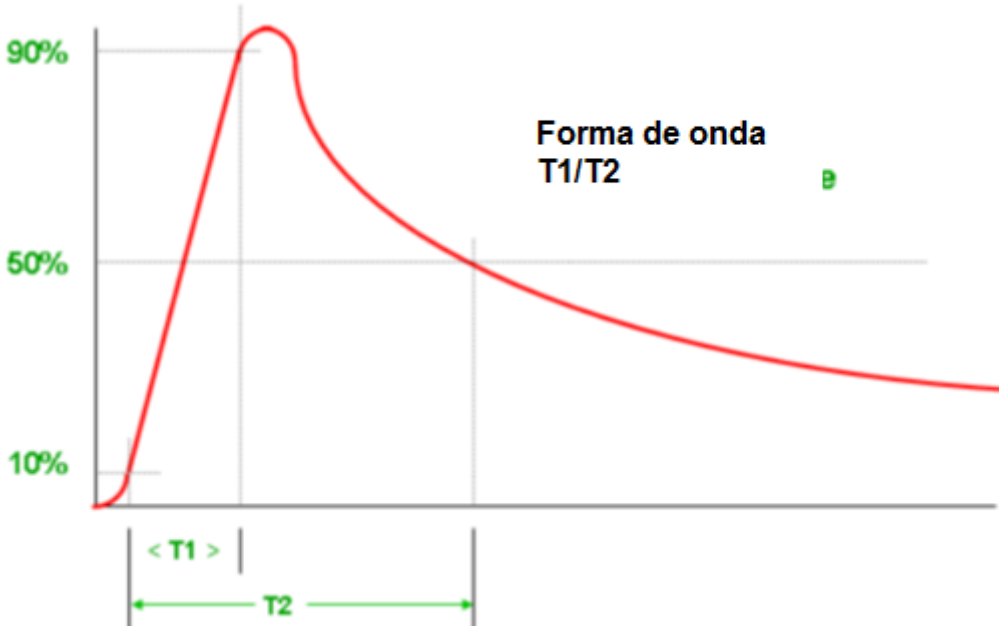


Figura 34a – Forma de onda de um transiente

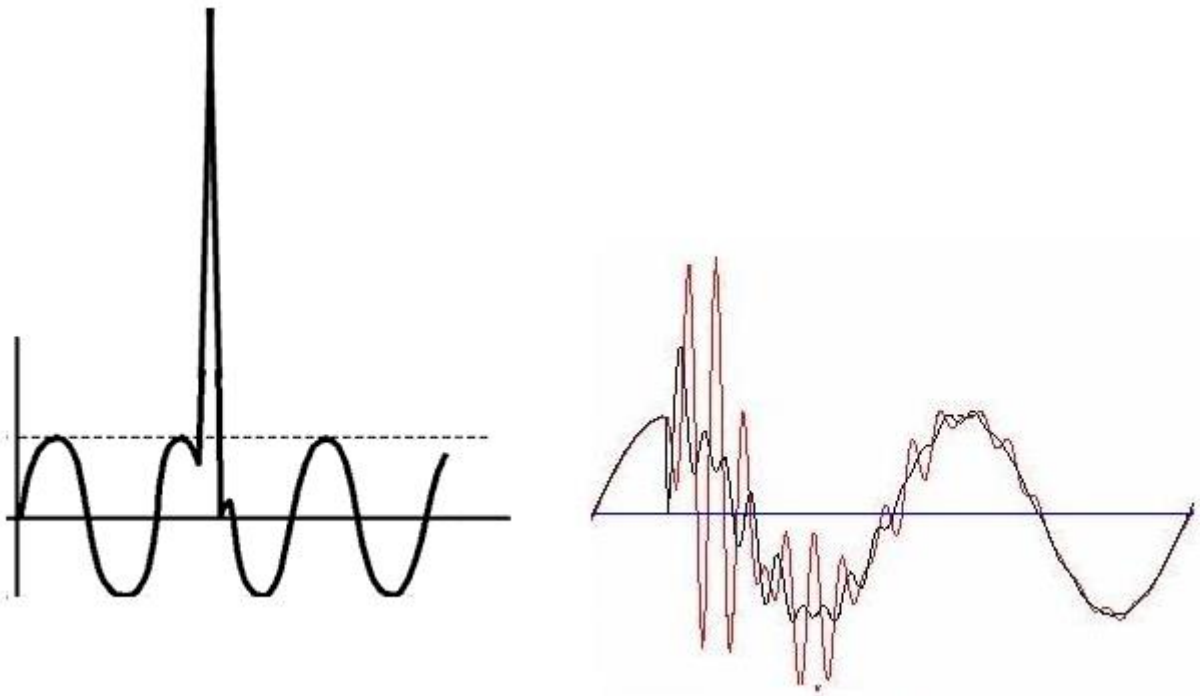


Figura 34b – Transiente na linha AC

A tabela 3 mostra em média o número de transientes por hora em diversos ambientes.

Tipo de Área	Transiente/hora
Industrial	17.5
Comercial	2.8

Residencial	0.6
Laboratório	2.3

Tabela 3 – Transientes/hora x áreas

Variações da tensão de alimentação

A tensão de alimentação pode apresentar uma variedade de distúrbios. A variação de tensão de curta duração pode afetar definitivamente um equipamento. Os equipamentos devem estar projetados para que minimizem os efeitos nas condições de:

- Quedas de tensão de curta duração
- Interrupções (ausência completa de energia por mais de 3 segundos)
- Harmônicas e desequilibrio(diferenças de tensão entre fases)
- Flicker (variações rápidas de tensão)
- Transitórios

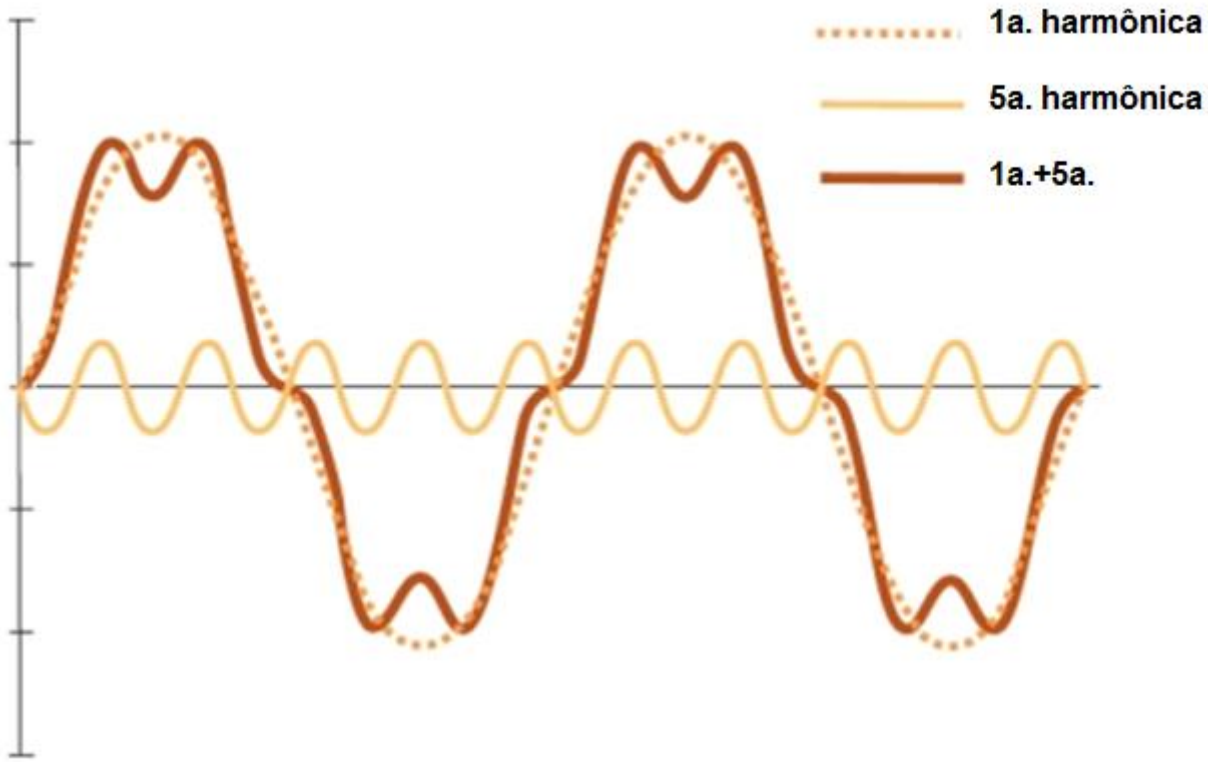


Figura 35 – Exemplo de degradação do sinal por harmônica

Descarga Eletroestática (ESD)

Neste caso, ss caminhos de acoplamento prováveis são:

- Capacitância de isolação

- Conexões e junções de ligações
- Indutância de fiação devido a campos magnéticos gerados na descarga

O uso da blindagem em acoplamento indutivo

A blindagem magnética pode ser aplicada tanto para fonte de ruído ou circuito de sinal para minimizar o acoplamento. Blindar campos magnéticos de baixa frequência não é tão fácil como blindar campos elétricos. A eficácia da blindagem magnética depende do tipo de material e sua permeabilidade, a sua espessura e as frequências envolvidas.

Devido à sua alta permeabilidade relativa, o aço é mais eficiente do que o alumínio e o cobre em baixas frequências (menor do que 100 kHz).

Em frequências mais altas, no entanto, o alumínio e o cobre podem ser usados

A perda de absorção com o uso de cobre e de aço para duas espessuras é mostrado na figura 36.

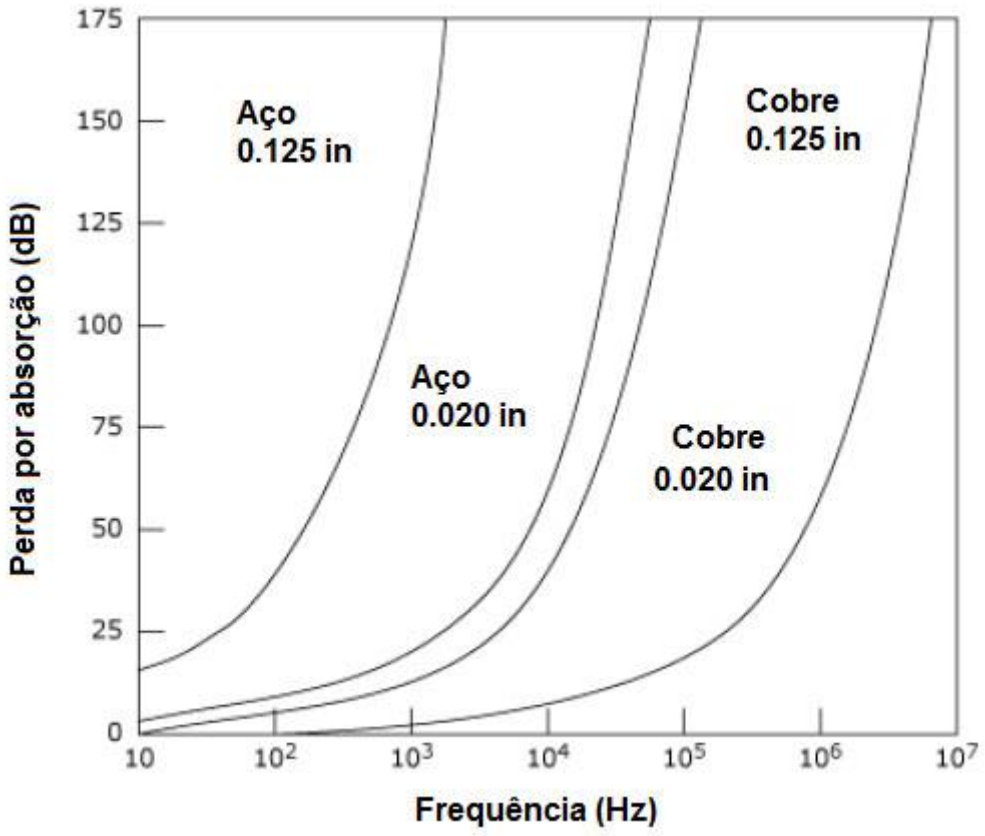


Figura 36 - Perda de absorção com o uso de cobre e de aço

As blindagens magnética destes metais são bastante ineficientes em baixas frequências.

Efeito Skin

Em termos de blindagem, uma característica importante é sua profundidade(d).

Esta é a distância no interior do material em que a densidade da corrente é reduzida para 1/e (0,37 ou 8,7 dB), devido ao efeito pelicular(skin). Para cada distância d na direção interna ao material, a densidade de corrente cai 8,6 dB (aproximadamente 9 dB). Quanto maior for a espessura da parede, maior é a atenuação da corrente através dela. Esta perda de absorção depende do número de d através da parede. A profundidade d é uma expressão da propriedade electromagnética e limita o fluxo de corrente AC na superfície de um condutor, tornando-se menor com o aumento da condutividade, frequência ou permeabilidade.

Profundidade =

$$(\delta) = (\pi.F.\mu.\sigma)^{-0.5}$$

onde, F = frequência, s = condutividade, m = permeabilidade

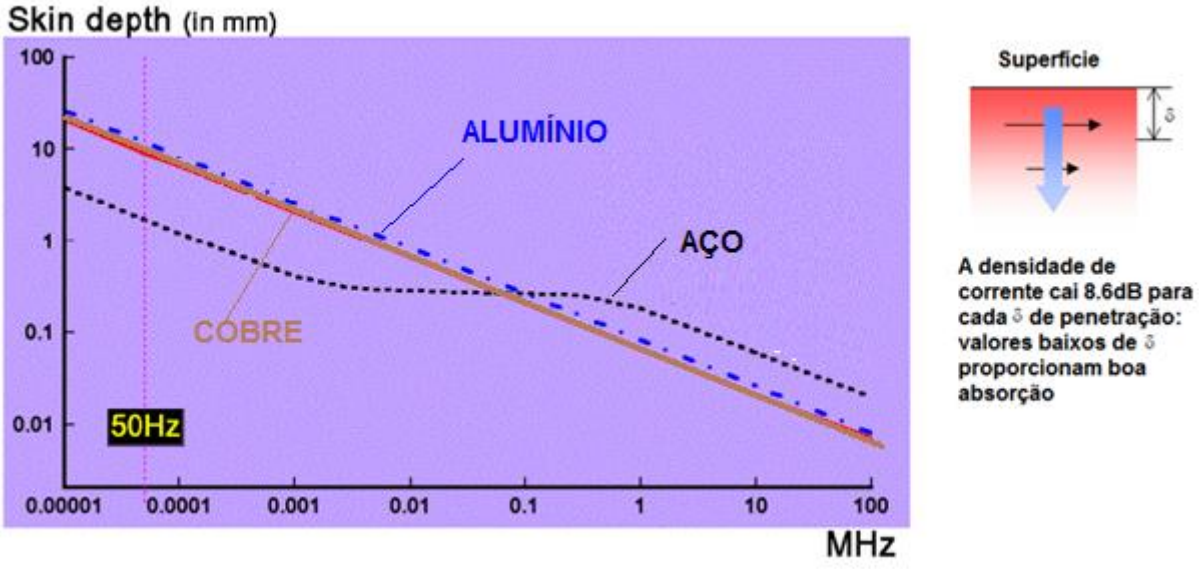


Figura 37 - Profundidade (skin) do cobre, alumínio e aço

A figura anterior mostra a profundidade (skin, d) do cobre, alumínio e aço. Por exemplo, a profundidade em alumínio a 30 MHz é de 0,015 mm. Isto explica porque em condutores finos são eficazes em altas frequências - a corrente flui apenas na superfície e a maior parte do material não afeta as propriedades de blindagem. E ainda, é possível reduzir a densidade de corrente de 18 dB em material com duas vezes a espessura (isto é, com duas profundidades d) e 27 dB com três vezes a espessura (isto é, com três camadas d), e assim por diante. Os requisitos para uma blindagem eficaz são alta condutividade para campos elétricos e alta permeabilidade para campos magnéticos.

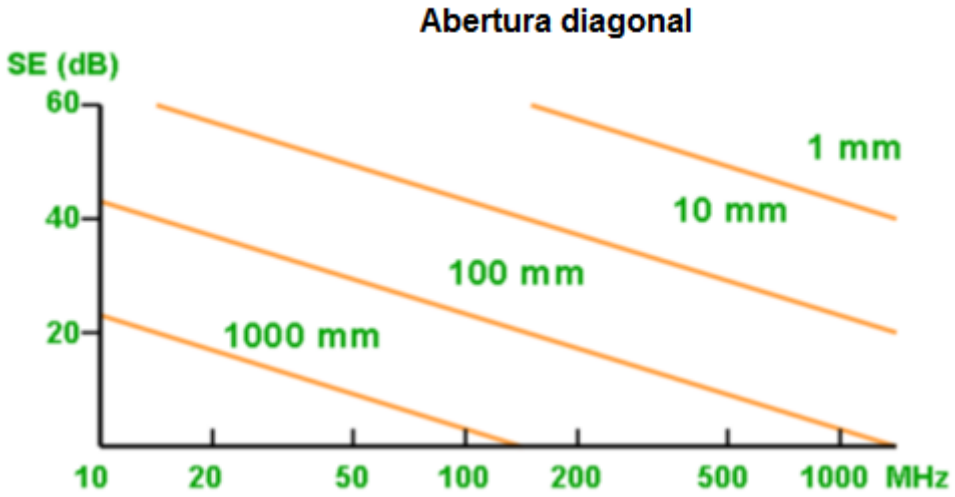
O efeito skin nos leva a concluir que a resistência AC de um determinado condutor aumenta à medida que aumenta o valor da frequência da corrente que percorre esse condutor.

Em regime transiente alguns pontos de interesse podem ser comentados, onde inicialmente a corrente começa a se estabelecer na superfície do condutor e depois, com o passar do tempo, distribui-se para o centro de forma a se ter uma corrente uniforme e isto vai depender, por exemplo, das características elétricas do material condutor, lembrando que ele tem uma resistência alta inicialmente e depois ao atingir a corrente constante, esta resistência diminui.O efeito pelicular evidencia-se mais nas altas frequências, e a distribuição da densidade de corrente se faz exponencialmente , a partir da superficie, função do material e da frequência.

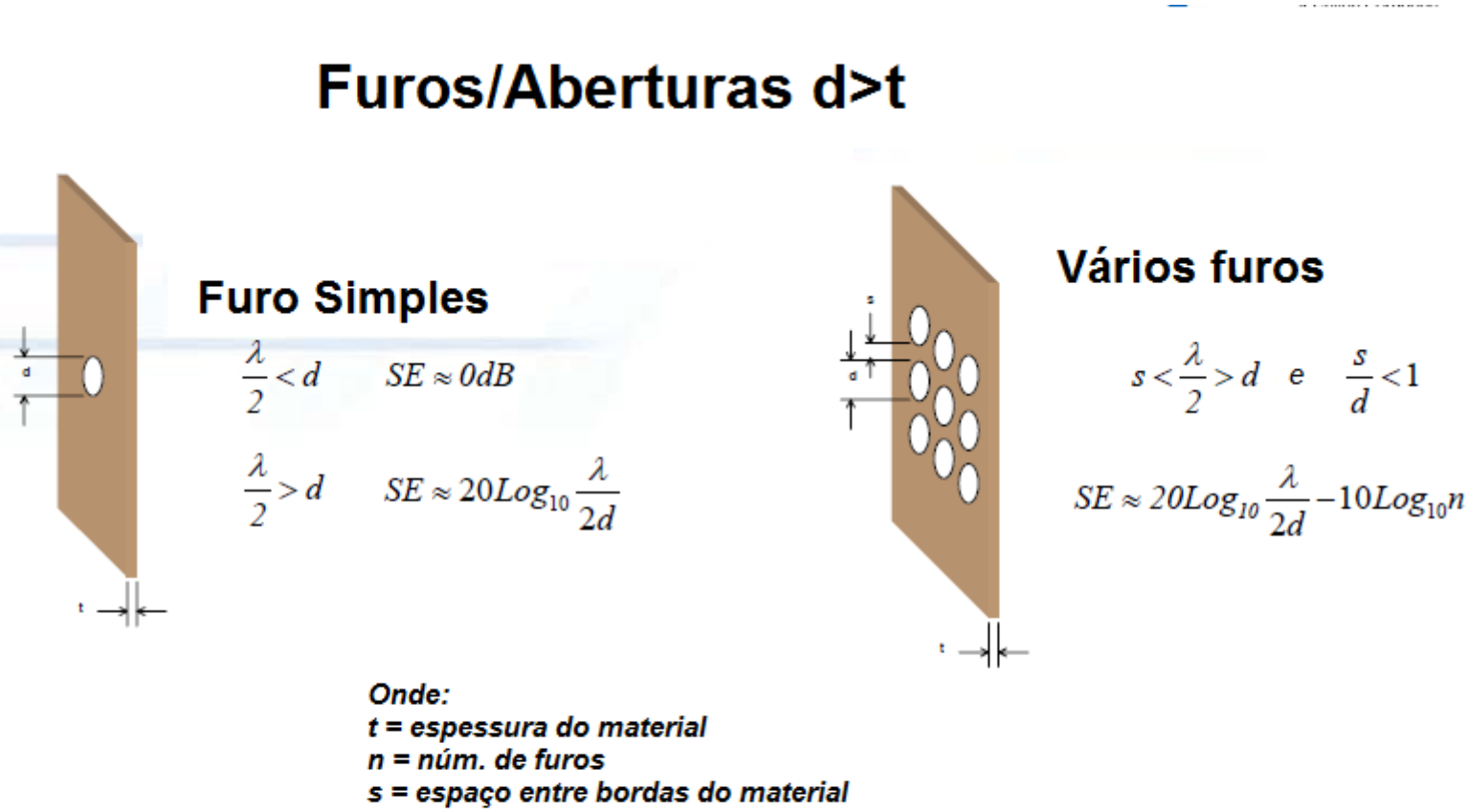
O cobre e alumínio têm 5 vezes a condutividade do aço, por isso são muito bons em para blindar campos elétricos, e têm uma permeabilidade relativa de 1 (o mesmo que o ar). O aço carbono tem uma permeabilidade relativa cerca de 300 em baixas frequências, caindo para 1 com o aumento de frequências acima de 100kHz, e a sua elevada permeabilidade lhe confere uma profundidade(d) reduzida, tornando-o melhor do que alumínio para proteger em baixas frequências. Tipos diferentes de aço inoxidável têm diferentes condutividades e permeabilidades, e consequentemente suas profundidades(d) podem variar consideravelmente.

Um bom material para blindagem terá alta condutividade, alta permeabilidade e espessura suficiente para se atingir o número desejado de profundidades(d) na frequência mais baixa que se prentende blindar. Um milímetro de espessura de aço revestida com zinco leve puro (digamos, 10 mícrons ou mais) tem excelente proteção para várias aplicações.

Aberturas e eficácia da blindagem



a) Eficácia da blndagem x frequência



b) Furos/Aberturas d>t

Figura 38 - A eficácia da blindagem

A figura 38 a mostra como a eficácia de blindagem (SE) deteriora-se com a frequência e a dimensão da abertura. Uma abertura de 100 mm irá deixar passar aproximadamente 20 dB a mais do que uma de 10 mm. Aberturas são necessários para controle de acesso, ventilação e interface, e para visualização. Descontinuidades nas junções entre os elementos condutores também funcionam como aberturas.

SE = 20log(l/2d)), onde l é o comprimento de onda e d é a maior dimensão da abertura

Existe um número de variáveis que devem ser levadas em conta em relação à eficácia da blindagem:

- A forma, tamanho, posição e número de aberturas
- As posições relativas e as distâncias entre a fonte de ruído, as aberturas e a vítima
- A geometria da blindagem
- A frequência e a impedância da fonte de ruído

O material e a forma da blindagem definirão quanto da onda eletromagnética incidente será refletida e absorvida, bem como quanto passará pela blindagem atingindo os fios condutores de sinais.Lembrando ainda que a perda por absorção é definida como a relação entre a espessura da blindagem e seu efeito

pelicular (skin), que representa a profundidade de penetração da onda contida no interior da blindagem. Quanto maior a perda por absorção em dB, melhor será a resposta da blindagem.

Uma eficiência de blindagem, da ordem de 60dB ou superior, oferece um nível de proteção muito bom. Para que se tenha uma blindagem eficiente, é necessário avaliar, também, os fatores listados anteriormente. Uma blindagem totalmente fechada seria a solução ideal, pois teria a mais alta eficiência, mas na prática é muito complicado a construção de blindagens integralmente fechadas.

Uma blindagem é algo muito mais complexo do que apenas um invólucro fechado, obtido com materiais metálicos.

No caso do shield em instalações industriais, principalmente na caixas de junções, é fundamental se manter a continuidade e sempre tornar a área de loop a menor possível nos condutores decapados. A conexão do shield ao ponto de terra deve ser a menor possível, pois, por exemplo, um conexão de 30cm já deixaria a blindagem sem efeito para ruídos da ordem de dezenas de KHz.

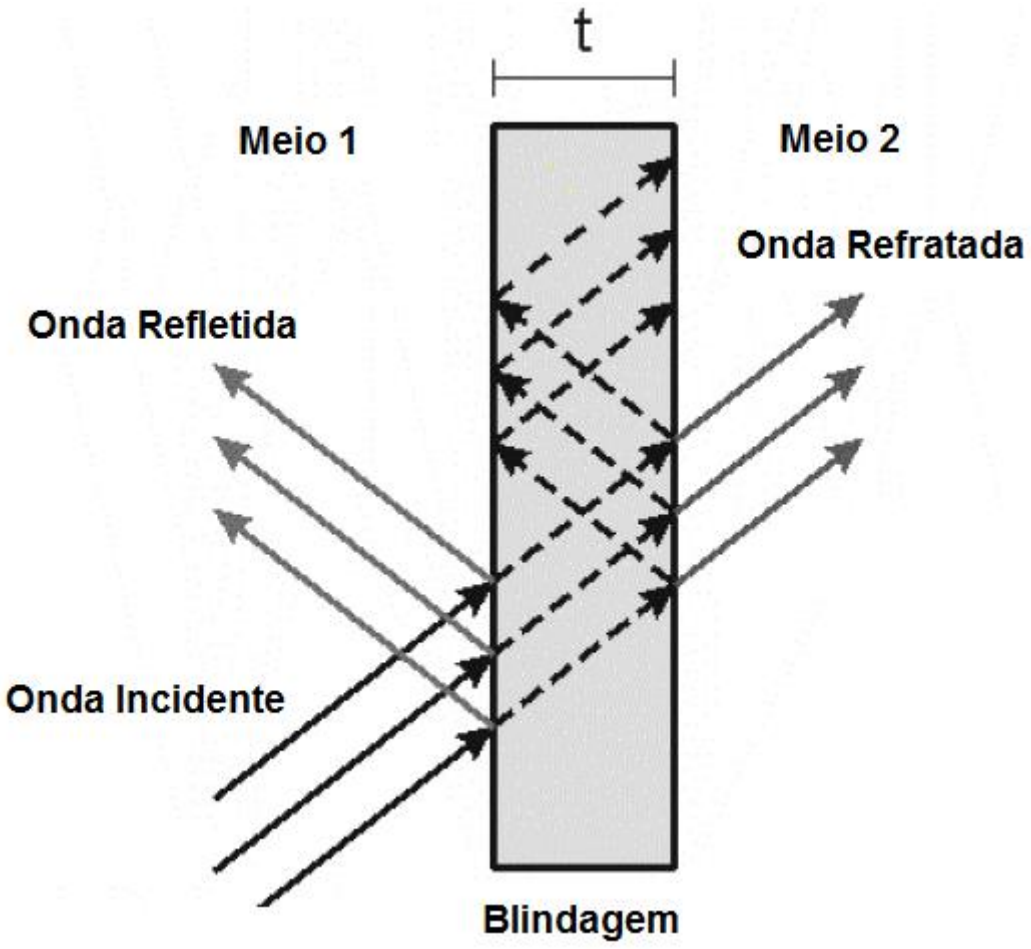


Figura 39 – Comportamento de uma onda incidente na blindagem

A SE é normalmente limitado por:

- Aberturas e juntas

- Tampas removíveis
- Furos para controle / display
- Furos para ventilação
- Furos para conectores

Mitigação de aberturas e juntas:

- Minimize o tamanho e número de aberturas e juntas
- Use juntas e vedações para selar metal-metal-interface
- Interfaces livres de pintura e detritos
- Adequada área de superfície de acoplamento
- Evite a corrosão galvânica

Proteção com o uso de canaletas metálicas

Veremos a seguir o uso de canaletas metálicas na minimização de correntes de Foucault**.**

O espaçamento entre as canaletas facilita a perturbação gerada pelo campo magnético. Além disso, esta descontinuidade pode facilitar a diferença de potencial entre cada segmento da canaleta e no caso de um surto de corrente, gerado, por exemplo, por uma descarga atmosférica ou um curto, a falta de continuidade não permitirá que a corrente circule pela canaleta de alumínio, conseqüentemente não protegerá o cabo Profibus.

O ideal é que se una cada segmento com a maior área de contato possível o que terá uma maior proteção à indução eletromagnética e ainda que se tenha entre cada segmento um condutor de cada lado da canaleta, com comprimento o menor possível, para garantir um caminho alternativo às correntes caso haja um aumento de resistência nas junções entre os segmentos.

Com a montagem adequada da canaleta de alumínio, o campo, ao penetrar na placa de alumínio da canaleta, produz um fluxo magnético variável em função do tempo [f = a.sen(w.t)], dando origem a uma f.e.m. induzida [E = - df/dt = a.w.cos(w.t)].

Em frequências altas, a f.e.m. induzida na placa de alumínio será maior, dando origem a um campo magnético maior, anulando quase que completamente o campo magnético gerado pelo cabo de potência. Esse efeito de cancelamento é menor em baixas frequências. Em altas frequências o cancelamento é mais eficiente.

Esse é o efeito das placas e telas metálicas frente à incidência de ondas eletromagnéticas; elas geram seus próprios campos que minimizam ou mesmo anulam o campo através delas, funcionando assim como verdadeiras blindagens às ondas eletromagnéticas. Funcionam como uma gaiola de Faraday.

Certifique-se que as chapas e os anéis de acoplamento sejam feitos do mesmo material que as canaletas/bandejas de cabos. Proteja os ponto de conexões contra corrosão depois da montagem, por exemplo, com tinta de zinco ou verniz.

Embora os cabos sejam blindados, a blindagem contra campos magnéticos não é tão eficiente quanto é contra campos elétricos.Em baixas frequências, os pares trançados absorvem a maior parte dos efeitos da interferência eletromagnética. Já em altas frequências esses efeitos são absorvidos pela blindagem do cabo. Sempre que possível, conecte as bandejas de cabos ao sistema de linha equipotencial.

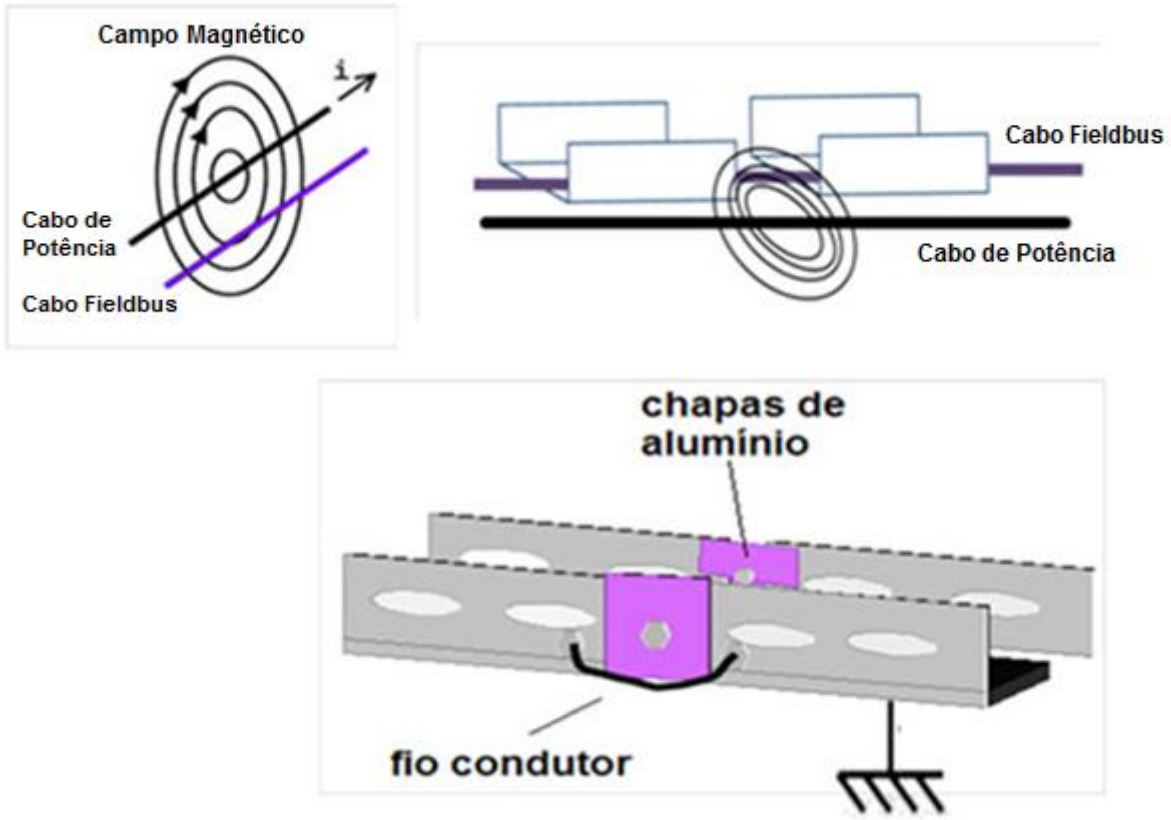


Figura 40 – Proteção de transientes com o uso de canaletas metálicas

Algumas observações quanto à blindagem:

- A blindagem de cabos é usada para eliminar interferências por acoplamento capacitivo devidas a campos elétricos.
- A blindagem só é eficiente quando estabelece um caminho de baixa impedância para o terra.
- Uma blindagem flutuante não protege contra interferências.
- A malha de blindagem deve ser conectada ao potencial de referência (terra) do circuito que está sendo blindado.
- Aterrar a blindagem em mais de um ponto pode ser problemático.
- Minimizar comprimento da ligação blindagem-referência, pois funciona como uma bobina.

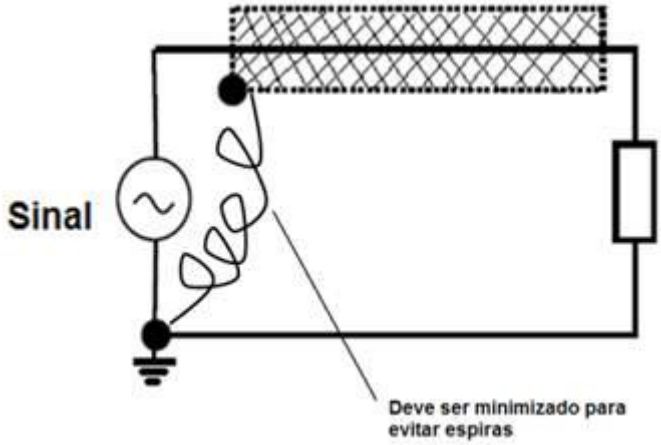


Figura 41a - Deve-se minimizar o comprimento da ligação blindagem-referência pois funciona como uma bobina.

- Campos elétricos são muito mais fáceis de blindar que campos magnéticos e o uso de blindagens em um ou mais pontos funciona contra campos elétricos.
- O uso de metais não magnéticos em volta de condutores não blinda contra campos magnéticos.
- A chave para blindagem magnética é reduzir a área de loop. Utiliza-se um par trançado ou o retorno de corrente pela blindagem.
- Para prevenir a radiação de um condutor, uma blindagem aterrada em ambos os lados é geralmente utilizada acima da frequência de corte, porém alguns cuidados devem ser tomados.
- Apenas uma quantidade limitada de ruído magnético pode ser blindada devido ao loop de terra formado.
- Qualquer blindagem na qual flui corrente de ruído não deve ser parte do caminho para o sinal.
- Utilize um cabo trançado blindado ou um cabo triaxial em baixas frequências.
- A efetividade da blindagem do cabo trançado aumenta com o número de voltas por cm.

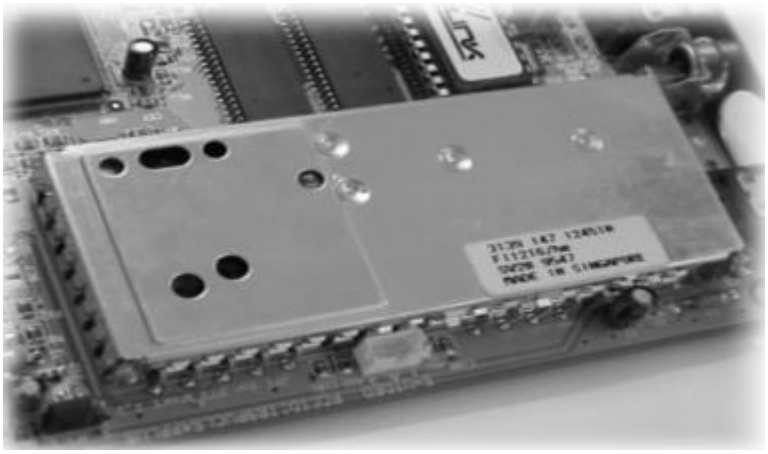


Figura 41b – Exemplo de blindagem em PCB

Acoplamento por impedância comum ou condutivo

É o acoplamento por transferência de energia elétrica tendo-se contato físico através de um meio condutor, em contraste com acoplamento indutivo e capacitivo. Pode ser via um fio, resistor, ou um terminal comum, linha de transmissão, contato com a carcaça, aterramento, etc.

O acoplamento condutivo vai além do espectro de frequências e inclui o DC. A interferência acontece entre

as linhas de sinal e o terra. O ruído é provocado pela resistência existente e comum ao sinal e ao retorno.

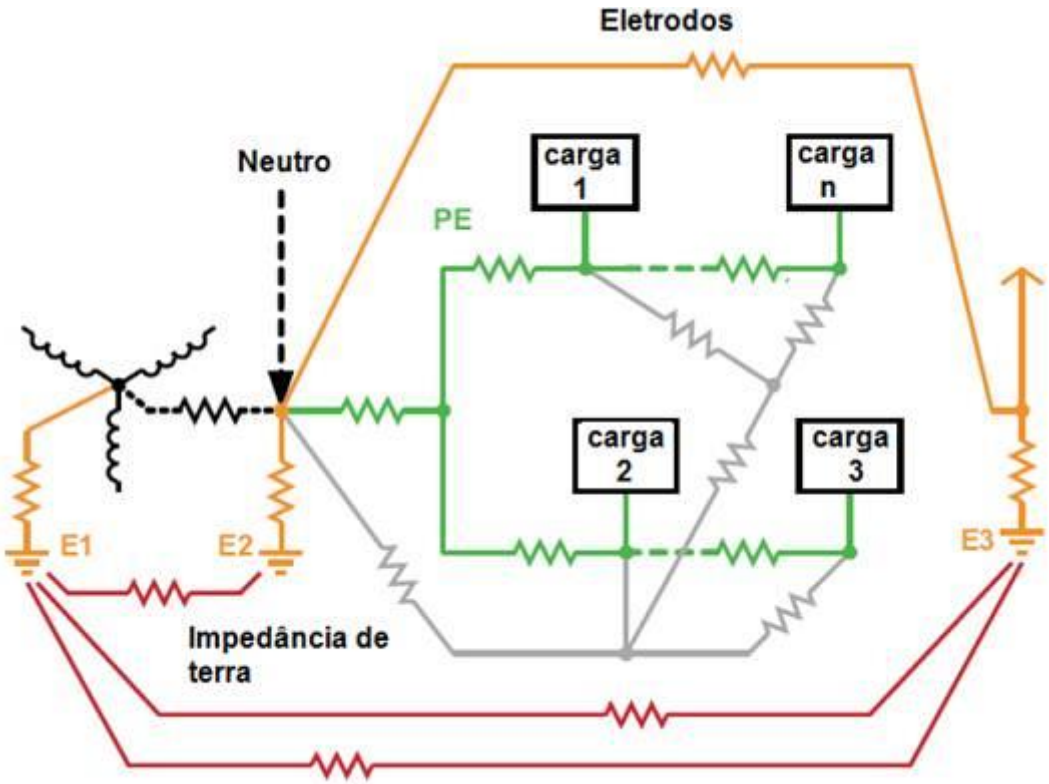


Figura 42 - Aterramento e impedância comum

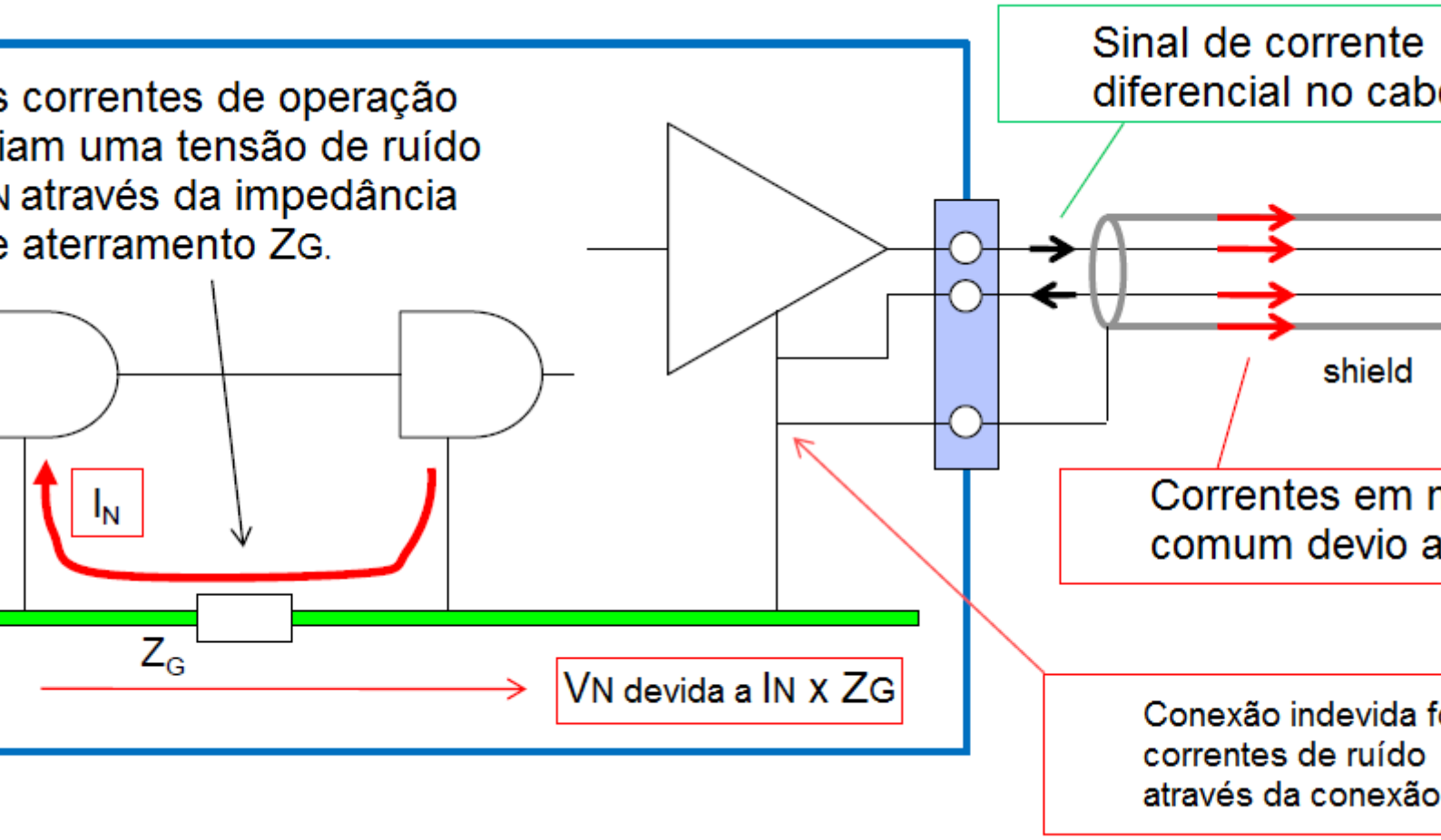
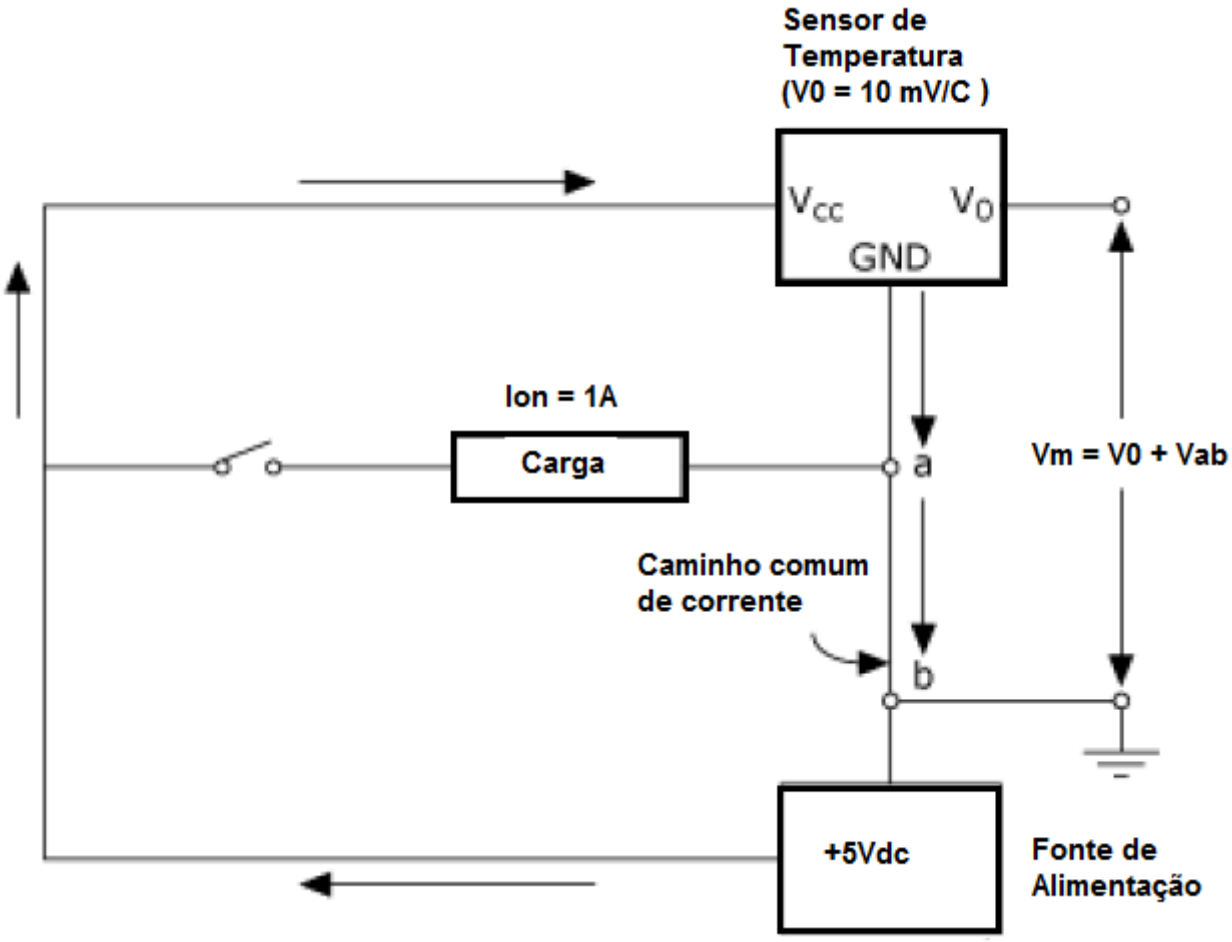


Figura 43 - Aterramento e impedância comum


Sensor de
Temperatura
(V0 = 10 mV/C)
Vcc
Vo
GND
Ion = 1A
Carga
a
Vm = V0 + Vab
Caminho comum
de corrente
b
+5Vdc
Fonte de
Alimentação

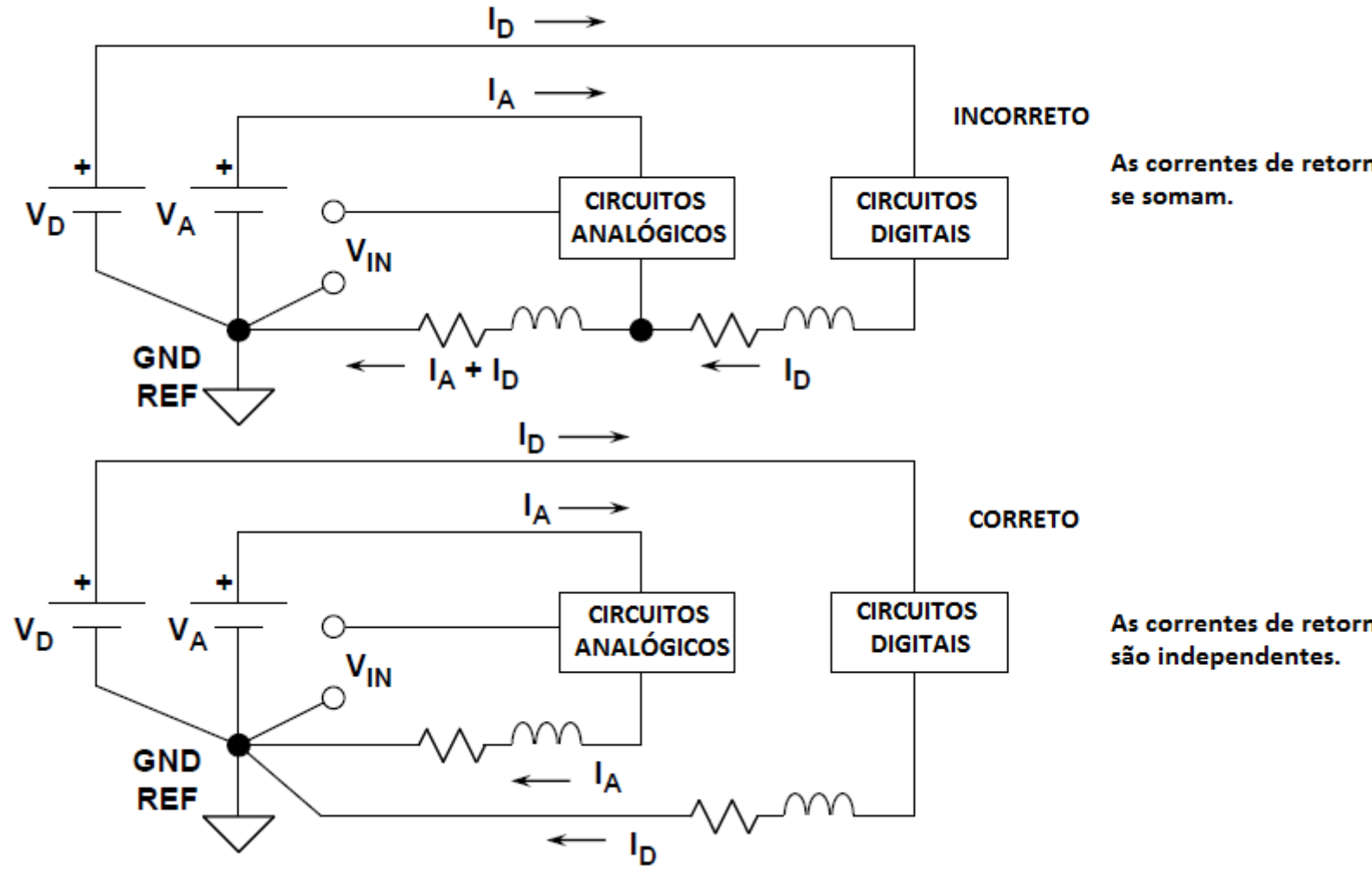


Figura 44 - Aterramento em série resultando em acoplamento condutivo

A ligação à terra em série é muito comum porque é simples e econômica. No entanto, este é o aterramento que proporciona um terra sujo, devido à impedância comum entre os circuitos. Quando vários circuitos compartilham um fio terra, as correntes de um circuito (que flui através da impedância finita da linha de base comum) pode provocar variações na potencial de terra dos demais circuitos. Se as correntes são grandes o suficiente, as variações do potencial de terra podem causar sérias perturbações nas operações de todos os circuitos ligados ao terra comum de sinal.

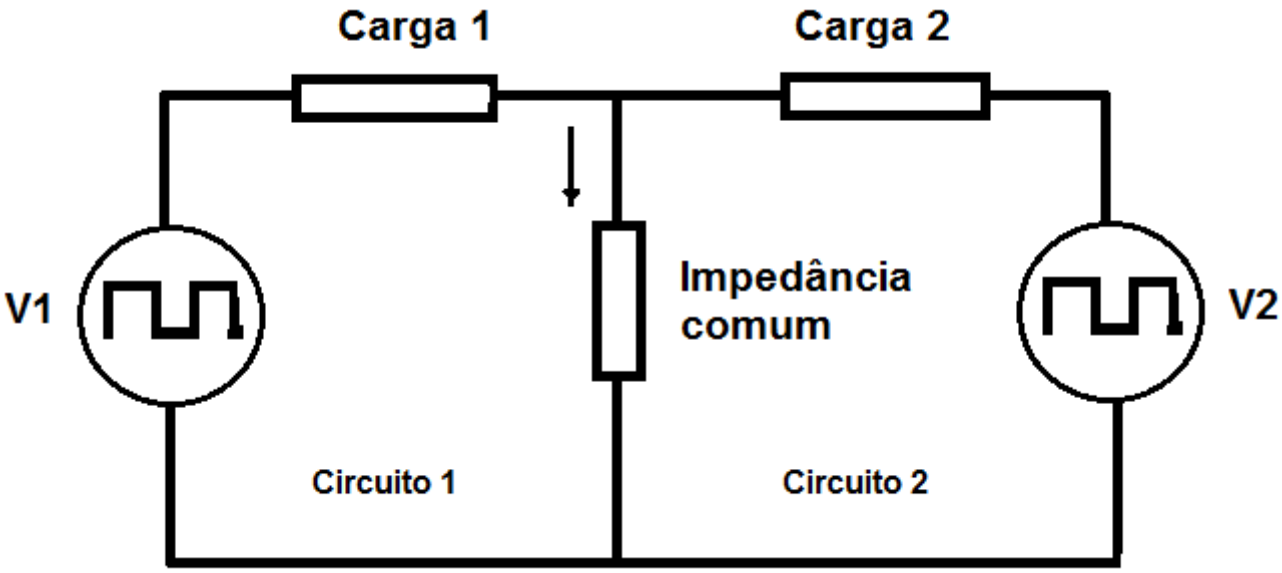


Figura 45 - Impedância comum

Medidas para reduzir o efeito do acoplamento condutivo entre cabos

- Separe as alimentações e os retornos de aterramentos;

Este tipo de ruído acoplado existe porque os condutores têm impedância finita. O efeito pode ser eliminado ou minimizado pela quebra loops de terra (se houver) e proporcionando-se retornos ao terra. Veja a figura 46 a.

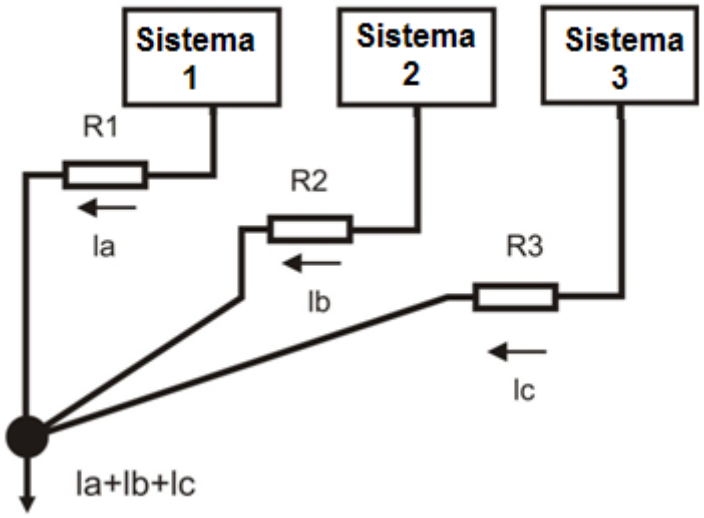


Figura 46a - Aterramento e conexões adequadas, evitando-se o acoplamento condutivo

- Minimize caminhos comuns, especialmente de alta corrente, correntes omutadas e sinais com transientes;

- Em caminhos comuns use sempre que possível a menor resistência (para altas correntes) e a mais baixa indutância (para alta di/dt's);
- Use planos de baixa impedância para fontes DCs e seus retornos. É comum usar um capacitor de bypass entre a fonte, mantendo as frequências altas em seus circuitos.

Cabos e seus efeitos

Qualquer condutor de corrente pode produzir campo eletromagnético quando por ele passar uma corrente elétrica.

O inverso disso também é verdadeiro, por exemplo, qualquer condutor pode converter campos eletromagnéticos em corrente.

Um condutor com um comprimento maior do que /20 vai agir como uma antena. é o comprimento de onda da maior frequência de interesse e é dada por:
 = c/f, onde f = frequência em Hz e c = 3 x 108 m/s, a velocidade da luz.

Cada tipo de cabo tem um comportamento diferente em relação à frequência e, portanto, deve-se sempre selecionar o cabo adequado para o tipo de aplicação em questão.

Vejamos alguns pontos que mostram como os parâmetros de um cabo pode produzir efeitos inesperados:

- Condutor de 1 metro é equivalente a um indutor de 1mH, onde a resistência é maior do que 6 a 1 MHz.
- Resistência de um condutor de 1 mm de diâmetro a 160 MHz é equivalente a 50 vezes a sua resistência DC (0 Hz).
- Condutor de 25 mm de comprimento com um raio de 1 mm é equivalente a um capacitor de 1pF.
- 100 mm condutor de terra é equivalente a um indutor de 100 nH, onde a eficácia do filtro é igual a zero, com uma frequência superior a 5 MHz.

Quando a frequência do sinal é maior do que um quarto do comprimento de onda do sinal ou múltiplos de forma que "casa" com o comprimento do cabo, temos a conhecida linha de transmissão. Qualquer situação que é maior do que um comprimento de onda de L/20 irá agir como uma linha de transmissão (regra L/20). Uma linha de transmissão "descasada" pode entrar em ressonância Isto depende do comprimento da linha e da carga. Uma linha de transmissão pode ser semelhante a curto ou a um circuito aberto para a carga. Também pode parecer um circuito aberto (a partir do lado da fonte), mas fisicamente tem um curto no lado da carga. Se não for uma linha de transmissão com terminação adequada pode se tornar ressonante. Na ressonância, a linha vai emitir ou ser susceptível a interferências externas.

A Figura 46b mostra a distribuição de tensão e corrente em cabos com ressonância.

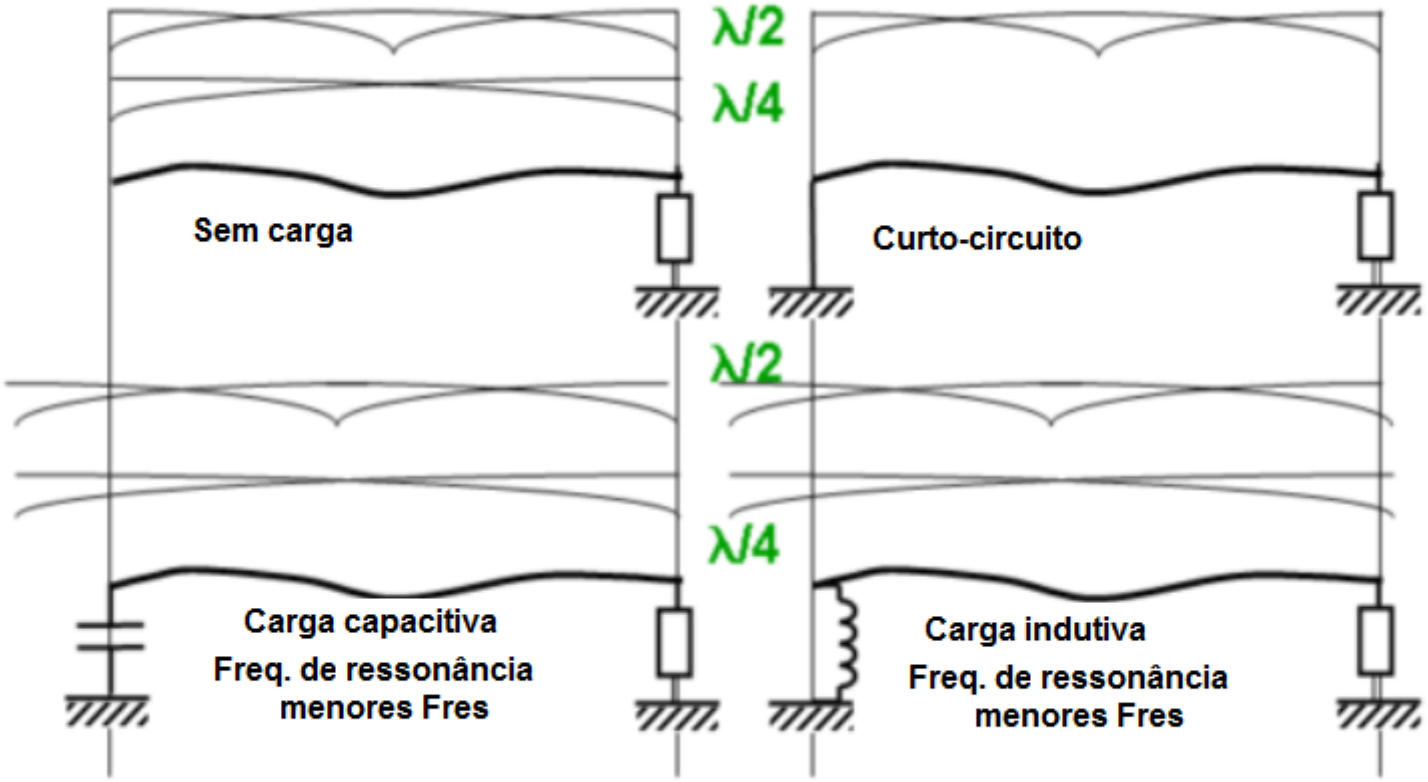


Figura 46b - Distribuição de tensão e corrente em cabos com a ressonância

Os cabos são mais eficazes no acoplamento de energia de RF na extremidade inferior do espectro de VHF (30-100 MHz). O campo externo induz uma corrente em modo comum na blindagem do cabo ou em todos os condutores do cabo se este não for blindado. Os efeitos de modo comum tendem a sofrer influências diretas com a metade do comprimento de onda do sinal de interferência. Um cabo conectado a um equipamento aterrado (vítima) pode ser modelado como um único condutor ao longo de um plano de terra, que aparece como uma linha de transmissão (figura 46 c). A corrente induzida nesta linha de transmissão por um campo externo aumenta com a frequência até que se tenha a primeira ressonância e após apresenta uma série de picos e vales em ressonâncias maiores. O mecanismo de acoplamento aumenta com a frequência de ressonância do cabo, o que depende do seu comprimento e da carga reativa de qualquer equipamento que estiver ligado à sua extremidade. Um comprimento de 2 m de quarto de onda tem ressonância a 37,5 MHz; de meia-onda, ressonância a 75 MHz. A figura 46 c mostra um cabo blindado com uma extremidade à terra e pode ser considerado como uma linha de transmissão.O gráfico mostra o aumento da corrente induzida com a frequência. Veja a influência da frequência versus o comprimento do cabo.

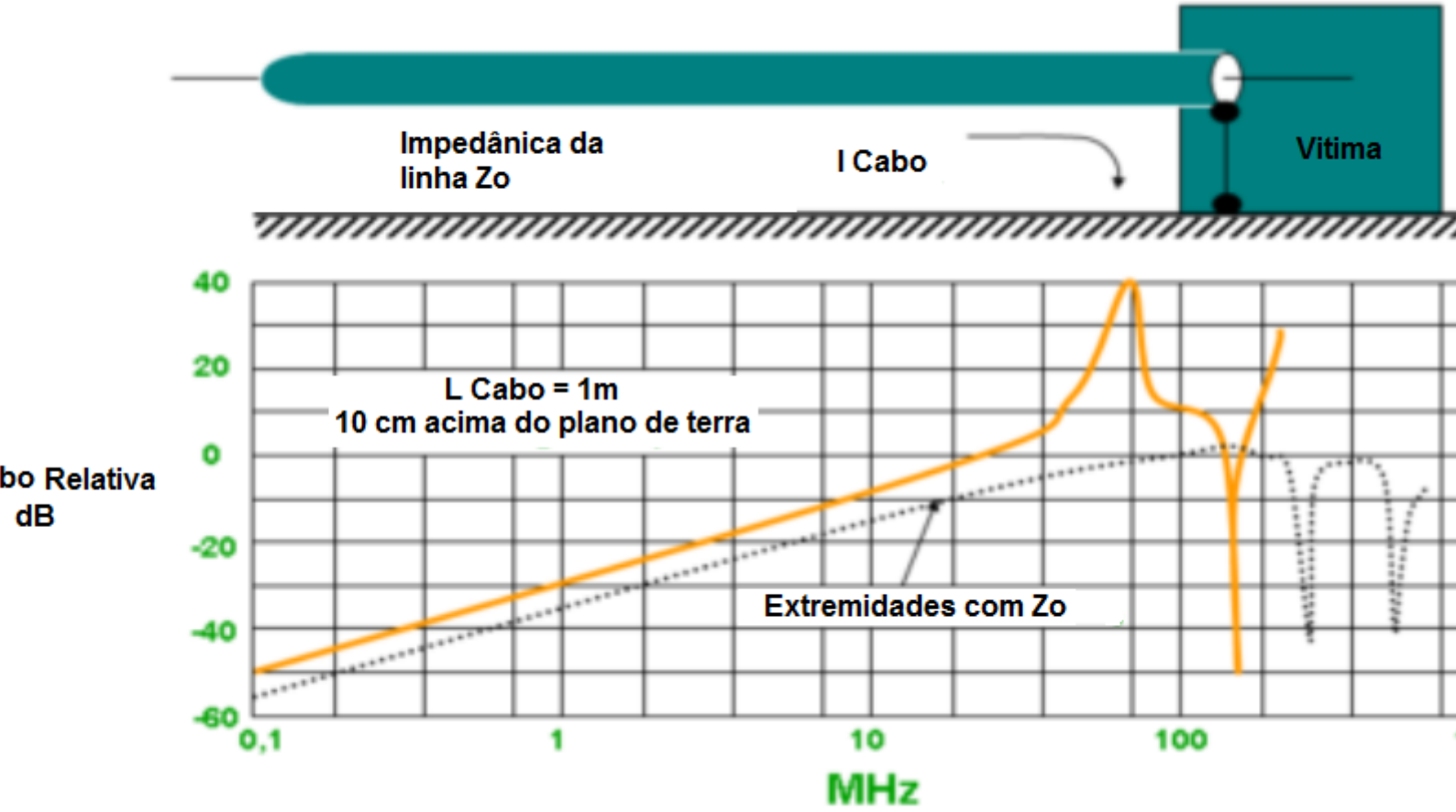


Figura 46c - Mostra a blindagem do cabo com uma extremidade à terra agindo como uma linha de transmissão e mostra o aumento da corrente induzida com frequência.
Acoplamento do cabo ao campo radiado.

Técnicas para redução dos efeitos de EMI conduzida

Quando a EMI se manifesta em termos do caminho de condução pode-se usar artifícios técnicos com o seguinte propósito:

- Reduzir a corrente de EMI, introduzindo elementos de alta impedância em série;
- Conduzir a corrente de EMI ao terra, introduzindo elementos de baixa impedância em paralelo;
- Bloquear a corrente de EMI, abrindo o caminho com elementos com isolação galvânica;
- Neutralizar a corrente de EMI, usando a indução mútua.

Algumas soluções baseadas em isolações galvânicas são efetivas para baixa e média frequências(abaixo de MHz). Soluções baseadas em filtros de alta frequência são efetivas em frequências acima de MHZ.Veja a figura 47.

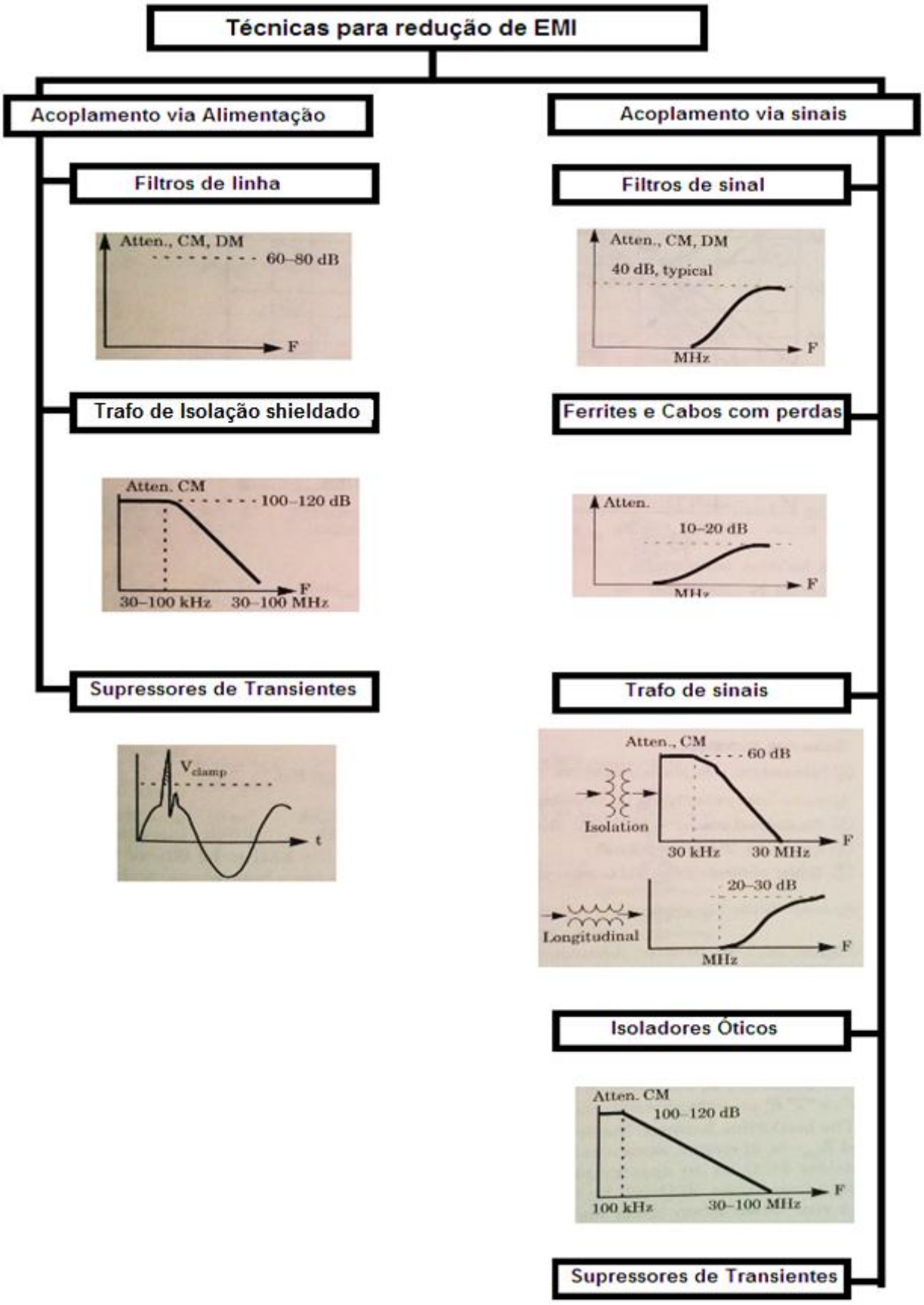


Figura 47 – Técnicas para redução dos efeitos de EMI

Objetivo de projeto e layouts em plantas de automação

Um dos principais objetivos ao se projetar é manter todos os pontos comuns de retornos de sinal no mesmo potencial. Com a alta frequência no caso de inversores (até 300MHz), harmônicas são geradas pelos amplificadores de comutação e nestas frequências, o sistema de terra se parece mais com uma série de

indutores e capacitores do que um caminho de baixa resistência. O uso de malhas e tranças ao invés de fios (fios curtos são melhores para altas frequências) que interligam nos pontos de aterramento têm uma eficiência maior neste caso. Vide figura 51.

Outro importante objetivo é minimizar o acoplamento magnético entre circuitos. Este é geralmente conseguido por separações mínimas e roteamento segregados dos cabos. O acoplamento por rádio-frequência é minimizado com as devidas blindagens e técnicas de aterramento. Os transientes (surges) são minimizados com filtros de linha e supressores de energia apropriado em bobinas e outras cargas indutivas.

O conceito de aterramento

Um dicionário não-técnico define o termo terra como um ponto em contato com a terra, um retorno comum em um circuito elétrico, e um ponto arbitrário de potencial zero de tensão.

Aterrar ou ligar alguma parte de um sistema elétrico ou circuito para a terra garante segurança pessoal e, geralmente, melhora o funcionamento do circuito.

Principios de aterramento:

- Todos os condutores possuem um impedância finita e que aumenta com a frequência;

- Dois pontos de terra separados fisicamente não estão no mesmo potencial a não ser que nenhuma corrente flua entre entre eles;

- Em altas frequências não existe aterramento em ponto único.

Infelizmente, um ambiente seguro e robusto em termos de aterramento, muitas vezes não acontece simultaneamente.

Fio terra

Todo circuito deve dispor de condutor de proteção em toda a sua extensão.

Os sistemas de aterramento devem executar várias funções simultâneas: como proporcionar segurança pessoal e para o equipamento. Resumidamente, segue uma lista de funções básicas dos sistemas de aterramento em:
a) Proporcionar segurança pessoal aos usuários;
b) Proporcionar um caminho de baixa impedância (baixa indutância) de retorno para a terra, proporcionando o desligamento automático pelos dispositivos de proteção de maneira rápida e segura, quando devidamente projetado;
c) Fornecer controle das tensões desenvolvidas no solo quando o curto fase- terra retorna pelo terra para uma fonte próxima ou mesmo distante;
d) Estabilizar a tensão durante transitórios no sistema elétrico provocados por faltas para a terra;
e) Escoar cargas estáticas acumuladas em estruturas, suportes e carcaças dos equipamentos em geral;
f) Fornecer um sistema para que os equipamentos eletrônicos possam operar satisfatoriamente tanto em alta como em baixas frequências;

g) Fornecer uma referência estável de tensão aos sinais e circuitos;
h) Minimizar os efeitos de EMI (Emissão Eletromagnética).

O condutor neutro é normalmente isolado e o sistema de alimentação empregado é o TN-S (T: ponto diretamente aterrado, N: massas ligadas diretamente ao ponto de alimentação aterrado, S: condutores distintos para neutro e proteção).

O condutor neutro exerce a sua função básica de conduzir as correntes de retorno do sistema.

O condutor de proteção exerce a sua função básica de conduzir à terra as correntes de massa. Todas as carcaças devem ser ligadas ao condutor de proteção.

O condutor de equipotencialidade deve exercer a sua função básica de referência de potencial do circuito eletrônico.

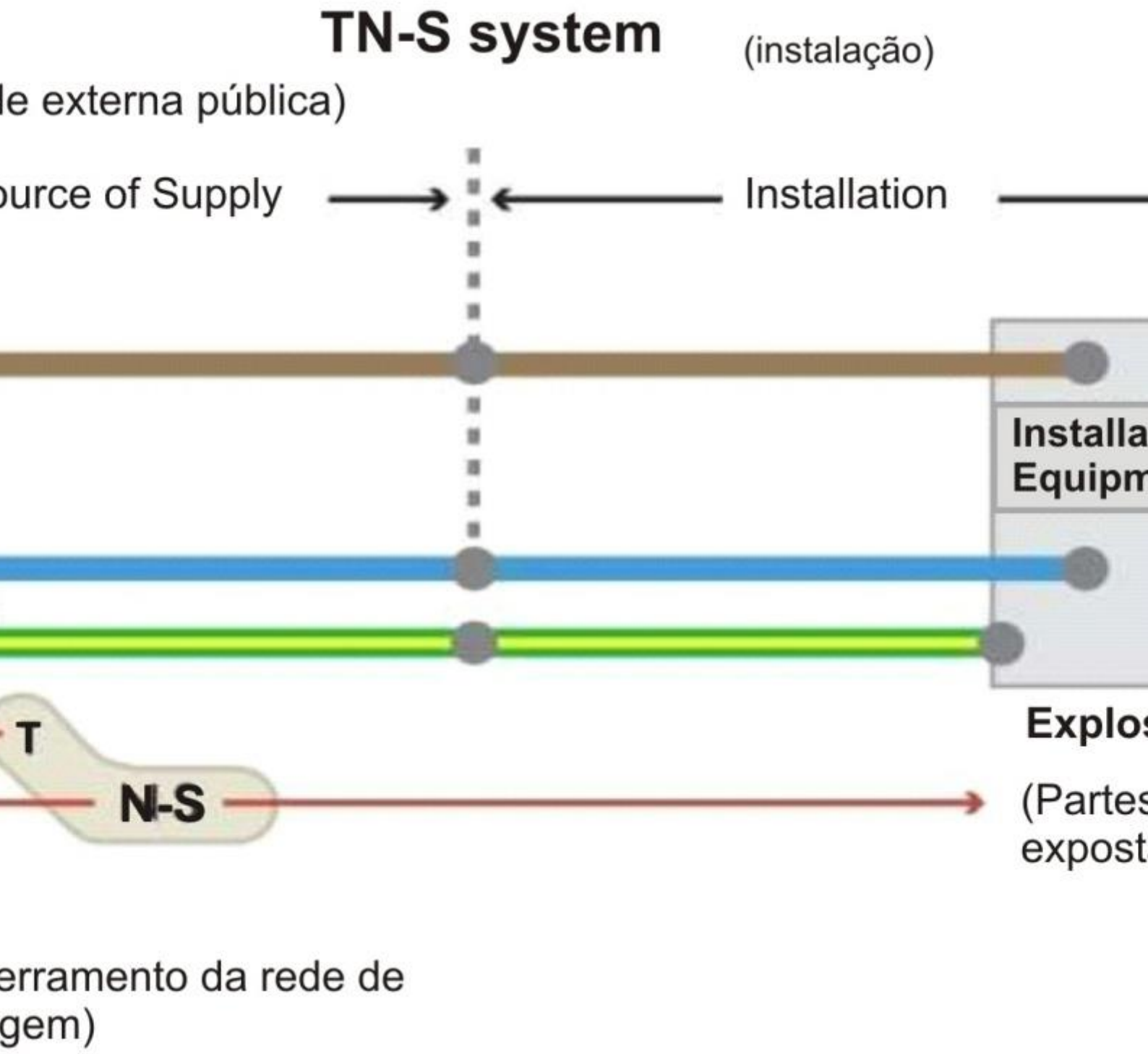


Figura 48 – Sistema TN-S

Para atender as funções anteriores destacam-se três características fundamentais:

- Capacidade de condução;
- Baixo valor de resistência;
- Configuração de eletrodo que possibilite o controle do gradiente de potencial.

Independente da finalidade, proteção ou funcional, o aterramento deve ser único em cada local da instalação. Existem situações onde os terras podem ser separados, porém precauções devem ser tomadas.

Em relação à instalação dos componentes do sistema de aterramento alguns critérios devem ser seguidos:

- o valor da resistência de aterramento não deve se modificar consideravelmente ao longo do tempo;

- os componentes devem resistir às condições térmicas, termomecânicas e eletromecânicas;

- os componentes devem ser robustos ou mesmo possuir proteção mecânica adequada para atender às condições de influências externas;

- deve-se impedir danos aos eletrodos e as outras partes metálicas por efeitos de eletrólise.

Equipotencializar

Definição: Equipotencializar é deixar tudo no mesmo potencial.

Na prática: Equipotencializar é minimizar a diferença de potencial para reduzir acidentes.

Em cada edificação deve ser realizada uma equipotencialização principal e ainda as massas das instalações situadas em uma mesma edificação devem estar conectadas a equipotencialização principal e desta forma a um mesmo e único eletrodo de aterramento. Veja figuras 49 e 50.

A equipotencialização funcional tem a função de equalizar o aterramento e garantir o bom funcionamento dos circuitos de sinal e a compatibilidade eletromagnética.

Condutor para Equipotencialização

- Principal – deve ter no mínimo a metade da seção do condutor de proteção de maior seção e no mínimo:
- 6mm2 (Cobre);
- 16mm2 (Alumínio);
- 50mm2 (Aço)

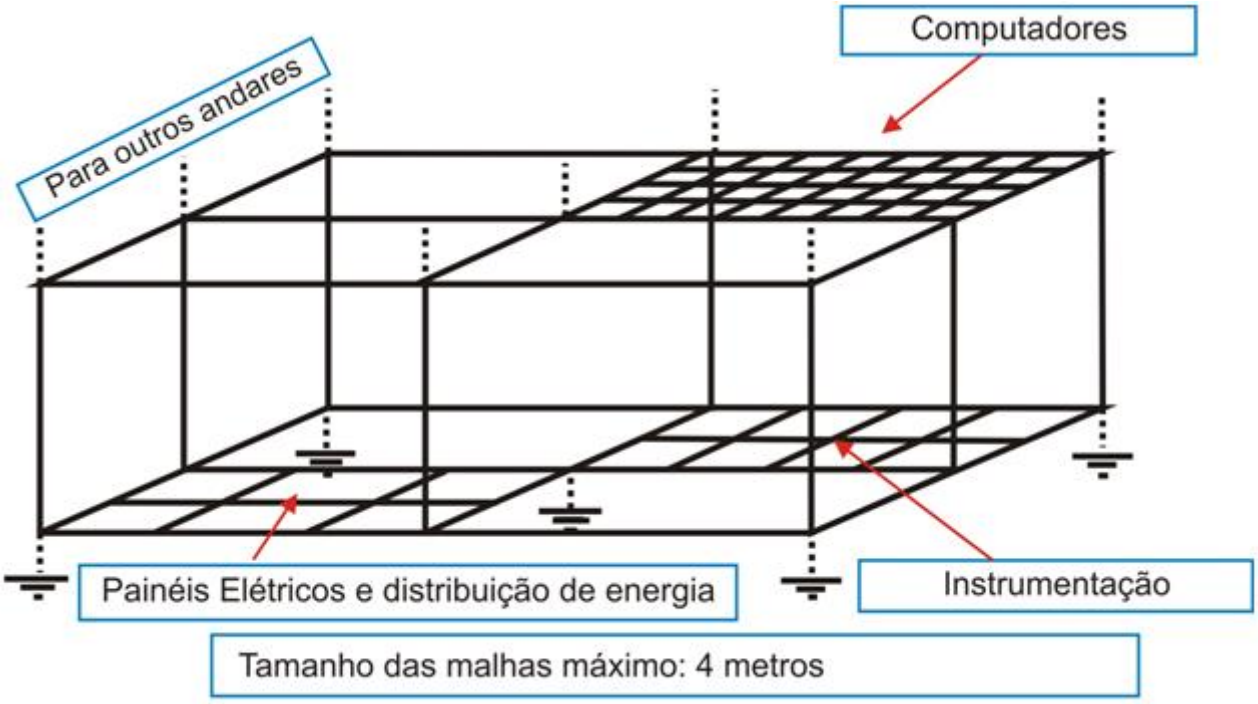


Figura 49 – Equipotencialização

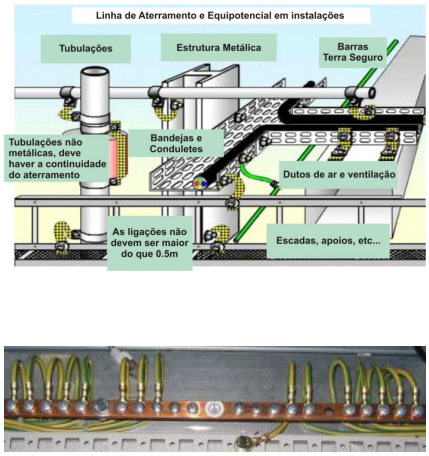


Figura 50 – Linha de Aterramento e Equipotencial em Instalações

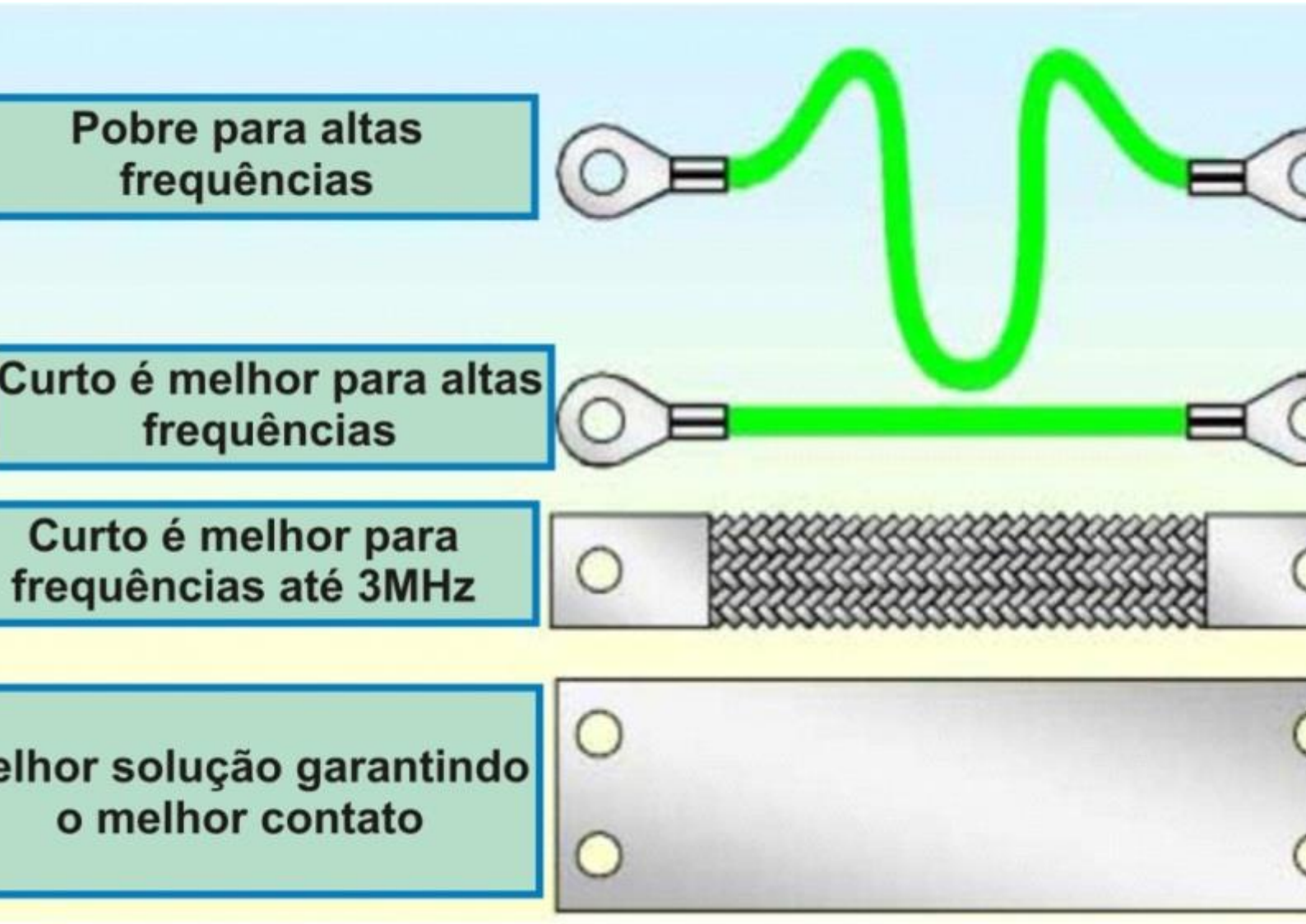


Figura 51 – Material para Equipotencializar

Considerações sobre equipotenciais

Observe a figura 52 a, onde temos uma fonte geradora de alta tensão e ruídos de alta frequência e um sistema de medição de temperatura a 25 m da sala de controle e onde dependendo do acondicionamento dos sinais, podemos ter até 2.3kV nos terminais de medição. Conforme vai se melhorando as condições de blindagem, aterramento e equalização chega-se à condição ideal para a medição.

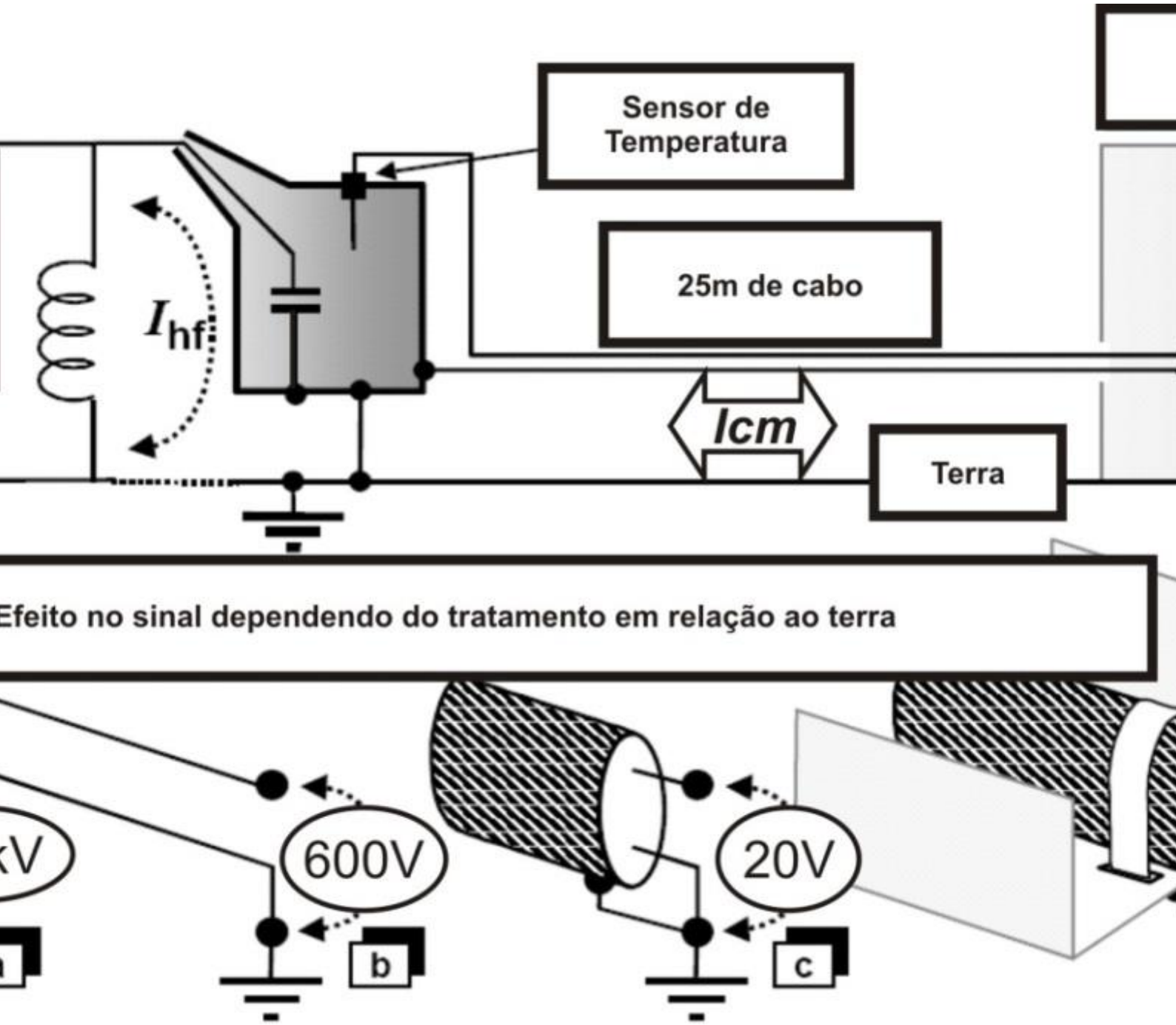


Figura 52a – Exemplo da importância do aterramento e equipotencialização e sua influência no sinal

Em sistemas distribuídos, como de controle de processos industriais, onde se tem áreas fisicamente distantes e com alimentação de diferentes fontes, a orientação é que se tenha o sistema de aterramento em cada local e que sejam aplicadas as técnicas de controle de EMI em cada percurso do encaminhamento de sinal, conforme representado na figura 50.

Implicações de um mau aterramento

As implicações que um mau ou mesmo inadequado aterramento pode causar não se limitam apenas aos aspectos de segurança. Os principais efeitos de um aterramento inadequado são choques elétricos aos

usuários pelo contato, resposta lenta (ou intermitente) dos sistemas de proteção (fusíveis, disjuntores, etc.).

Mas outros problemas operacionais podem ter origem no aterramento deficiente:

- Falhas de comunicação
- Drifts ou derivas, erros nas medições
- Excesso de EMI gerado
- Aquecimento anormal das etapas de potência (inversores, conversores, etc...) e motorização.
- Em caso de computadores, travamentos constantes.
- Queima de componentes eletrônicos sem razão aparente, mesmo sendo em equipamentos novos e confiáveis.
- Intermitências.
- Etc.

O sistema de aterramento deve ser único e deve atender a diferentes finalidades:

– Controle de interferência eletromagnética, tanto interno ao sistema eletrônico (acoplamento capacitivo, indutivo e por impedância comum) como externo ao sistema (ambiente);

– Segurança operacional, sendo a carcaça dos equipamentos ligadas ao terra de proteção e, dessa forma, qualquer sinal aterrado ou referenciado à carcaça ou ao painel, direta ou indiretamente, fica automaticamente referenciado ao terra de distribuição de energia;

– Proteção contra raios, onde os condutores de descida do Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA) devem ser conectados às estruturas metálicas (para evitar centelhamento) e sistemas de eletrodos de terra interconectados com o terra de energia, encanamentos metálicos, etc., ficando o “terra dos circuitos” ligados ao “terra do pára-raios” (via estrutura ou sistema de eletrodos).

A conseqüência é que equipamentos com carcaças metálicas ficam expostos a ruído nos circuitos de aterramento (energia e raios).

Para atender aos requisitos de segurança, proteção contra raios e EMI, o sistema de aterramento deveria ser um plano com impedância zero, onde teríamos a mistura de diferentes níveis de corrente destes sistemas sem interferência. Isto é, uma condição ideal, onde na prática não é bem assim.

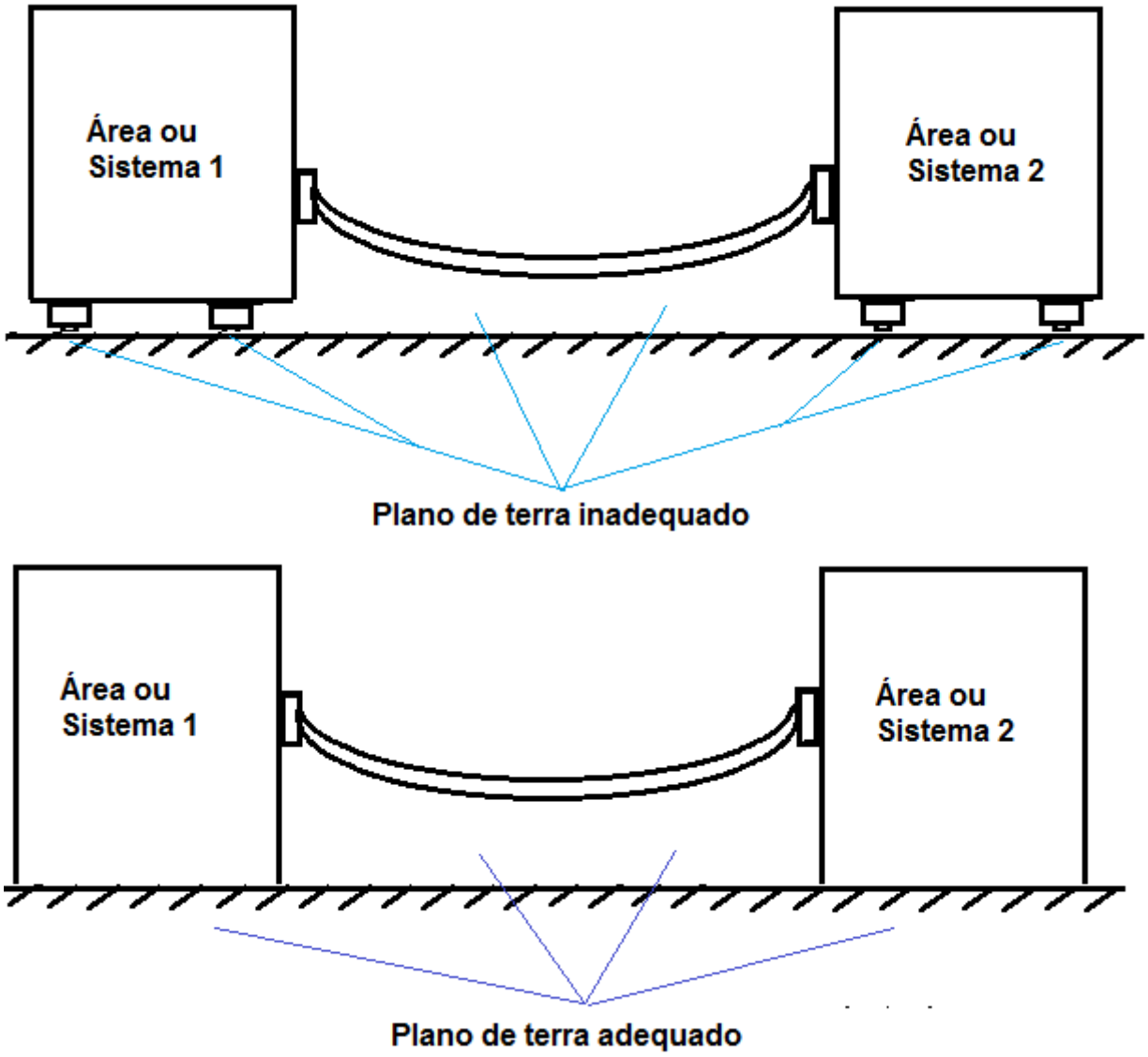


Figura 52b – Plano de terra

Tipos de Aterramento

Em termos da indústria de processos podemos identificar alguns tipos de terras:

- “Terra sujo” : São os que estão presentes nas instalações tipicamente envolvendo o 127VAC, 220VAC, 480VAC e que estão associadas a alto nível de comutação, tais como os CCMs, iluminação, distribuição de energia, etc, fontes geradoras de EMI. É comum que alimentação AC primária apresente picos, surtos, os chamados spikes e que degradam o terra AC.
- “Terra limpo: São os que estão presentes em sistemas e circuitos DC, tipicamente 24VDC, alimentando PLCs, controladores e tendo sinais de aquisição e controle de dados, assim como redes digitais.
- “Terra estrutural”: São os aterramentos via estrutura e que forçam o sinal a 0V. Tipicamente tem a função de gaiola de Faraday agindo de proteção a raios.

Observação: terra de “chassi” ou "carcaça" é usado como uma proteção contra choque elétrico. Este tipo de terra não é um terra de "resistência zero", e seu potencial de terra pode variar. No entanto, os circuitos são quase sempre ligados à terra para a prevenção de riscos de choque.

Aterramento em um único ponto

O sistema de aterramento por um único pode ser visto na figura 53, onde o ponto marcante é um único ponto de terra do qual se tem a distribuição do mesmo para toda a instalação.

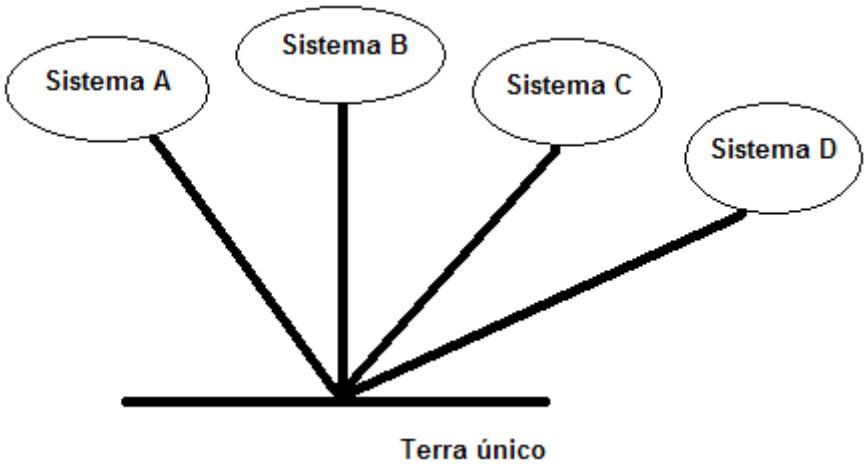


Figura 53 – Aterramento em um único ponto

Esta configuração é mais apropriada para o espectro de frequências baixas ainda atende perfeitamente a sistemas eletrônicos de alta frequência instalados em áreas reduzidas.

E ainda, este sistema dever ser isolado e não deve servir de caminho de retorno para as correntes de sinais, que devem circular por condutores de sinais, por exemplo, com pares balanceados.

Este tipo de aterramento paralelo elimina o problema de impedância comum, mas o faz em detrimento da utilização de um monte de cabeamento. Além disso, a impedância de cada fio pode ser muito elevada e as linhas de terra podem se tornar fontes de ruído do sistema. Este tipo de situação pode ser minimizado escolhendo o tipo correto de condutor (tipo AWG 14). Cabos de bitola maiores ajudam na redução da resistência de terra, enquanto o uso de fio flexível reduz a impedância de terra.

Aterramento em multipontos

Para frequências altas, o sistema multiponto é o mais adequado, conforme caracterizado na figura 54, inclusive simplificando a instalação.

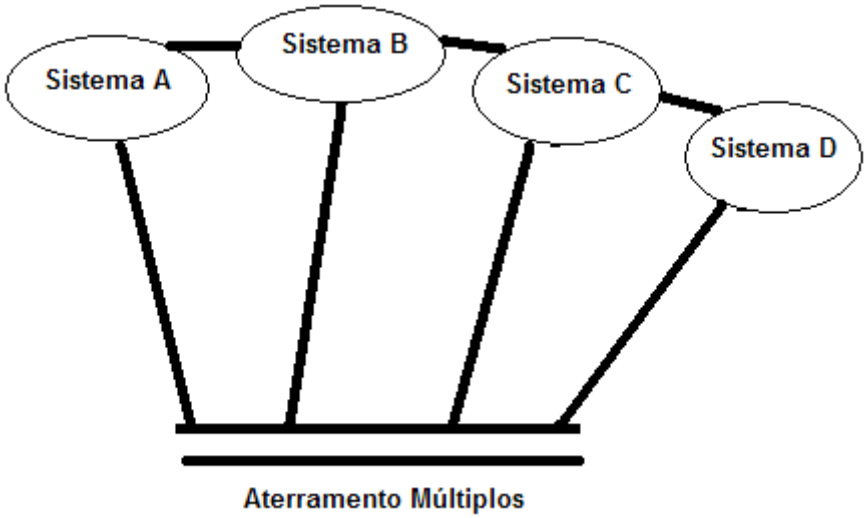


Figura 54 – Aterramento em multipontos

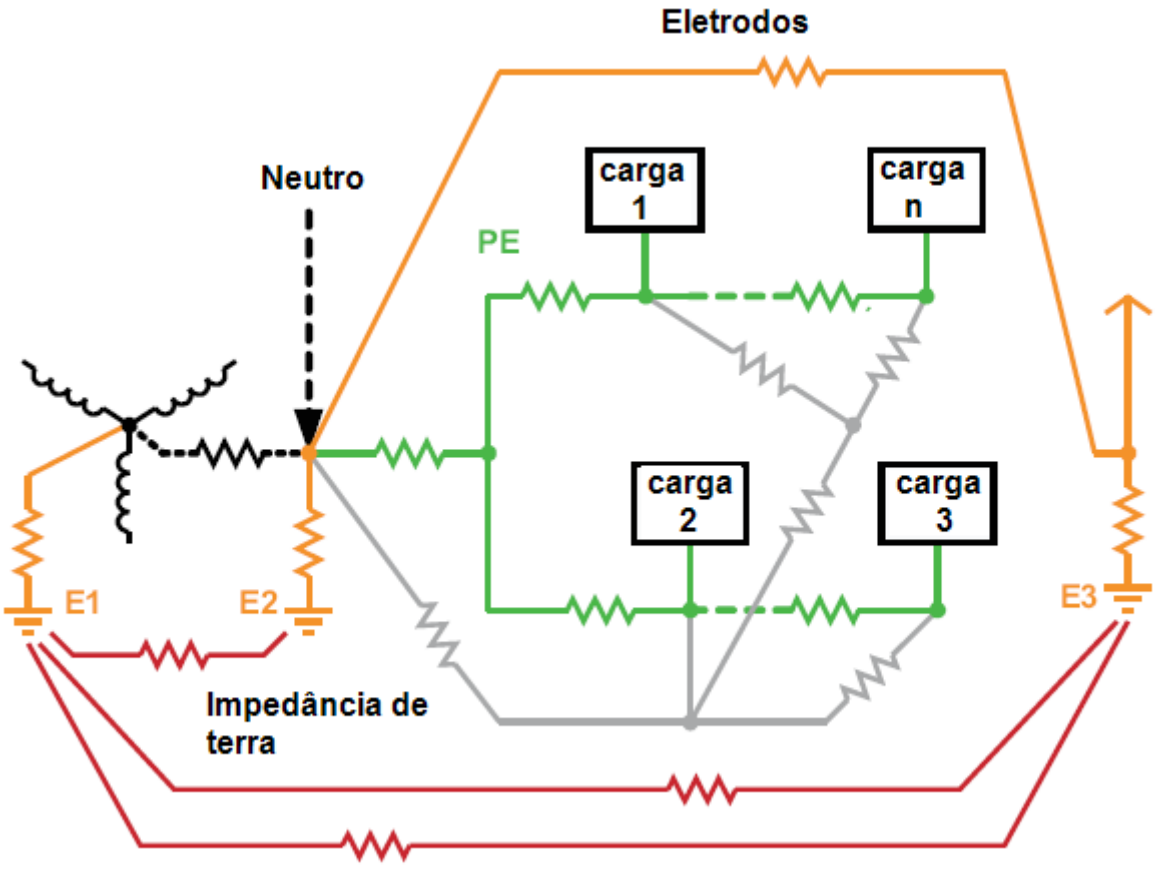


Figura 55 – Aterramento na Prática

Muitas conexões de baixa impedância entre os condutores PE e os eletrodos de aterramento em combinação com múltiplos caminhos de alta impedância entre os eletrodos e as impedâncias dos condutores cria um sistema de aterramento complexo com uma rede de impedância (ver figura 55), e as correntes que fluem através dele provoca diferentes potenciais de terra nas interligações em vários desta rede.

Os sistemas com aterramentos multipontos que empregam circuitos balanceados geralmente não apresentam problemas de ruídos. Neste caso ocorre filtragem do ruído, onde o seu campo fica contido entre o cabo e o

plano de terra.

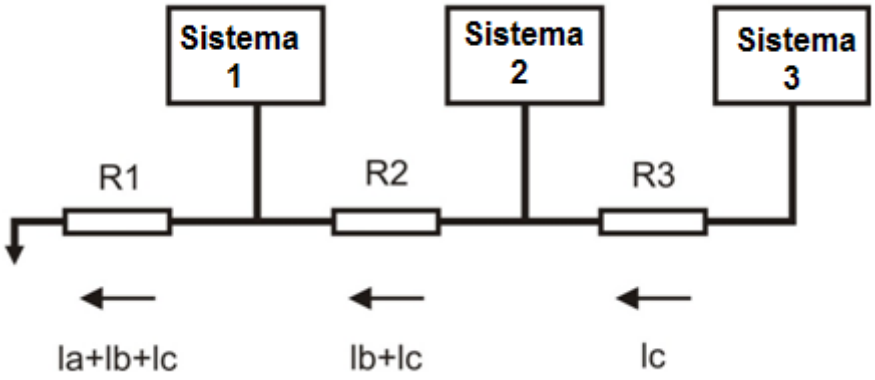


Figura 56 – Aterramento em multipontos inadequado

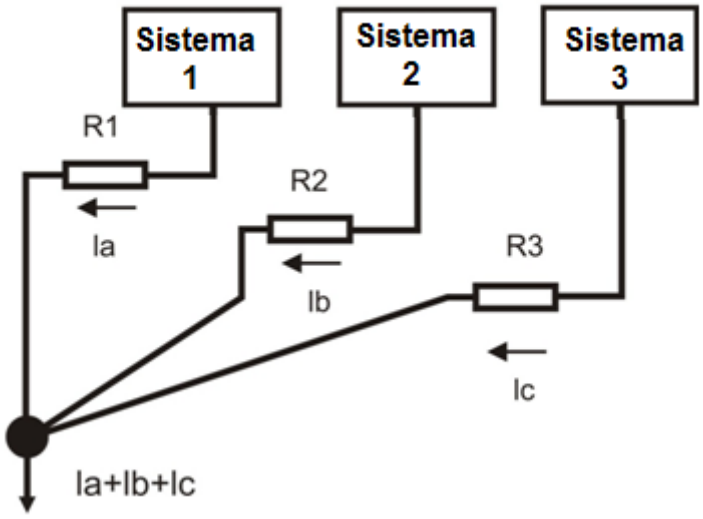


Figura 57 – Aterramento adequado, em um único ponto

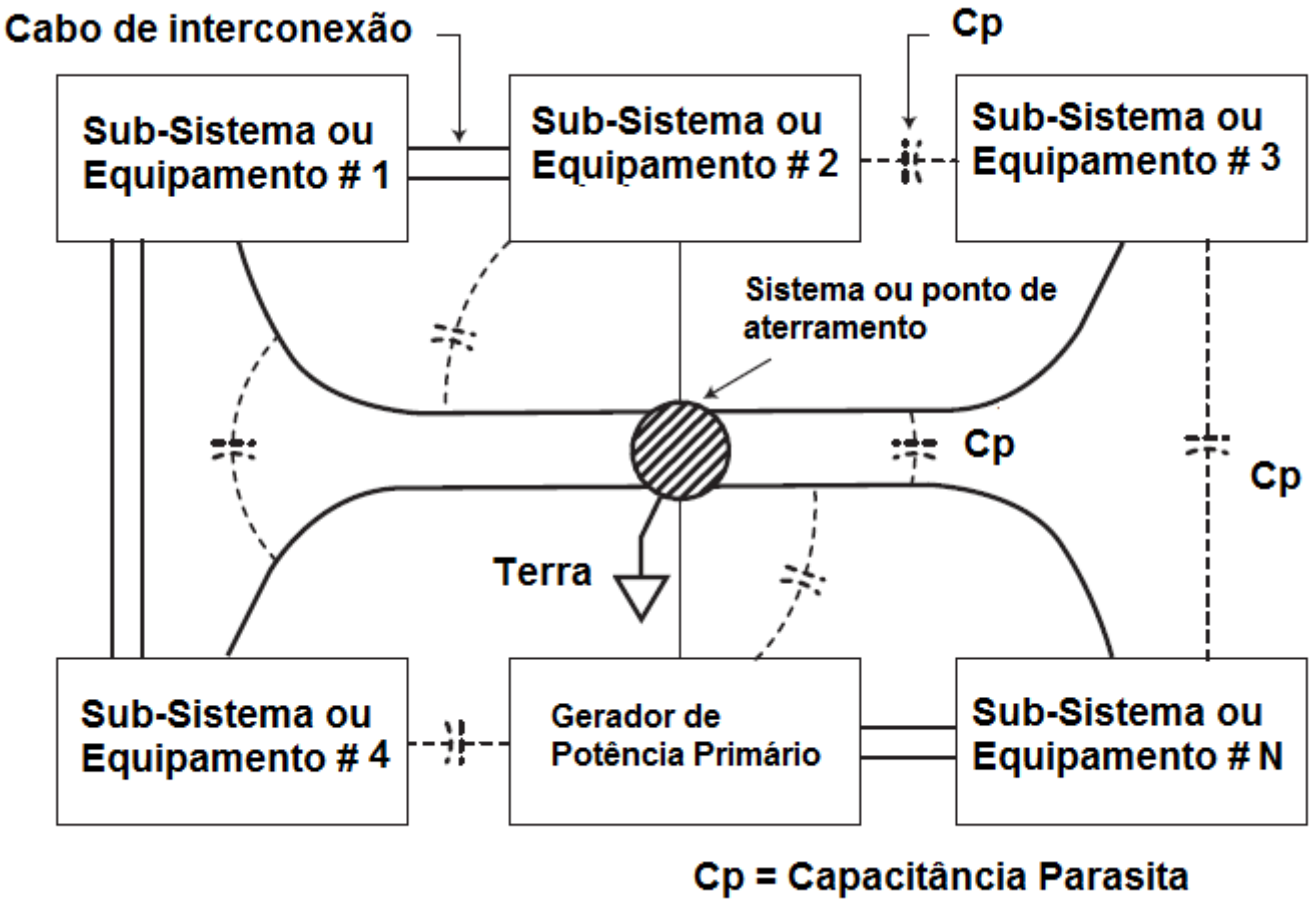


Figura 58 – Degradação do aterramento em ponto único com as interconexões e capacitâncias parasitas.

Na figura 57, tem-se um aterramento adequado onde as correntes individuais são conduzidas a um único ponto de aterramento.

A ligação à terra em série é muito comum porque é simples e econômica. No entanto, este é o aterramento que proporciona um terra sujo, devido à impedância comum entre os circuitos. Quando vários circuitos compartilham um fio terra, as correntes de um circuito (que flui através da impedância finita da linha de base comum) pode provocar variações na potencial de terra dos demais circuitos. Se as correntes são grandes o suficiente, as variações do potencial de terra podem causar sérias perturbações nas operações de todos os circuitos ligados ao terra comum de sinal.



Figura 59 – Aterramento inadequado, exposto ao tempo, oxidação e aumento de impedância no contato de terra, colocando o sistema em risco.

Os sistemas eletrônicos modernos raramente têm apenas um terra. Para mitigar a interferência, como a do acoplamento de impedância devido ao modo comum, etc. apectos distintos em cada subsistema por motivos estruturais, áreas de proteção e fundamentos de energia primária e secundária são desejáveis e ainda deve-se levar em conta os aspectos econômicos e logísticos na prática. Estes ponto individuais de cada subsistema finalmente estão ligadas ao sistema de aterramento único, onde se tem uma referência de potencial total do sistema.Veja a figura 60.

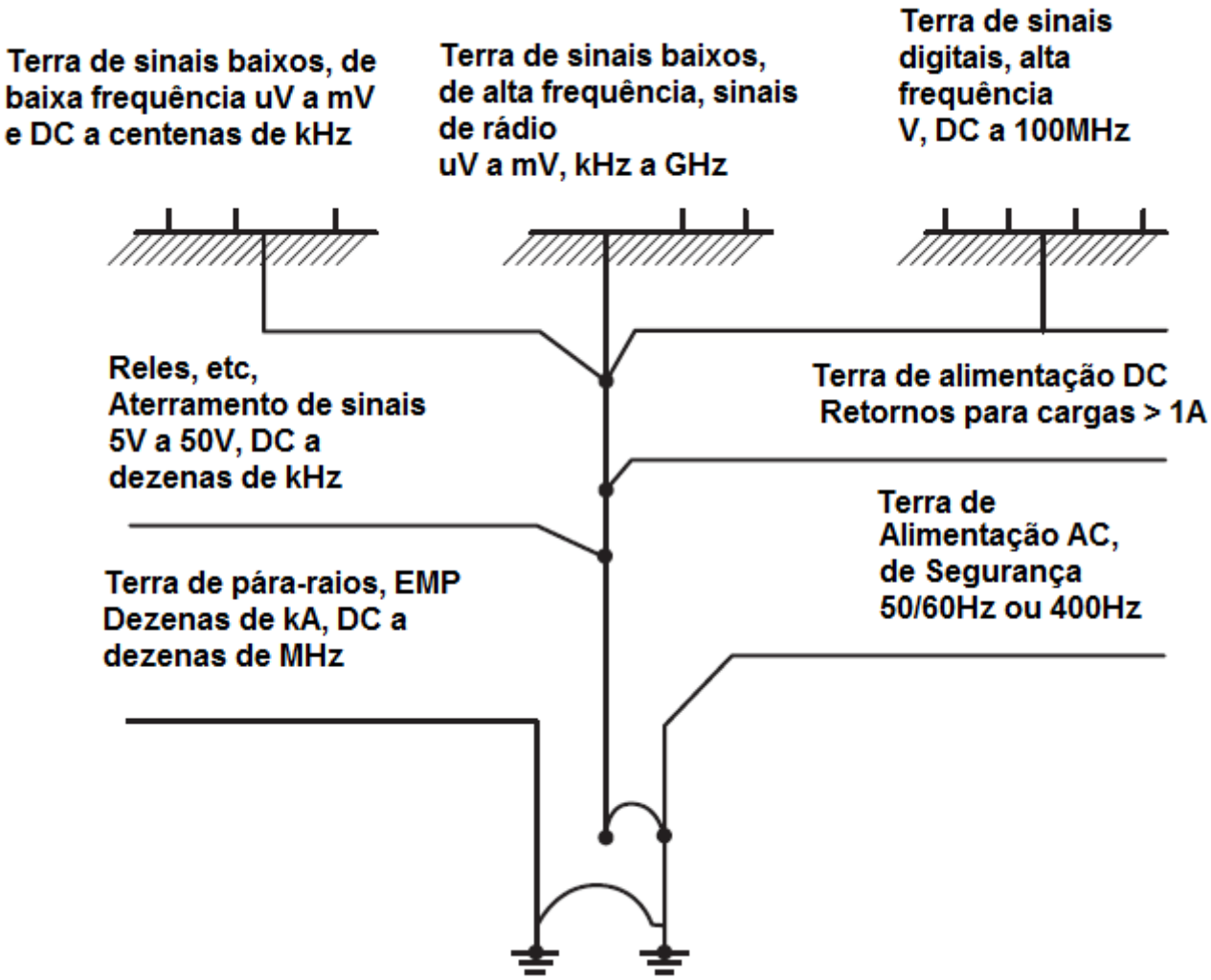


Figura 60 – Hierarquia de Aterramento

Loops de terra

Um loop de terra ocorre quando existe mais de um caminho de aterramento, gerando correntes indesejáveis entre estes pontos.

Estes caminhos formam o equivalente ao loop de uma antena que capta as correntes de interferência com alta eficiência.

Com isto a referência de tensão fica instável e o ruído aparece nos sinais.

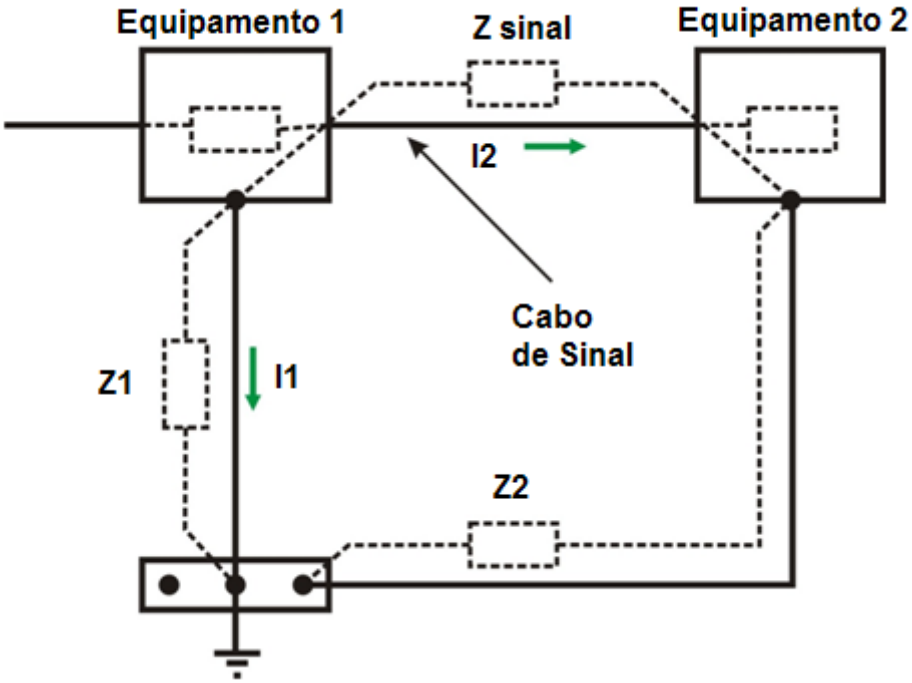


Figura 61 – Loop de terra

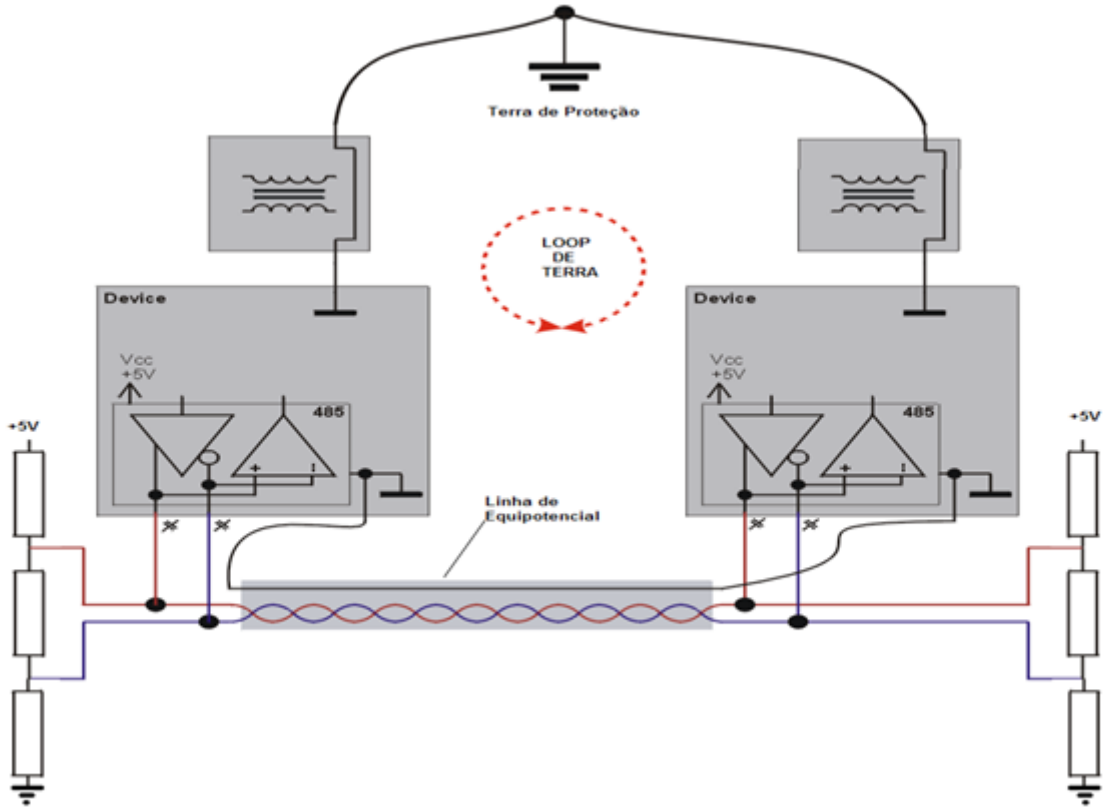


Figura 62 - Profibus-DP e os loops de terra

Aterramento ao nível dos equipamentos: Prática

Na prática, o que se faz é um “sistema misto”, separando circuitos semelhantes e segregando quanto ao nível de ruído:

- “terra de sinais” para o aterramento de circuitos mais sensíveis;
- “terra de ruído” para o aterramento de comandos (relés), circuitos de alta potência (CCMs, por exemplo);
- “terra de equipamento” para o aterramento de racks, painéis, etc.,

Sendo estes três circuitos conectados ao condutor de proteção.

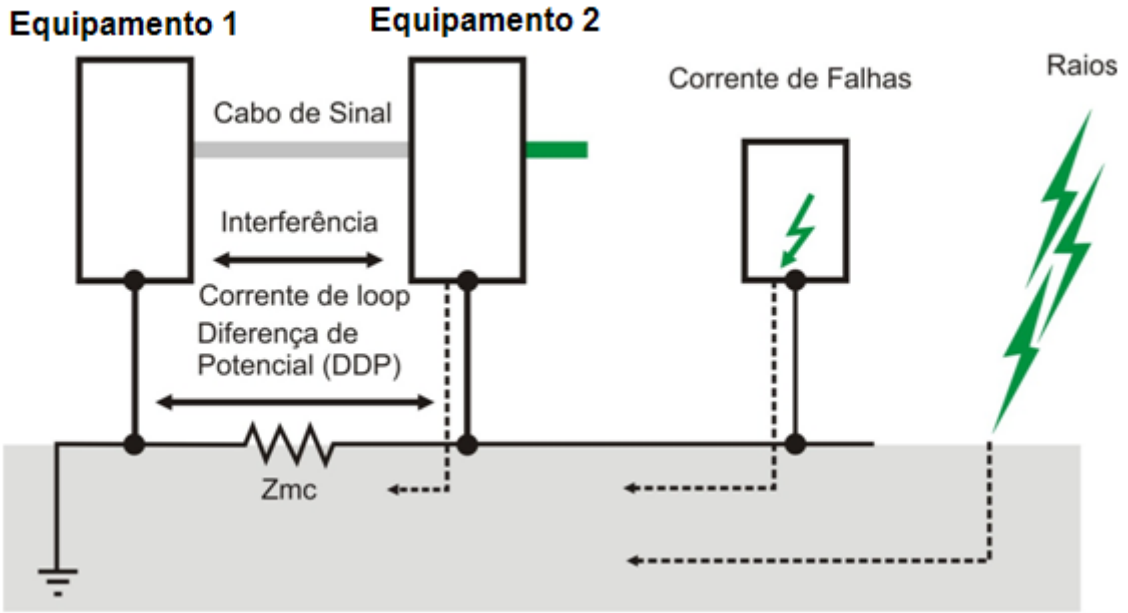


Figura 63 – Aterramento ao nível dos equipamentos na prática

Os sinais podem variar basicamente devido a:

- Flutuação de tensão;
- Harmônicas de corrente;
- RF conduzidas e radiadas;
- Transitórios (condução ou radiação);
- Campos Eletrostáticos;
- Campos Magnéticos;
- Reflexões;
- Crosstalk;
- Atenuações;
- Jitter (ruído de fase);
- Etc.

Aterramento de Equipamentos de Campo

A grande maioria dos fabricantes de equipamentos de campo, como transmissores de pressão, temperatura, posicionadores, conversores, etc recomenda o aterramento local de seus produtos. É comum que em suas carcaças exista um ou mais terminal de aterramento.

Ao se instalar os equipamentos, normalmente, suas carcaças estão em contato com a parte estrutural, ou tubulações e, consequentemente, aterradas. Nos casos em que a carcaça é isolada de qualquer ponto da estrutura, os fabricantes recomendam o aterramento local, onde recomenda-se a conexão a menor possível com fio AWG 12.Neste caso, deve-se ter o cuidado em relação a diferença de potencial entre o ponto aterrado e o painel onde se encontra o controlador (PLC).

Alguns fabricantes recomendam ainda que o equipamento fique flutuando, isto é, isolado da estrutura e que não seja aterrado, evitando os loops de corrente.

Em relação as áreas classificadas, recomenda-se consultar as regulamentações locais.

Em equipamentos microprocessados e com comunicação digital, alguns fabricantes incorporam ou tornam disponível os protectores de surtos ou transientes. Estes proporcionam a proteção a correntes de picos, fornecendo um caminho de desvio de baixa impedância para o ponto de terra.

Algumas dicas gerais envolvendo painéis de controle, CCMs e instrumentação

- Recomenda-se o uso de filtro RFI e que sempre se conecte este filtro o mais próximo possível da fonte de ruído (entre o filtro RFI e o drive).
- Nunca misture cabos de entrada e de saída.
- Todos os motores acionados por inversores devem ser alimentados preferencialmente com cabos blindados aterrados nas duas extremidades. Esta é a recomendação de todos os fabricantes de inversores. Vale lembrar que as frequências de comutação variam de 1k a 35KHz, normalmente 30KHz, o que pode influencia e muito o FF e Profibus-PA.
- Sempre que possível utilizar trafo isolador para a alimentação do sistema de automação.
- Utilize repetidores em CCMs isolando galvanicamente, evitando diferenciais de terra.
- Para atender as exigências de proteção de EMI todos os cabos externos devem ser blindados, exceto os cabos de alimentação da rede. A malha de blindagem deve ser contínua e não pode ser interrompida.
- Certifique-se de que cabos de diferentes zonas estão roteados em dutos separados.Dentro do painel, crie zonas distintas e recomeda-se até ter chapas separadoras que serviram de blindagem.
- Certifique-se de que os cabos se cruzam em ângulos retos a fim de minimizar acoplamentos.
- Use cabos que possuam valores de impedância de transferência os mais baixos possíveis.
- Nos cabos de controle recomenda-se, instalar um pequeno capacitor (100 nF a 220 nF) entre a blindagem e o terra para evitar circuito AC de retorno ao terra. Esse capacitor atuará como um supressor de interferência. Mas a orientação é sempre consultar os manuais dos fabricantes dos inversores.
- Escolher inversores com toroídes ou adicionar toróides (Common mode choke) na saída do inversor.
- Utilizar cabo isolado e shieldado (4 vias) entre o inversor e o motor e entre o sistema de alimentação até o inversor.
- Tentar trabalhar com a frequência de chaveamento a mais baixa possível.
- Sempre aterre a carcaça do motor. Faça o aterramento do motor no painel, onde o inversor está instalado ou no próprio inversor.
- Inversores geram correntes de fuga e nestes casos, pode-se introduzir um reator de linha na saída do inversor.
- Os reatores de linha constituem um meio simples e barato para aumentar a impedância da fonte de uma carga isolada (como um comando de frequência variável, no caso dos inversores).
- Os reatores são conectados em série a carga geradora de harmônicas e ao aumentar a impedância da fonte, a magnitude da distorção harmônica pode ser reduzida para a carga na qual o reator é adicionado. Aqui se recomenda consultar o manual do inversor e verificar suas recomendações.

• O ideal é ter indutor de entrada incorporado e filtro RFI/EMC para funcionar como uma proteção a mais para o equipamento e como um filtro de harmônicas para a rede elétrica, onde o mesmo encontra-se ligado.
• A principal função do filtro RFI de entrada é reduzir as emissões conduzidas por radiofrequência às principais linhas de distribuição e aos fios-terra. O
Filtro RFI de entrada é conectado entre a linha de alimentação CA de entrada
e os terminais de entrada do inversor.
• Ondas refletidas: se a impedância do cabo utilizado não estiver casada com a do motor, acontecerá reflexões. Vale lembrar que o cabo entre o inversor e o motor apresenta uma impedância para os pulso de saída do inversor(a chamada Surge Impedance). Nestes casos também se recomenda reatores.
• Cabos especiais: outro detalhe importante e que ajuda a minimizar os efeitos dos ruídos eletromagnéticos gerados em instalações com inversores e motores AC é o uso de cabos especiais que evitam o efeito corona de descargas que podem deteriorar a rigidez dielétrica da isolação, permitindo a presença de ondas estacionárias e a transferência de ruídos para a malha de terras. Outra característica construtiva de alguns cabos é a dupla blindagem que é mais eficiente na proteção à EMI.
• Em termos da rede digitais, distanciá-la do inversor, onde os sinais vão para os motores e colocar repetidores isolando as áreas.
• Verificar se há necessidade nos inversores de se ter capacitores de modo comum no barramento CC.
• As especificações de bitola do cabo e as recomendações normalmente são baseadas em 75 graus C. Não reduza a bitola do fio quando usar um fio de temperatura maior. As bitolas mínima e máxima dependem da corrente nominal do inversor e nas limitações físicas dos blocos de terminais.
• O(s) conector(es) de aterramento deve(m) ser classificados de acordo com a capacidade máxima da corrente do inversor.
• Para aplicações de inversor CA de frequência variável que devem cumprir os padrões de EMC recomenda-se que o mesmo tipo de cabo blindado especificado para os motores CA seja usado entre o inversor e o transformador.
• Mantenha os comprimentos de cabo do motor dentro dos limites estabelecidos pelo manual do usuário do inversor. Podem ocorrer vários problemas, inclusive na corrente de carga do cabo e no esforço por tensão de onda refletida.
• As E/S discretas como, por exemplo, os comandos de partida e parada, podem ser conectadas ao inversor com vários cabos. A blindagem do cabo é recomendável, uma vez que pode ajudar na redução do ruído de acoplamento cruzado dos cabos de alimentação. Condutores padrão individuais que atendem às especificações gerais em relação ao tipo, à temperatura, à bitola e aos códigos aplicáveis são aceitáveis, caso sejam afastados dos cabos de alta tensão para minimizar o acoplamento de ruído. No entanto, a instalação do cabo multicondutor pode ser mais barata.
• Esteja atento à isolação dos cabos: normalmente maior que 300V.
• Para aplicações com vários motores, examine a instalação com cuidado. Em geral, a maioria das instalações não tem nenhum problema. No entanto, correntes de carga em cabo com picos elevados podem causar sobrecorrentes no inversor ou faltas à terra.
• Quando houver terminais TE e PE, aterre-os separadamente no ponto mais próximo no painel usando uma malha trançada. Caso seja usado um fio-terra PE do painel, ele deve estar conectado no mesmo lado do painel que as conexões do eletroduto/armadura. Isso mantém o ruído em modo comum afastado do backplane do PLC.
• Blindagens do cabo:
• Cabos de motor e de entrada
• As blindagens dos cabos de motor e de entrada devem ser ligadas em ambas as extremidades para oferecer um caminho contínuo para a corrente de ruído em modo comum.
• Cabos de controle e de sinal
• As blindagens dos cabos de controle devem ser conectadas apenas em uma extremidade. A outra extremidade deve ser cortada e isolada.
• – A blindagem de um cabo entre dois gabinetes deve ser conectada ao gabinete que contém a fonte do sinal.
• – A blindagem de um cabo entre um gabinete e um dispositivo externo deve ser conectada na extremidade do gabinete, a menos quando especificado em contrário pelo fabricante do dispositivo externo.

- Jamais conecte uma blindagem ao lado comum de um circuito de lógica (isso levará ruído ao circuito de lógica). Conecte a blindagem diretamente ao aterramento do rack.
- Ao encaminhar a fiação até o inversor, separe os fios de alta tensão e os condutores do motor dos condutores de E/S e de sinal. Para mantê-los separados, encaminhe-os por um eletroduto separado ou use divisores de bandeja.
- Não encaminhe mais de 3 conjuntos de condutores de motor (3 inversores) pelo mesmo eletroduto. Mantenha os limites de preenchimento do eletroduto de acordo com os códigos elétricos aplicáveis. Não passe condutores de motor ou cabos de alimentação ou de comunicação pelo mesmo eletroduto. Se possível, evite passar grandes extensões de fios de força de entrada e condutores de motor pelo mesmo eletroduto.
- Em relação aos bandejamentos, disponha cuidadosamente a geometria de

múltiplos conjuntos de cabos.Mantenha os condutores de cada grupo no mesmo pacote. Disponha os condutores de forma a minimizar a corrente induzida entre os conjuntos e equilibrá-las. Isso é crítico em inversores com potências nominais de 200 HP (150 kW) e mais mantenha os cabos de alimentação e de controle separados. Ao dispor bandejas para cabos para inversores grandes, verifique se a bandeja ou o eletroduto que contém a fiação de sinal fique a 30cm ou mais da que contém a fiação do motor ou de força. Os campos eletromagnéticos das correntes de motor ou de alimentação podem induzir correntes nos cabos de sinal. Os divisores também oferecem uma excelente separação.
- Faça a terminação das conexões de alimentação, de motor e de controle nos blocos de terminais do inversor.
- Em baixas frequências, de níveis de CC até 1 MHz, a blindagem do cabo pode ser aterrada em uma única extremidade do cabo e oferecer uma boa resposta quanto aos efeitos da interferência eletromagnética. Em frequências mais altas, recomenda-se aterrar a blindagem do cabo em ambas as extremidades do cabo. Nesses casos, é muito importante que as diferenças de potencial de terra em ambos os pontos de conexão ao aterramento sejam as mínimas possíveis. A diferença em tensão, entre ambos os extremos deve ser, no máximo, de 1 V (rms) para que os efeitos dos *loops* de terra sejam minimizados. É também importante considerar que em altas frequências há a capacitância parasita de acoplamento que tende a completar o *loop* quando a blindagem está aterrada em um único extremo do cabo.

Aterramento em áreas classificadas

Recomenda-se verificar a ABNT NBR IEC 60079-14 para aterramento e ligação com sistema equipotencial de sistemas intrinsecamente seguros.
Um circuito intrinsecamente seguro deve estar flutuando ou estar ligado ao sistema equipotencial associado com a área classificada em somente um ponto.

O nível de isolação requerido (exceto em um ponto) deve ser projetado para suportar 500 V no ensaio de isolação de acordo com 6.4.12 da IEC 60079-11. Quando este requisito não for atendido, então o circuito deve ser considerado aterrado naquele ponto. Mais de uma conexão ao terra é permitida no circuito, desde que o circuito seja dividido em sub circuitos galvanicamente isolados, e cada qual esteja aterrado somente em um ponto.

Blindagens devem ser conectadas a terra ou à estrutura de acordo com a ABNT NBR IEC 60079-14.

Sempre que possível, conecte as bandejas de cabos ao sistema de linha equipotencial.

As malhas(Shield) devem ser aterradas em um único ponto no condutor de equalização de potencial. Se houver necessidade, por razões funcionais, de outros pontos de aterramento é permitido que sejam feitos por meio de pequenos capacitores, tipo cerâmico, inferiores a 1 nF e para 1500V, desde que a somatória das capacitâncias não ultrapasse 10 nF.

Nunca instale um dispositivo que tenha sido instalado anteriormente sem uma barreira intrinsecamente segura em um sistema intrinsecamente seguro, pois o zener de proteção pode estar queimado e não vai atuar seguramente em áreas intrinsecamente segura.

Cuidados e recomendações com o aterramento e shield no barramento PROFIBUS-PA e Foundation fieldbus

Ao considerar a questão de *shield* e aterramento em barramentos de campo, deve- se levar em conta:

- A compatibilidade eletromagnética (EMC).
- Proteção contra explosão.
- Proteção de pessoas.

De acordo com a IEC 61158-2, aterrar significa estar permanentemente conectado ao terra através de uma impedância suficientemente baixa e com capacidade de condução suficiente para prevenir qualquer tensão que possa resultar em danos de equipamentos ou pessoas. Linhas de tensão com 0 Volts devem ser conectadas ao terra e serem galvanicamente isoladas do barramento fieldbus. O propósito de se aterrar o *shield* é evitar ruídos de alta frequência.

Preferencialmente, o *shield* deve ser aterrado em dois pontos, no início e final de barramento, desde que não haja diferença de potencial entre estes pontos, permitindo a existência e caminhos a corrente de *loop*. Na prática, quando esta diferença existe, recomenda-se aterrar *shield* somente em um ponto, ou seja, na fonte de alimentação ou na barreira de segurança intrínseca. Deve-se assegurar a continuidade da blindagem do cabo em mais do que 90% do comprimento total do cabo.

O *shield* deve cobrir completamente os circuitos elétricos através dos conectores, acopladores, *splices* e caixas de distribuição e junção.

Nunca se deve utilizar o *shield* como condutor de sinal. É preciso verificar a continuidade do *shield* até o último equipamento de campo do segmento, analisando a conexão e acabamento, pois este não deve ser aterrado nas carcaças dos equipamentos.

Em áreas classificadas, se uma equalização de potencial entre a área segura e área perigosa não for possível, o *shield* deve ser conectado diretamente ao terra (*Equipotencial Bonding System*) somente no lado da área perigosa. Na área segura, o *shield* deve ser conectado através de um acoplamento capacitivo (capacitor preferencialmente cerâmico (dielétrico sólido), C<= 10nF, tensão de isolação >=
1.5kV).

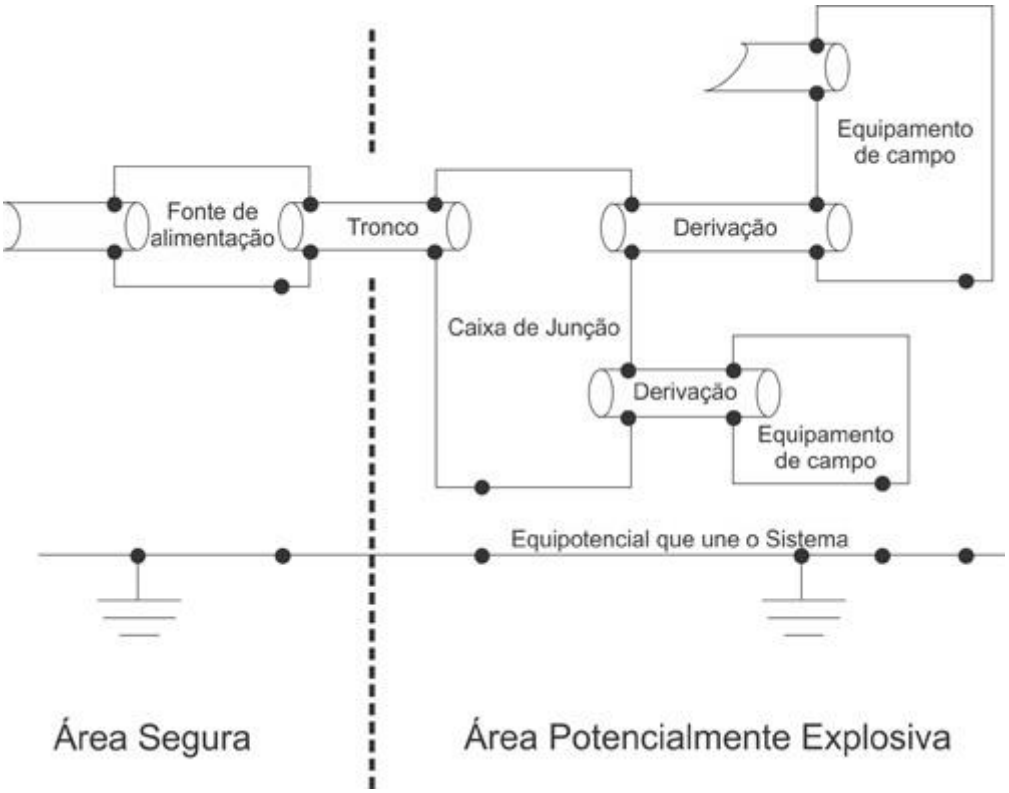


Figura 64 – Combinação Ideal de Shield e Aterramento.

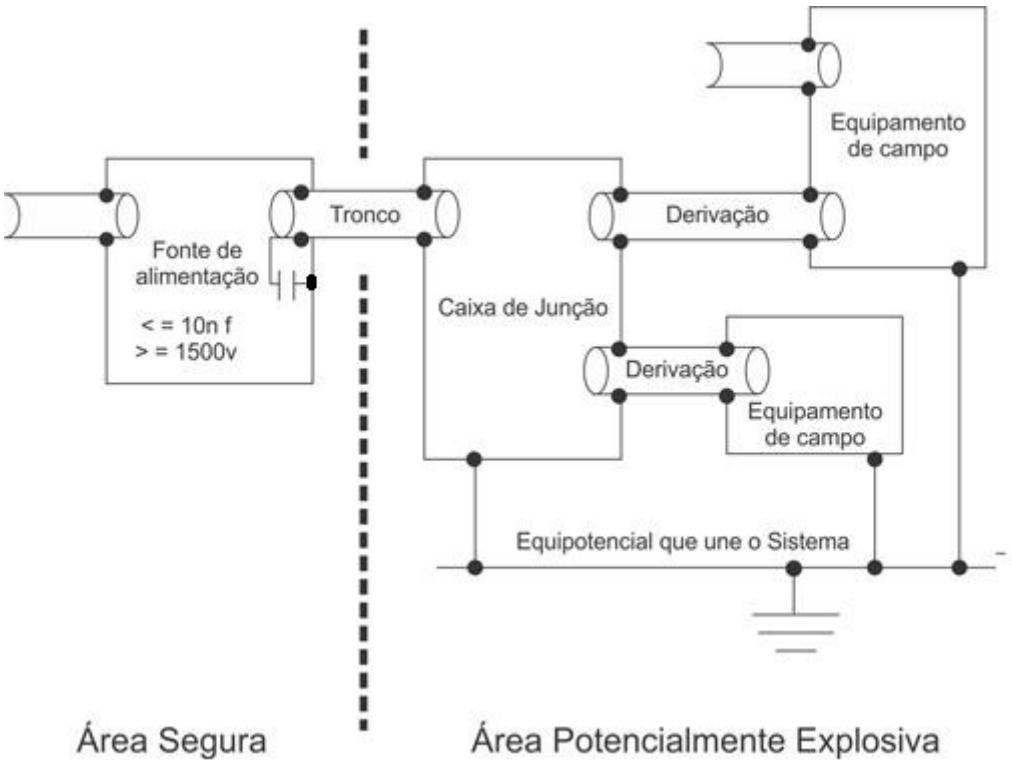


Figura 65 – Aterramento Capacitivo.

A IEC 61158-2 recomenda que se tenha a isolação completa. Este método é usado principalmente nos Estados Unidos e na Inglaterra. Neste caso, o *shield* é isolado de todos os terras, a não ser o ponto de terra do negativo da fonte ou da barreira de segurança intrínseca do lado seguro.O *shield* deve ter continuidade desde o início do segmento, passando pelas caixas de junções e distribuições e chegar até os equipamentos. As carcaças dos equipamentos são aterradas individualmente do lado não seguro. Este método tem a

desvantagem de não proteger os sinais totalmente dos sinais de alta frequência e, dependendo da topologia e comprimento dos cabos, pode gerar em alguns casos a intermitência de comunicação. Recomenda-se nestes casos o uso de canaletas metálicas.

Uma outra forma complementar à primeira, seria ainda aterrar as caixas de junções e as carcaças dos equipamentos em uma linha de equipotencial de terra, do lado não seguro. Os terras do lado não seguro com o lado seguro são separados.

A condição de aterramento múltiplo também é comum, onde se tem uma proteção mais efetiva às condições de alta frequência e ruídos eletromagnéticos. Este método é preferencialmente adotado na Alemanha e em alguns países da Europa. Neste método, o *shield* é aterrado no ponto de terra do negativo da fonte ou da barreira de segurança intrínseca do lado seguro e além disso, no terra das caixas de junções e nas carcaças dos equipamentos, sendo estas também aterradas pontualmente, no lado não seguro. Uma outra condição seria complementar a esta, porém os terras seriam aterrados em conjunto em uma linha equipotencial de terra, unindo o lado não seguro ao lado seguro.

Para mais detalhes, sempre consultar as normas de segurança do local. Recomenda-se utilizar a IEC 60079-14 como referência em aplicações em áreas classificadas.

As figura 66 e 67 mostram condições inadequada e adequada do aterramento indevido do shield

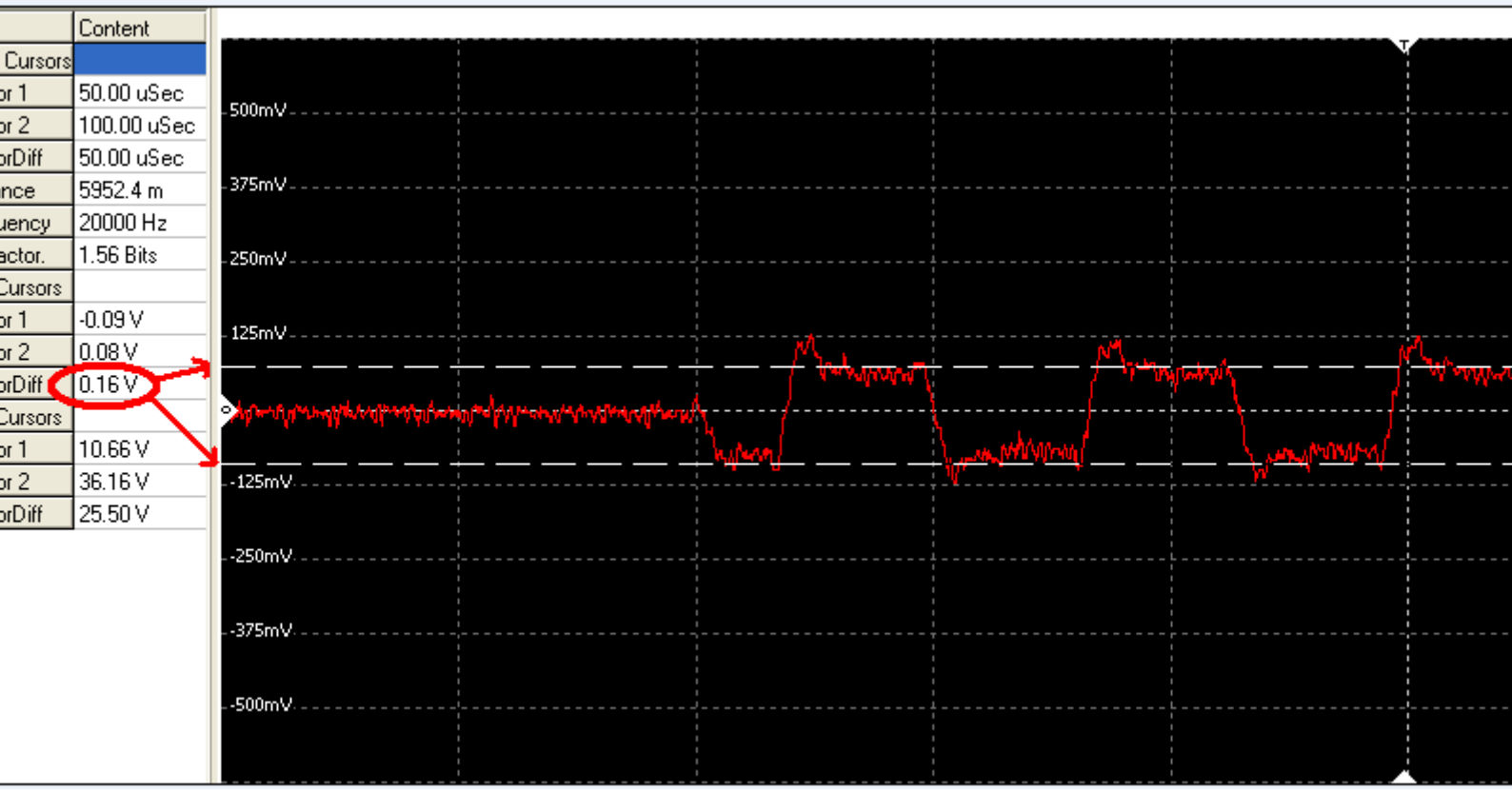


Figura 66 – Aterramento inadequado do shield em fieldbus em mais de um ponto

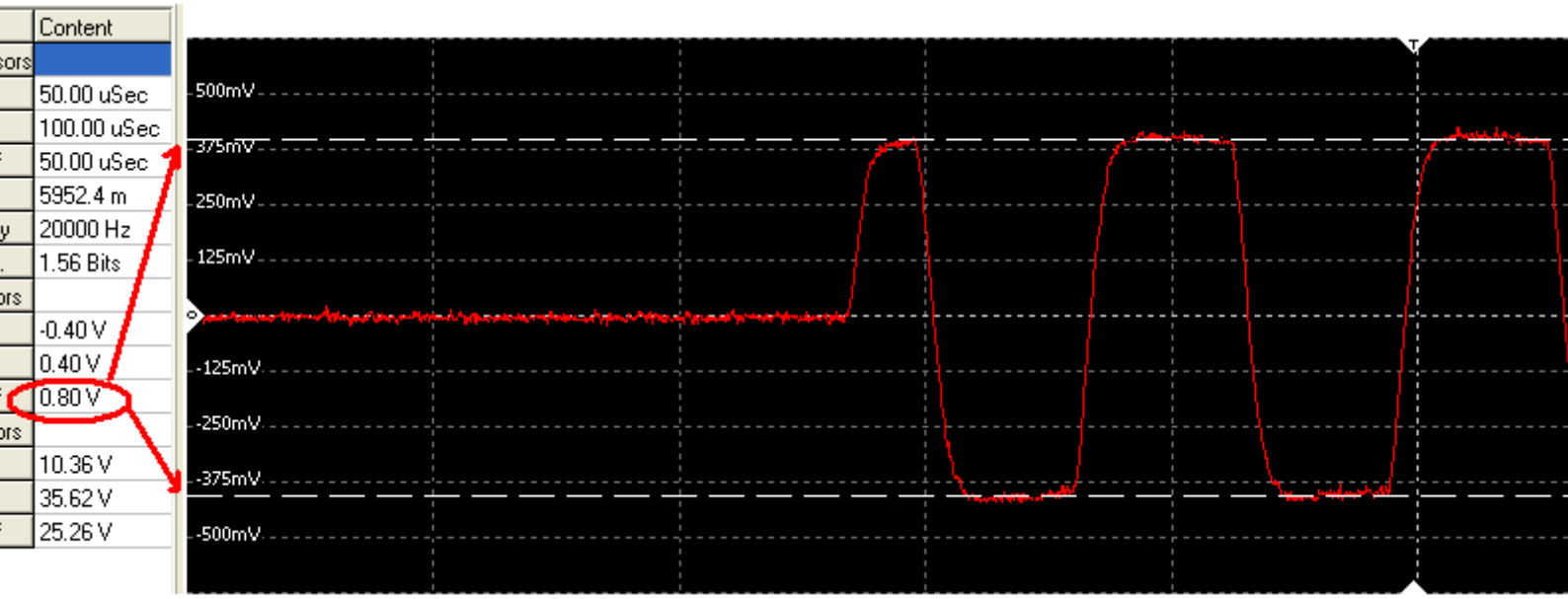


Figura 67 – Aterramento adequado do shield em fieldbus, somente em um ponto

Blindagem

Aterramento e blindagem são requisitos mandatórios para garantir a integridade dos dados de uma planta. É muito comum na prática encontrarmos funcionamento intermitente e erros grosseiros em medições devido às más instalações.

Os efeitos de ruídos podem ser minimizados com técnicas adequadas de projetos, instalação, distribuição de cabos, aterramento e blindagens. Aterramentos inadequados podem ser fontes de potenciais indesejados e perigosos e que podem comprometer a operação efetiva de um equipamento ou o próprio funcionamento de um sistema.

A blindagem (shield) deve ser conectada ao potencial de referência do sinal que está protegendo, vide figura 68.

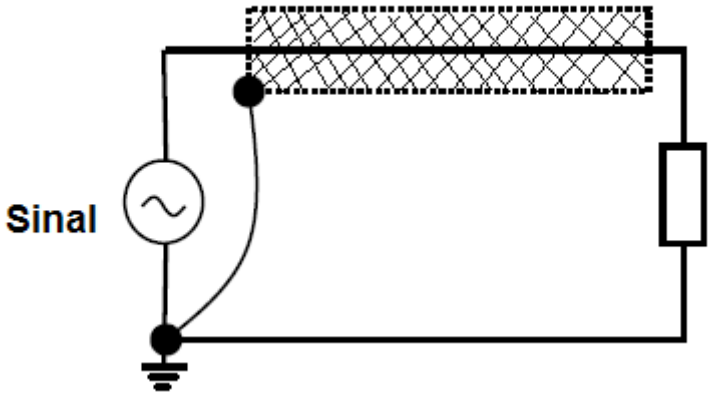
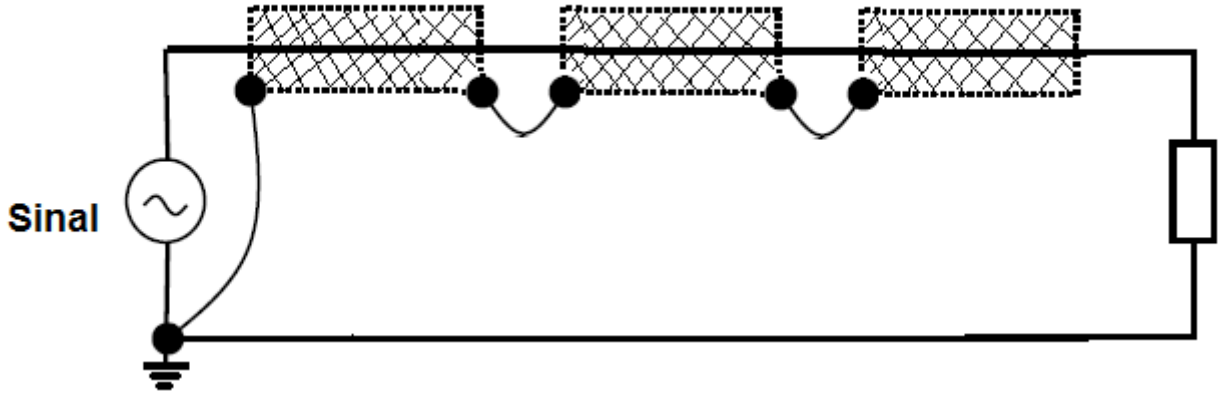


Figura 68 - Blindagem conectada ao potencial de referência do sinal que está protegendo

Quando se tem múltiplos segmentos deve-se mantê-los conectados, garantindo o mesmo potencial de referência, conforme a figura 69.



Quando se tem múltiplos segmentos deve-se mantê-los conectados, garantindo o mesmo potencial de referência, conforme a figura 69.

Efeito Blindagem x aterramento em um único ponto

Neste caso a corrente não circulará pela malha e não cancelará campos magnéticos.

Deve-se minimizar o comprimento do condutor que se estende fora da blindagem e garantir uma boa conexão do shield ao terra.

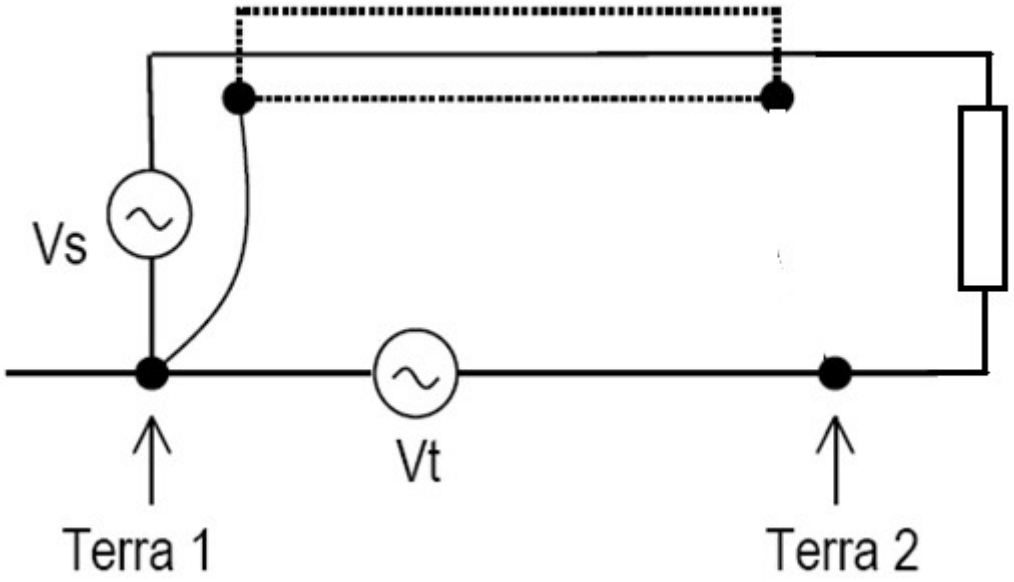


Figura 70 - Efeito Blindagem x aterramento em um único ponto

Efeito Blindagem x aterramento em dois pontos

Ocorre uma distribuição das correntes, em função das suas frequências, pois a corrente tende a seguir o caminho de menor impedância.

Até alguns kHz: a reatância indutiva é desprezível e a corrente circulará pelo caminho de menor resistência.

Acima de kHz: há predominância da reatância indutiva e com isto a corrente circulará pelo caminho de menor indutância.

O caminho de menor impedância é aquele cujo percurso de retorno é próximo ao percurso de ida, por apresentar maior capacitância distribuída e menor indutância distribuída.

Deve-se minimizar o comprimento do condutor que se estende fora da blindagem e garantir uma boa conexão do shield ao terra.

$$X_L = 2\pi f L$$

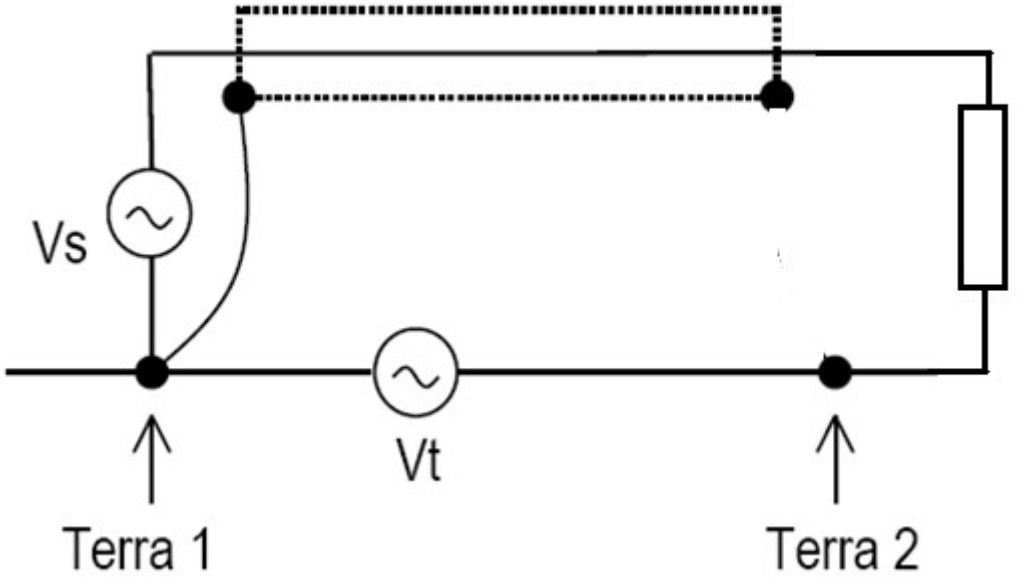


Figura 71 - Efeito Blindagem x aterramento em dois pontos

Vale citar neste caso:

- Não há proteção contra loops de terra.
- Danos aos equipamentos ativos possivelmente significativos quando a diferença de potencial de terra entre ambos os extremos ultrapassar 1 V (rms).
- A resistência elétrica do aterramento deve ser a mais baixa possível em ambos os extremos do segmento para minimizar os loops de terra, principalmente em baixas frequências.

Como vimos anteriormente, a blindagem de cabos é usada para eliminar interferências por acoplamento capacitivo devidas a campos elétricos.

Eliminando ruídos em Profibus-PA com repetidor ótico

O repetidor ótico Profibus-PA VRP10-O da Vivace Process Instruments permite que interfaces elétricas Profibus-PA (H1, 31.25 kbits/s) sejam convertidas em interfaces óticas Profibus-PA e vice-versa. A comunicação é do tipo half-duplex em distâncias de até 4 km, com o grande benefício da imunidade a EMI, garantindo uma alta integridade dos sinais e disponibilidade de rede Profibus-PA.

Como a fibra ótica é imune a EMI/RFI e loops de aterramento, o VRP10-O garante uma alta integridade dos sinais e disponibilidade da rede Profibus-PA. Tirando proveito das vantagens da tecnologia de transmissão

ótica, o VRP10-O pode ser integrado em redes PROFIBUS já existentes, aumentando a tolerância a falhas da rede.

Seguem algumas características:

- Alimentado externamente (24 Vcc, corrente máxima de 200 mA)
- De acordo com a IEC61158-2
- Sem configuração
- Sem endereço
- Uma ótima solução para aumentar distâncias de conexão, eliminar EMI e problemas de aterramento
- Cabo de Fibra Óptica Multimodo dual ou simples, cabos de fibra óptica 62.5 ou 50/125 m com conectores ST
- Tamanho máximo por segmento ótico de 4000 m
- LEDs indicam a alimentação, comunicação ótica e comunicação Profibus-PA
- Simplifica as instalações, principalmente em áreas classificadas (Ex-d).

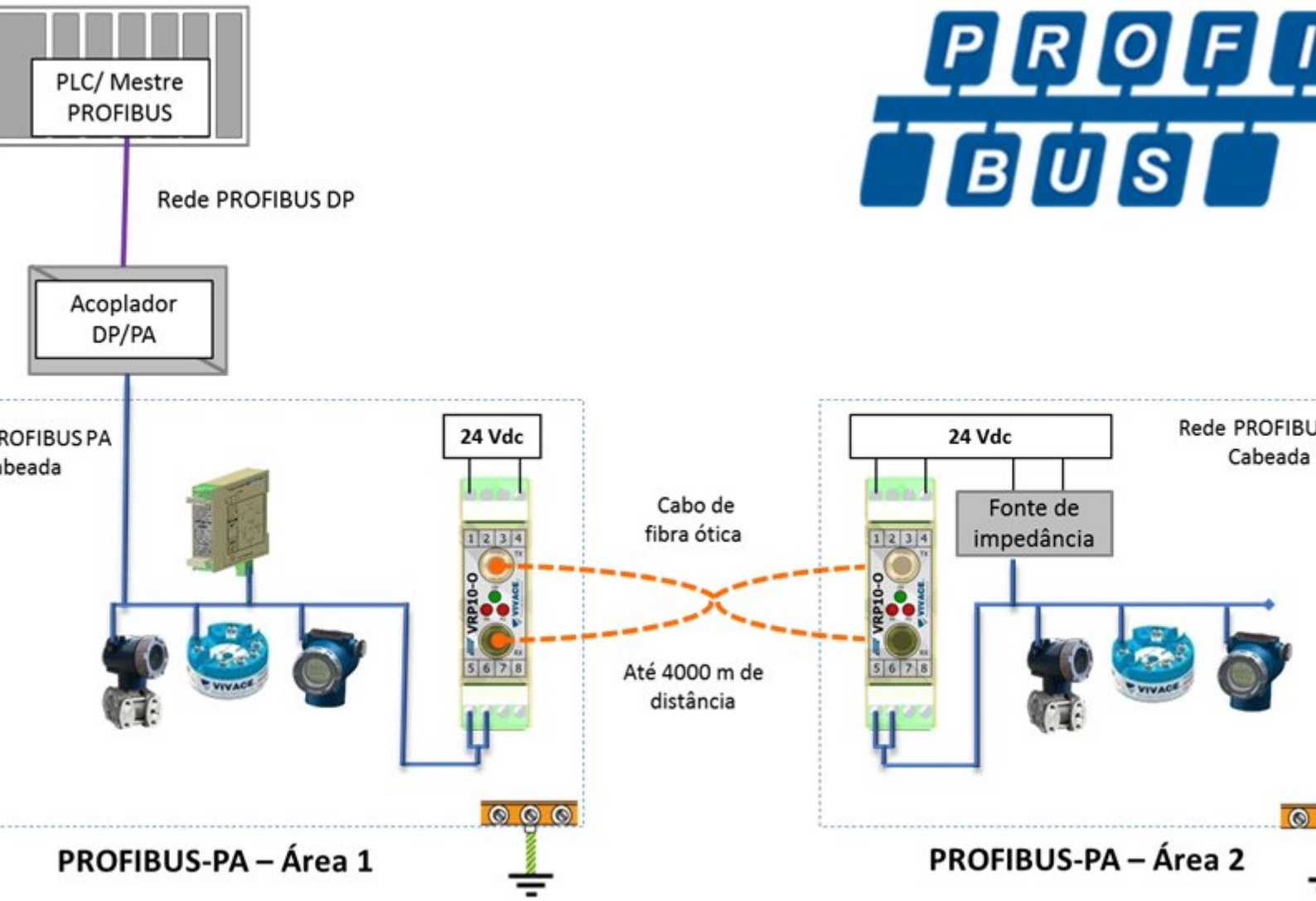


Figura 72 - Repetidor ótico Profibus-PA.

Conclusão

Vimos vários detalhes sobre os efeitos do acoplamento capacitivo, indutivo e condutivo, assim como detalhes

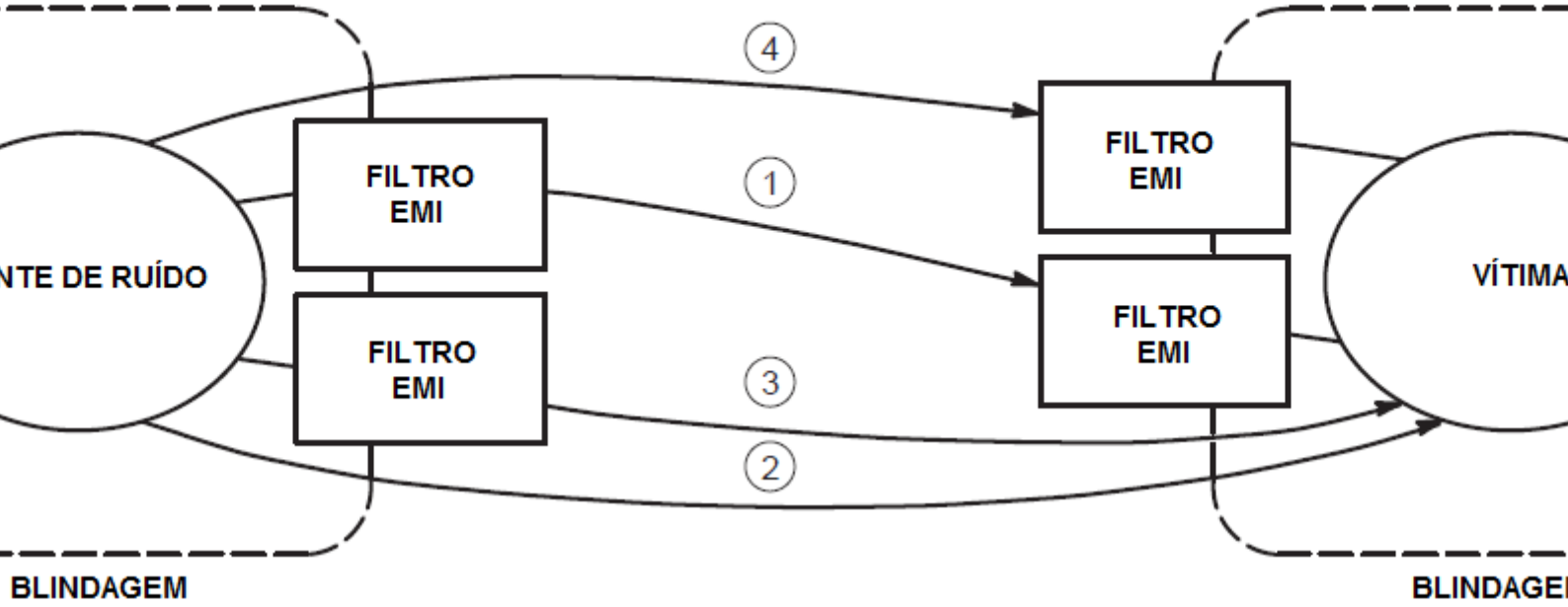
sobre aterramento.
Todo projeto de automação deve levar em conta os padrões para garantir níveis de sinais adequados, assim como, a segurança exigida pela aplicação. Vale lembrar que uma instalação adequada e dentro dos padrões é a base para o sucesso de um projeto com tecnologia digital.

Mitigação das questões de EMC:

- Reduzir os níveis de interferência gerada pelos pontos perturbadores(fontes de EMI)
- Aumentar a susceptibilidade (imunidade) da vítima
- Reduzir a eficácia de caminhos de acoplamentos e a combinação a seguir:

Fonte perturbadora(EMI)	Caminho de Acoplamento	Vítima
Alteração do roteamento de sinais	Aumente a separaçao	Alteração do roteamento de sinais
Adicione filtros locais	Blindagens	Adicione filtros locais
Seleção da frequência de operação	Reduza o número de interconexões	Seleção da frequência de operação
Sobreposição (Dithering) de frequências	Filtre interconexões	
Reduza o nível de sinal		

Tabela 4 – Medidas para mitigar a EMC



		Como minimizar o ruído	
		A	B
1	Condução	Filtro EMI	Filtro EMI
2	Radiação	Blindagem	Blindagem
3	Condução Radiação	Filtro EMI	Blindagem
4	Radiação Condução	Blindagem	Filtro EMI

Figura 72 – Como minimizar efeitos de EMI

Vejamos na tabela 5 como minimizar os problemas de acoplamento por impedância comum via aterramento:

Aterramento para EMC

Use sempre que posssível aterramento em um único ponto, especialmente em baixas frequências

Separa e isole os aterramentos para alimentações DC e AC, sinais analógicos e digitais, carcaça, etc.

Use dedicado retorno para sinais críticos

Use condutores de terra com grande seção transversal para minimizar o efeito de impedância

Não use múltiplos pontos e derivações de aterramento(daisy chain)

Tabela 5 – Aterramento para EMC

Recomenda-se que anualmente se tenha ações preventivas de manutenção, verificando cada conexão ao sistema de aterramento, onde deve-se assegurar a qualidade de cada conexão em relação à robustez, confiabilidade e baixa impedância (deve-se garantir que não haja contaminação e corrosão).

Além disso, em plantas com tecnologias digitais, tais como Profibus e Foundation fieldbus recomenda-se serviços de certificação de redes por profissionais capacitados, garantindo, além da conformidade com os padrões, vantagens como:

- aumento do desempenho e confiabilidade da rede;
- redução no tempo de comissionamento, *startups* e paradas;
- atuação preventiva e preditiva nas possíveis falhas em instalações e sinais de comunicação;
- aumento da segurança operacional com as melhorias sugeridas;
- elevação da performance operacional e redução dos custos globais de operação e manutenção, entre outros.

Sobre o autor

César Cassiolato é *Presidente e Diretor de Qualidade da Vivace Process Instruments. É também Conselheiro Administrativo da Associação PROFIBUS Brasil América Latina desde 2011, onde foi Presidente de 2006 a 2010, Diretor Técnico do Centro de Competência e Treinamento em PROFIBUS, Diretor do FDT Group no Brasil e Engenheiro Certificado na Tecnologia PROFIBUS e Instalações PROFIBUS pela Universidade de Manchester*

Referência Bibliográfica

· Artigos técnicos - César Cassiolato
· http://www.electrical-installation.org/wiki/Coupling_mechanisms_and_counter- measures
· EMI – Interferência Eletromagnética – César Cassiolato, Revista Petro&Química,2005.
· http://www.qemc.com.br/, artigos técnicos Roberto Menna Barreto
· National Application Notes 25: Field Wiring and Noise Considerations for Analog Signals - Syed Jaffar Shah
· Aterramento, Blindagem, Ruídos e dicas de instalação, César Cassiolato
· O uso de Canaletas Metálicas Minimizando as Correntes de Foucault em Instalações PROFIBUS, César Cassiolato
· Ruídos e Interferências em instalações PROFIBUS, César Cassiolato
· The Physical Basis of EMC – Eur Ing Armstrong
· Dicas de blindagem e aterramento em Automação Industrial – César Cassiolato, Revista Mecatrônica Atual; *Ano: 10; N° 53; Set / Out – 2011*
· EMI – Troubleshooting Techniques – Michael Mardiguian
· EMC for Product Designers - Tim Williams
· Electromagnetic Compatibility - Principles and Applications, David A. Weston
· Aterramento, blindagem, acoplamentos, ruídos, seus efeitos e como minimizá-los em instalações industriais", César Cassiolato, Revista Intech, Edição 145
· https://www.vivaceinstruments.com.br/
· Pesquisas na internet (Todas as ilustrações e marcas utilizadas aqui, assim como os produtos citados, pertencem aos seus respectivos proprietários, assim como qualquer outra forma de propriedade intelectual).

O conteúdo deste artigo foi elaborado e verificado cuidadosamente. Entretanto, erros não podem ser excluídos e assim, não se pode assegurar uma completa compatibilidade e nenhuma responsabilidade ou danos resultantes deles poderão ser atribuídos ao autor. Em caso de discrepância ou dúvida, os padrões, normas, perfis e guias técnicos prevalecem.

Alguns termos e logos aqui usados são marcas registradas e comercias de algumas organizações e empresas, e foram usados sem a pretensão de derivação.