

## 12. CARACTERIZAÇÃO DE FONTES CHAVEADAS

Apresentaremos aqui alguns aspectos que servem à caracterização do desempenho das fontes chaveadas, bem como outros temas relacionados com o enquadramento do equipamento dentro de normas internacionais de comportamento.

### 12.1 *Requisitos de qualidade na alimentação de equipamentos sensíveis*

Especialmente para os equipamentos de computação, são estabelecidos limites em termos da qualidade da energia a ele suprida. Não existem, ainda, padrões industriais reconhecidos, no entanto, graças à ação de grandes usuários (especialmente militares), a CBEMA (Computer Business Equipment Manufacturer's Association) adotou as curvas mostradas na figura 12.1. Estas curvas aparecem na norma IEEE 446 como "prática recomendada para sistemas de alimentação de emergência, em aplicações industriais e comerciais".

As curvas definem um envelope dentro do qual deve estar o valor eficaz da tensão suprida ao equipamento. Ou seja, quando os limites forem violados, o sistema de alimentação ininterrupta deve atuar, no sentido de manter a alimentação dentro de valores aceitáveis.

Em outras palavras, se a tensão de alimentação estiver dentro dos limites não deve ocorrer mal-funcionamentos do equipamento alimentado. Violações dos limites podem, então, provocar falhas, que devem ser evitadas.

Via de regra, quem suporta a alimentação do equipamento na ocorrência de falhas de curta duração são as capacitâncias das fontes de alimentação internas, de modo que, eventualmente, mesmo violações mais demoradas do que aquelas indicadas podem ser suportadas.

Nota-se na figura 12.1 que, em regime, a tensão deve estar limitada a uma sobretensão de 6% e uma subtensão de 13%. Quanto menor a perturbação, maior a alteração admitida, uma vez que os elementos armazenadores de energia internos ao equipamento devem ser capazes de absorvê-la. Assim, por exemplo, a tensão pode ir a zero por meio ciclo, ou ainda haver um surto de tensão com 3 vezes o valor nominal (eficaz), desde que com duração inferior a 100  $\mu$ s.

### 12.2 *Tempo de sustentação da tensão de saída (Hold-up)*

Este teste determina o intervalo de tempo no qual a saída é capaz de manter a corrente nominal de saída quando ocorre uma interrupção na alimentação.

Esta interrupção na alimentação do equipamento pode ter origem em manobras de equipamentos alimentados pela mesma rede, causando uma queda na tensão CA (ou CC) com duração maior que 1/2 ciclo (8,33 ms).

O desempenho esperado determina a energia a ser acumulada nos capacitores a serem utilizados na entrada e na saída do equipamento, o que pode levar a valores muito maiores do que os necessários para a operação em regime, ou seja, apenas para reduzir a ondulação de tensão advindo do chaveamento.

A figura 12.2 indica o procedimento de teste.

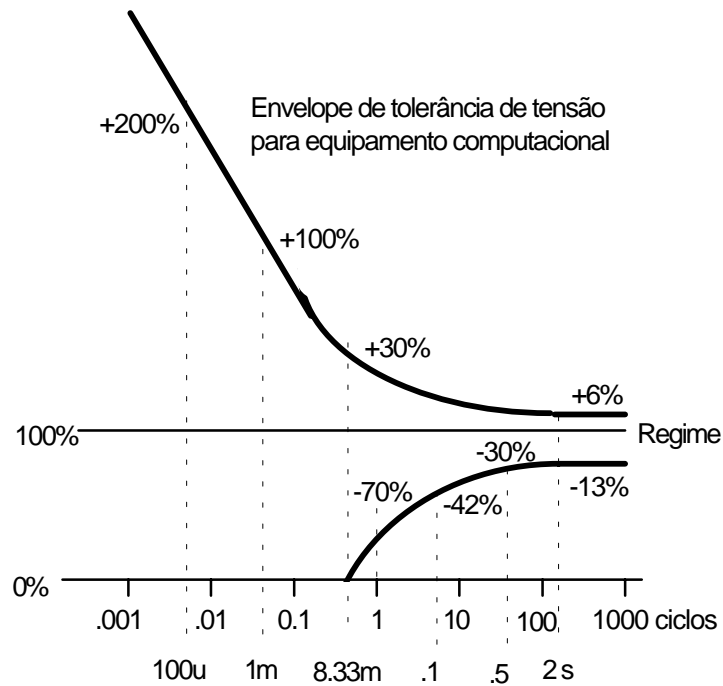


Figura 12.1 Envelope de tolerância de tensão típico para sistema computacional.

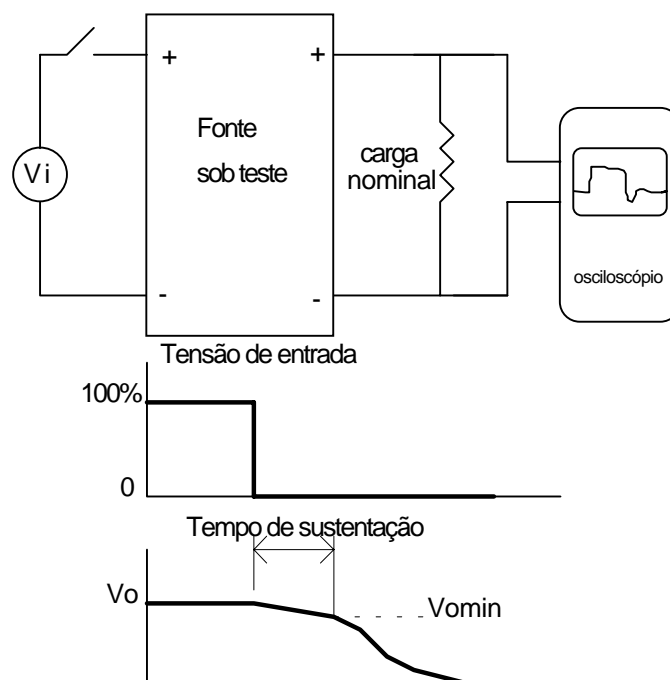


Figura 12.2 Teste para verificação do tempo de sustentação da tensão de saída.

### 12.3 Regulação de linha

O teste relativo à chamada regulação de linha mede a alteração na tensão de saída em resposta a uma mudança na tensão de entrada.

O teste se faz com a fonte operando à carga nominal, ou seja, todas as saídas devem estar fornecendo a corrente nominal. A tensão de saída é medida (0,1% de precisão mínima) em 3 situações de tensão de entrada: mínima, nominal e máxima. A figura 12.3 mostra o arranjo para medição. A regulação de linha, dada em porcentagem é:

$$\text{Regulação de Linha} = \frac{V_{o_{\max}} - V_{o_{\min}}}{V_{o_{\text{ideal}}}} \cdot 100 \quad (12.1)$$

onde  $V_{o_{\max}}$  e  $V_{o_{\min}}$  são medidas, respectivamente, à máxima e mínima tensão de entrada.

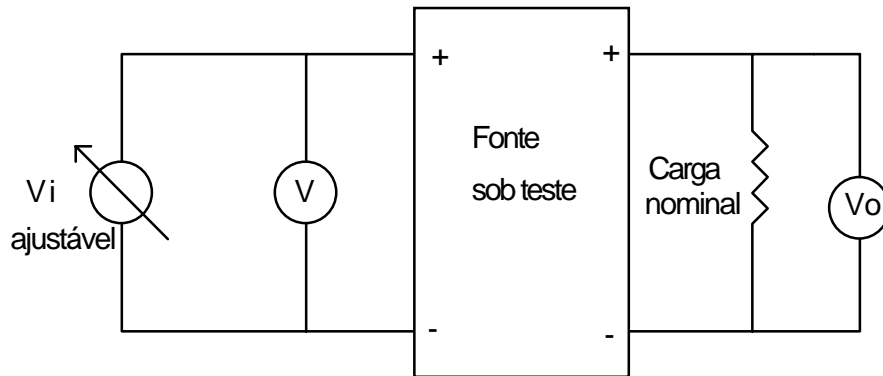


Figura 12.3 Teste de regulação de linha.

#### 12.4 Regulação de carga

Este teste mede a alteração na tensão de saída em resposta a uma mudança na corrente média de cada saída da fonte.

O teste é feito com tensão nominal na entrada. Cada saída é medida com 50% e com 100% da corrente nominal.

$$\text{Regulação de carga} = \frac{V_{o_{\max}} - V_{o_{\min}}}{V_{o_{\text{ideal}}}} \cdot 100 \quad (12.2)$$

onde  $V_{o_{\max}}$  e  $V_{o_{\min}}$  são medidas, respectivamente, a 50% e 100% da carga nominal.

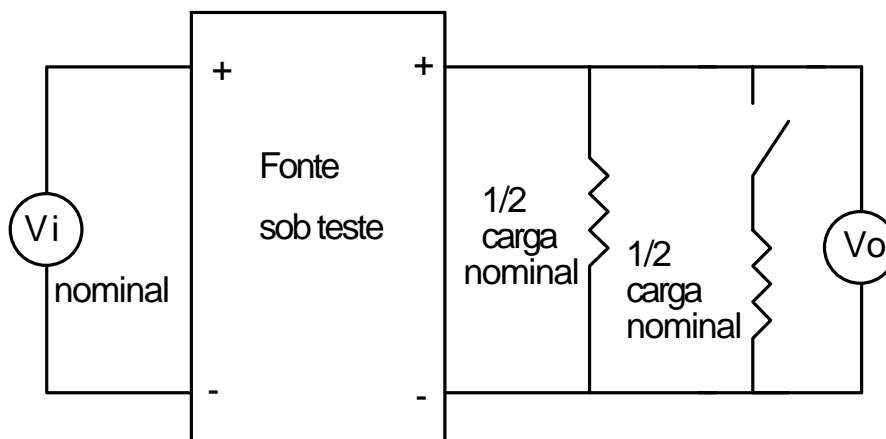


Figura 12.4 Teste de regulação de carga.

### 12.5 Resposta dinâmica à variação de carga

Embora este parâmetro não seja usualmente publicado, ele é uma informação interessante, especialmente para o projetista, uma vez que permite verificar o desempenho do sistema de controle utilizado.

É basicamente um teste para medir o tempo necessário para que a realimentação corrija a tensão de saída na ocorrência de uma variação em degrau na carga.

Este é um parâmetro que é pior nas fontes chaveadas do que nas lineares, dada a limitação (ao inverso da frequência de chaveamento) no mínimo tempo de resposta.

Em geral são necessários alguns ciclos para que ocorra a correção desejada. Isto ocorre principalmente por que o filtro de saída impede uma resposta rápida à mudança na carga, sendo necessário algum tempo para que todo o sistema atinja o novo ponto de operação e possa corrigir a saída.

Tempos muito longos podem indicar um ganho CC muito baixo e ainda uma frequência de corte muito reduzida. Quanto mais os parâmetros do compensador são ajustados para uma situação conservativa em termos de estabilidade, pior a resposta dinâmica.

A figura 12.5 mostra o arranjo para a realização do teste.

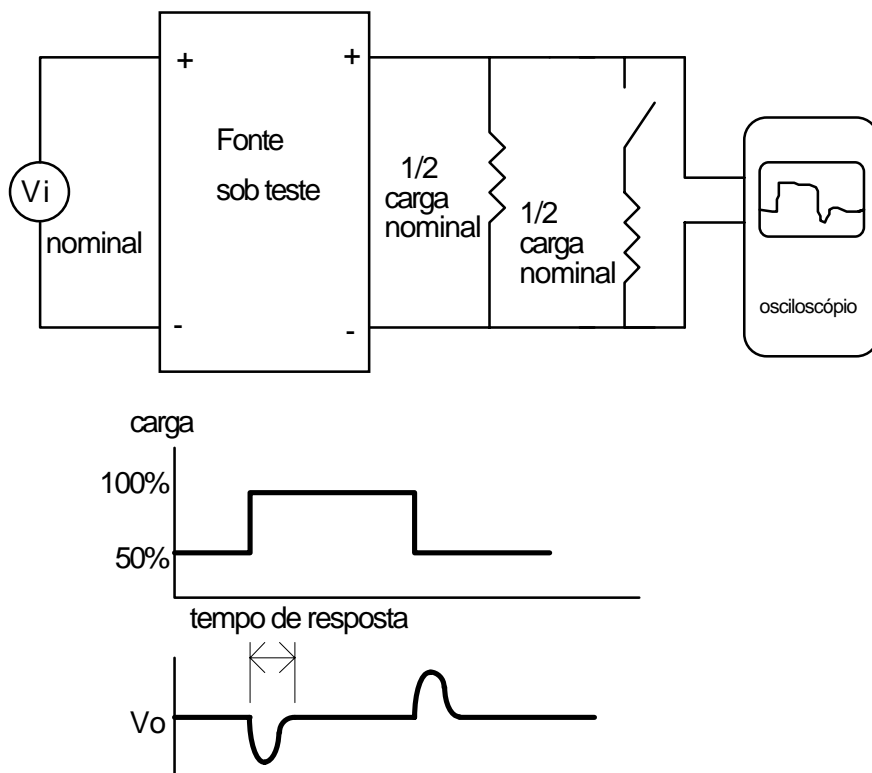


Figura 12.5 Teste de resposta dinâmica à variação de carga.

### 12.6 Teste de isolamento

Este teste verifica se a isolamento entre a entrada, chassis e saída(s) excede um valor de tensão mínima especificado. As tensões de teste são, tipicamente, CA (50 ou 60Hz), podendo ser substituídas por uma tensão CC com um valor equivalente ao pico da tensão CA.

O propósito do teste é assegurar que não exista possibilidade de que tensões potencialmente letais advindas da rede ou do próprio equipamento atinjam o usuário final do produto.

As áreas críticas para este teste são as isolações do transformador de potência, o espaçamento entre as trilhas da placa de circuito impresso e a isolamento para o chassis.

A falha é detectada caso ocorra uma corrente acima da especificada durante a aplicação da tensão ao equipamento.

Alguns cuidados devem ser tomados durante a verificação da isolamento, com o intuito de não danificar os componentes do equipamento. Por exemplo, os fios de entrada devem ser curto-circuitados, bem como os de saída. O uso de tensão CC é mais conveniente por não permitir a ocorrência de fugas pelo transformador (acoplamento capacitivo), o que poderia danificar algum componente. A figura 12.6 mostra o teste com tensão aplicada entre entrada e saída, enquanto na figura 12.7 tem-se o teste entre entrada e chassis. Realiza-se também o teste entre chassis e saída.

Os componentes colocados entre os terminais de entrada ou de saída e o chassis devem suportar uma tensão maior que a tensão de teste. Tais componentes são basicamente os capacitores do filtro de IEM. Também aqui deve ser usada uma tensão CC.

A tensão de teste deve ser rampeada em um tempo sempre superior a 2 segundos, de modo a evitar a indução de tensões elevadas no circuito.

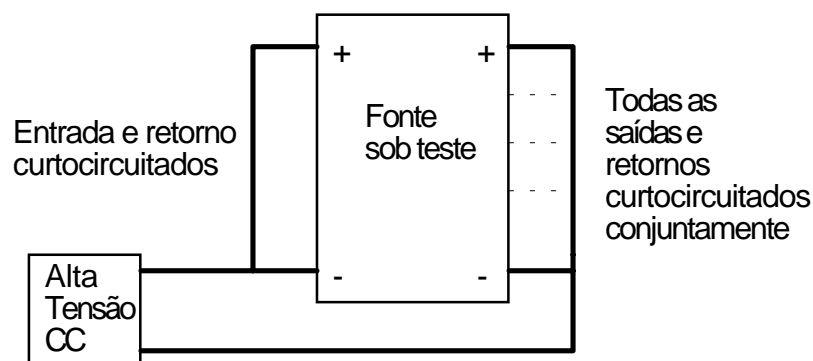


Figura 12.6 Teste de alta tensão entre entrada e saída.

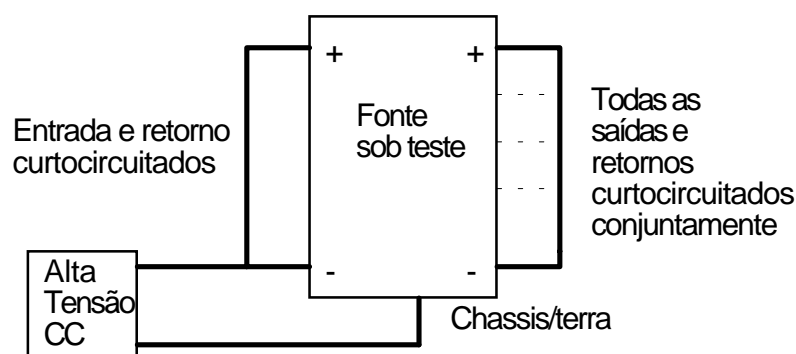


Figura 12.7 Teste de alta tensão entre entrada e carcaça.

## 12.7 Interferência Eletromagnética (IEM)

Dois tipos de interferência devem ser consideradas: a conduzida pela rede de alimentação e a irradiada.

Diferentes normas, nacionais (VDE - Alemanha, FCC - EUA) e internacionais (CISPR - IEC), determinam os valores limites admissíveis para o ruído eletromagnético produzido pelo equipamento. No Brasil, a adoção de normas específicas sobre este assunto está em discussão, seguindo-se, em princípio, as normas IEC-CISPR [12-1] a [12-4].

Estas normas, além dos limites de sinal irradiado ou conduzido, determinam os métodos de medida, os equipamentos de teste e classificam os produtos a serem testados em função de suas características próprias e do local onde devem ser utilizados (CISPR 16). Via de regra, as fontes chaveadas são elementos internos aos equipamentos, devendo-se utilizar os limites e procedimentos explicitados para tal equipamento.

Os limites mais severos referem-se a produtos utilizados em ambientes "doméstico" (classe B), o que significa, que são alimentados por uma rede na qual existem usuários que não são indústrias ou estabelecimentos comerciais. Ambientes industriais e comerciais tem seus equipamentos incluídos na chamada classe A.

No que se refere à IEM conduzida, equipamentos de informática possuem suas normas (CISPR 22), enquanto os aparelhos de uso industrial, científico e médico (ISM), são regulados pela CISPR 11. Aparelhos eletrodomésticos são controlados pela CISPR 14.

De modo simplificado, os testes de IEM irradiada devem ser feitos em ambientes anecóicos, quer seja um campo aberto ou uma câmara especial. Já as medidas de IEM conduzida fazem uso de uma impedância artificial de linha, sobre a qual se realiza a medida dos sinais de alta frequência injetados pelo equipamento.

### 12.7.1 IEM irradiada

As medidas de IEM irradiada são feitas, tipicamente, para frequências de 30MHz a 1GHz. As normas VDE estabelecem também limites para a faixa entre 10kHz e 30MHz. Tal procedimento, no entanto, não é adotado pelas normas CISPR nem pela maioria das normas nacionais, que definem apenas a faixa de frequências mais elevadas.

Os equipamentos ISM são divididos em grupos. No grupo 1 tem-se aqueles nos quais existe energia em rádio-frequência intencionalmente gerada e/ou condutivamente acoplada, a qual é necessária para o funcionamento interno do equipamento. No grupo 2 tem-se aqueles nos quais existe energia em rádio-frequência intencionalmente gerada e/ou usada em forma de radiação eletromagnética para o tratamento de materiais ou eletro-erosão.

O perfil relativo aos limites da classe A é determinado pela divisão do espectro, em função da sua ocupação pelo sistema de comunicação. Quando houver uma faixa de uso comercial, aí o limite deve ser mais baixo. Por esta razão, este perfil pode ser diferente em cada país, adaptando-se à utilização real do espectro.

A captação dos campos elétrico e magnético emitidos pelo equipamento é feita por meio de antenas localizadas em posições normatizadas.

A figura 12.8 mostra os limites da norma CISPR 11 (equipamento ISM) para classe B. Os limites entre 150 kHz e 30 MHz estão sob consideração.

A origem do ruído irradiado está na presença de componentes de alta frequência presentes nas tensões e correntes da fonte (ou mesmo de outros subsistemas do equipamento). Tais componentes, associados a elementos parasitas (indutâncias e capacitâncias), podem produzir fenômenos de ressonância que potencializam os efeitos de tal ruído. Para frequências elevadas, os condutores nos quais circulam as correntes, ou os terminais nos quais se tem tensão, atuam como antenas, irradiando para o ambiente.

Do ponto de vista do projeto da fonte, não existe uma sistemática explícita para minimizar tais problemas, pode-se, no entanto, tomar algumas precauções que visam evitar o agravamento da situação.

Todos os caminhos nos quais circula corrente elevada devem ter o menor comprimento possível, o que implica na proximidade física entre os componentes de potência. Os elevados  $dv/dt$  e  $di/dt$  advindos do chaveamento devem ser minimizadas por meio de supressores e amaciadores.

Normalmente as fontes são colocadas dentro de caixas metálicas, as quais confinam os campos magnéticos produzidos (baseando-se na teoria da esfera Gaussiana). A blindagem deve envolver todo o circuito que produz interferência, formando um "curto-circuito" em torno a ele. Qualquer junção na blindagem deve ter uma resistência de contato muito baixa, sob o risco de se perder sua eficácia.

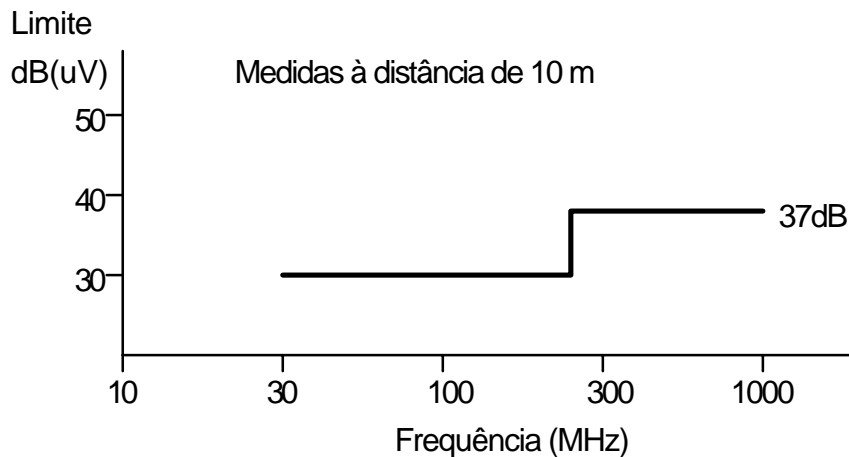


Figura 12.8 Limites de IEM irradiada para equipamento ISM, grupo 1, classe B

### 12.7.2 IEM conduzida pela rede

A principal motivação para que se exija um limitante para a IEM que um equipamento injeta na rede é evitar que tal interferência afete o funcionamento de outros aparelhos que estejam sendo alimentados pela mesma rede. Esta susceptibilidade dos aparelhos aos ruídos presentes na alimentação não está sujeita a normatização, embora cada fabricante procure atingir níveis de baixa susceptibilidade.

A medição deste tipo de interferência é feita através de uma impedância (LISN - Line Impedance Stabilization Network) colocada entre a rede e o equipamento sob teste, cujo esquema está mostrado na figura 12.9. A indutância em série evita que os ruídos produzidos pelo equipamento fluam para a rede, sendo direcionados para a resistência de  $1k\Omega$ , sobre a qual é feita a medição (com um analisador de espectro com impedância de entrada de  $50\Omega$ ). Os eventuais ruídos presentes na linha são desviados pelo capacitor de  $1\mu F$ , não afetando a medição.

Esta impedância de linha pode ser utilizada na faixa entre 150kHz e 30MHz, que é a banda normatizada pela CISPR. A faixa entre 10kHz e 150kHz é definida apenas pela VDE, estando em estudo por outras agências. Nesta faixa inferior, a LISN é implementada com outros componentes, como mostrado na mesma figura 12.9.

Também são feitas as distinções quanto à aplicação e ao local de instalação do equipamento. A figura 12.10 mostra estes limites para a norma CISPR 11 (equipamentos ISM). O ambiente de medida é composto basicamente por um plano terra sobre o qual é colocada a LISN. Acima deste plano, e isolado dele, coloca-se o equipamento a ser testado.

As elevadas taxas de variação de tensão presentes numa fonte chaveada e correntes pulsadas presentes em estágios de entrada (como nos conversores para correção de fator de potência) são os principais responsáveis pela existência de IEM conduzida pela rede.

No caso das correntes pulsadas, esta razão é óbvia, uma vez que a corrente presente na entrada do conversor está sendo chaveada em alta frequência, tendo suas harmônicas dentro da faixa de verificação de IEM conduzida.

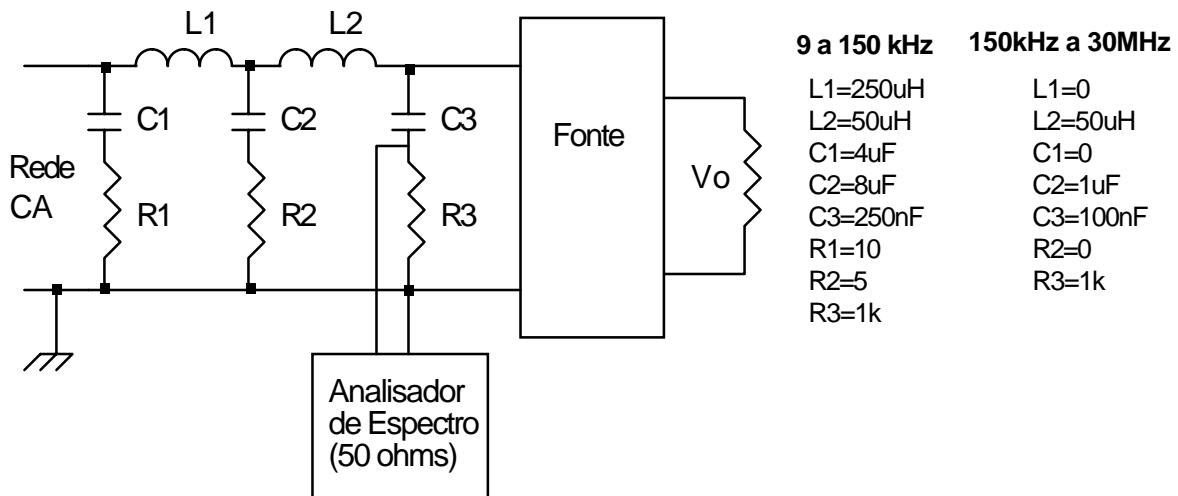


Figura 12.9 Impedância de linha normalizada (LISN).

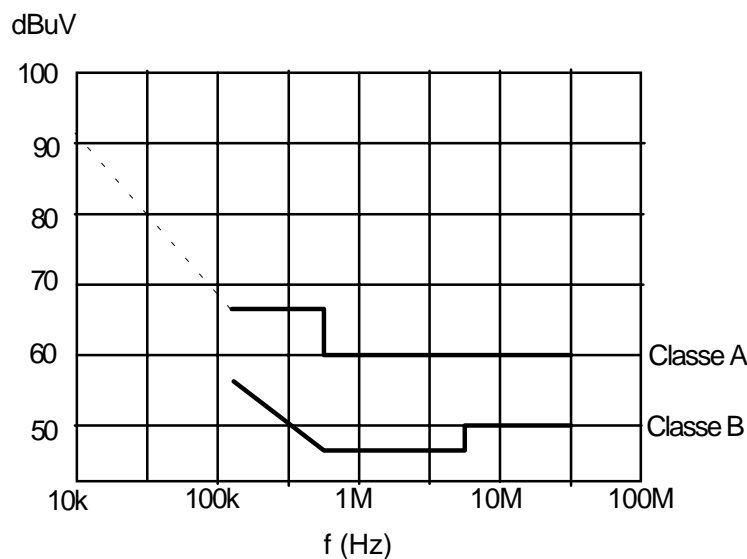


Figura 12.10 Limites de IEM conduzida pela norma CISPR 11 (equipamentos de uso Industrial, Científico e Médico - ISM)

A redução dos níveis de IEM conduzida pode ser obtida com o uso de filtros de linha [12.6]. Seu objetivo é criar um caminho de baixa impedância de modo que as componentes de corrente em alta frequência circulem por tais caminhos, e não pela linha. Devem-se considerar 2 tipos de corrente: a simétrica e a assimétrica.

No caso de correntes simétricas (ou de modo diferencial), sua existência na linha de alimentação se deve ao próprio chaveamento da fonte. A figura 12.11 mostra esta situação. A redução da circulação pela linha pode ser obtida pelo uso de um filtro de segunda ordem, com a capacitância oferecendo um caminho de baixa impedância para a componente de corrente que se deseja atenuar. Os indutores criam uma oposição à fuga da corrente para a rede. Em 60Hz a queda sobre tais indutâncias deve ser mínima.



Já para as correntes assimétricas (ou de modo comum), como sua principal origem está no acoplamento capacitivo do transistor com o terra, a redução se faz também com um filtro de segunda ordem. No entanto, o elemento indutivo deve ser do tipo acoplado e com polaridade adequada de enrolamentos, de modo que represente uma impedância elevada para correntes assimétricas, mas não implique em nenhuma impedância para a corrente simétrica. Os capacitores fornecem o caminho alternativo para a passagem de tal componente de corrente.

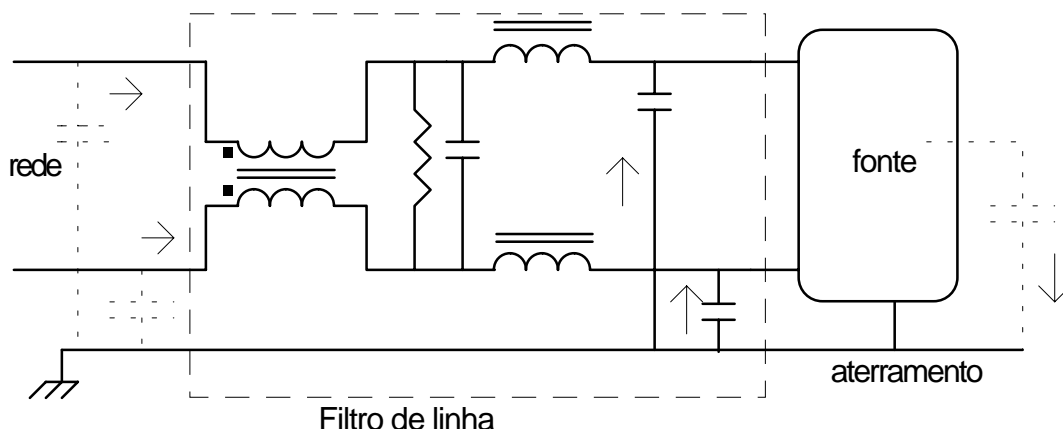


Figura 12.11 Circuito típico com filtro de linha.

### 12.8 Referências Bibliográficas:

- [12.1] "CISPR specification for radio interference measuring apparatus and measurement methods". International Electrotechnical Commission, International Special Committee on Radio Interference, CISPR 16, second edition, 1987.
- [12.2] "Limits and methods of measurement of electromagnetic disturbance characteristics of industrial, scientific and medical (ISM) radio-frequency equipment". International Electrotechnical Commission, International Special Committee on Radio Interference, CISPR 11, second edition, 1990.
- [12.3] "Limits and methods of measurement of radio disturbance characteristics of electrical lighting and similar equipment". International Electrotechnical Commission, International Special Committee on Radio Interference, CISPR 15, fourth edition, 1992.
- [12.4] "Limits and methods of measurement of radio disturbance characteristics of electrical motor-operated and thermal appliances for household and similar purposes, electric tools and electrical apparatus". International Electrotechnical Commission, International Special Committee on Radio Interference, CISPR 14, third edition, 1993.
- [12.5] Barbi, Ivo: "Curso de fontes chaveadas", Florianópolis, 1987.
- [12.6] Nave, Mark J.: "Power Line Filter Design for Switched-Mode Power Supplies". Van Nostrand Reinhold, New York, 1991.