Guia de Aplicação de Qualidade de Energia

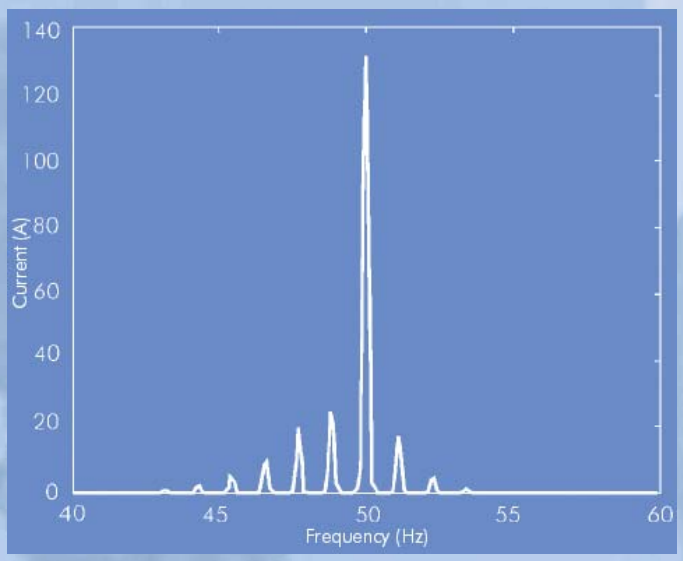
Education and Culture

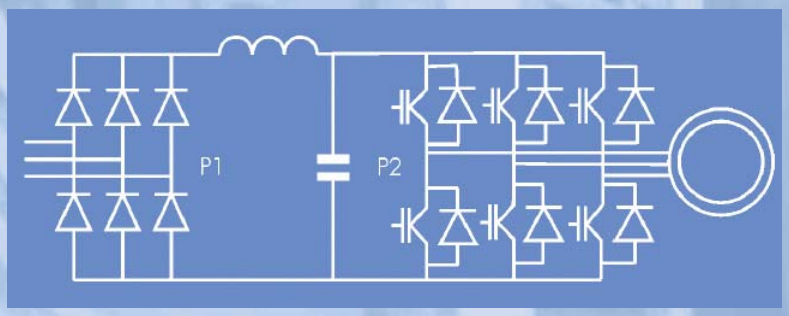
Leonardo da Vinci

Harmônicas

Inter-harmônicas

3.1.1





PRO COBRE Connects Life.™

european COPPER institute

Harmônicas

Harmônicas

Inter-harmônicas

Zbigniew Hanzelka & Andrzej Bien
AGH University of Science and Technology
Julho de 2004

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

European Copper Institute (ECI)

O European Copper Institute (ECI) (Instituto de Cobre Europeu) é uma joint venture entre o ICA (International Copper Association) e os fabricantes europeus. O ECI representa os maiores produtores de cobre do mundo e os fabricantes europeus mais importantes para promover o cobre na Europa. Criado em janeiro de1996, o ECI é apoiado por uma rede de onze Associações de Desenvolvimento do Cobre (‘CDAs‘) em Benelux, França, Alemanha, Grécia, Hungria, Itália, Polônia, Rússia, Escandinávia, Espanha e Reino Unido.

Instituto Brasileiro do Cobre - PROCOBRE

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

Aviso de Isenção de Responsabilidades

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

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

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

Inter-harmônicas

Introdução

Harmônicas são tensões ou correntes com uma freqüência que é um múltiplo inteiro da freqüência fundamental da alimentação. Inter-harmônicas são tensões ou correntes com uma freqüência que não é um múltiplo inteiro da freqüência fundamental da alimentação. O conhecimento das perturbações eletromagnéticas associadas às inter-harmônicas ainda está em desenvolvimento e atualmente há muito interesse neste fenômeno. As inter-harmônicas, sempre presentes no sistema de potência, ganharam importância mais recentemente uma vez que o uso generalizado de sistemas eletrônicos de potência resulta em um aumento de sua intensidade.

Definições

Harmônicas e inter-harmônicas de uma forma de onda analisada são definidas em termos de componentes espectrais em um estado quase estacionário numa faixa definida de freqüências. A Tabela 1 provê suas definições matemáticas.

O termo "subharmônica" não tem qualquer definição oficial - é um caso particular de inter-harmônica de uma freqüência menor do que a freqüência fundamental. Porém, o termo tem aparecido em numerosas referências e é em geral utilizado na comunidade profissional.

Harmônica	$f = nf_1$	onde n é um inteiro maior do que zero
Componente CC	$f = nf_1$	para $n = 0$
Inter-harmônica	$f = nf_1$	onde n é um inteiro maior do que zero
Subharmônica	$f > 0$ Hz e $f < f_1$	
f_1 = freqüência fundamental da tensão (harmônica base)		

Tabela 1 – Componentes espectrais de formas de onda (de freqüência f).

A norma IEC 61000-2-1 define inter-harmônicas como segue:

Entre as harmônicas da tensão e corrente na freqüência de alimentação, outras freqüências adicionais podem ser observadas, as quais não são múltiplas inteiras da fundamental. Eles podem aparecer como freqüências discretas ou como um espectro de larga faixa.

Com a finalidade de considerações adicionais, aplicam-se as definições detalhadas a seguir:

Freqüência Inter-harmônica

Qualquer freqüência que é um múltiplo não inteiro da freqüência fundamental. Por analogia com a ordem de uma harmônica, a ordem de uma inter-harmônica é determinada pela relação entre a freqüência da inter-harmônica e a freqüência fundamental. Se este valor é menor do que a unidade, a freqüência também é chamada de subharmônica. De acordo com a recomendação da IEC, a ordem da inter-harmônica é designada pela letra "m" (de acordo com a IEC 61000-2-2).

Inter-harmônica de tensão (semelhantemente para corrente)

Uma tensão senoidal com uma freqüência entre as harmônicas, ou seja, uma freqüência que não é um inteiro da freqüência da componente fundamental.

Fontes

Há dois mecanismos básicos para a geração de inter-harmônicas.

O primeiro é a geração de componentes em torno da freqüência fundamental da tensão de alimentação e suas harmônicas como resultado de variações na sua intensidade e/ou ângulos de fase. Isto é causado por rápidas variações de corrente nos equipamentos e nas instalações, que também podem ser uma fonte de flutuações de tensão.

Perturbações são geradas por cargas que operam em um estado transitório, continuamente ou temporariamente, ou, em muitos outros casos, quando acontece uma modulação de intensidade de correntes e tensões. Estas perturbações são de natureza fortemente randômica, e dependem de variações de carga inerentes aos usos dos processos e equipamentos.

O segundo mecanismo é o chaveamento assíncrono (ou seja, não sincronizado com a freqüência do sistema de potência) de dispositivos semicondutores em conversores estáticos. Exemplos típicos são os conversores de freqüência e conversores moduladores de largura de pulso (PWM). Inter-harmônicas geradas por eles podem ser localizadas em qualquer lugar no espectro em relação as tensões harmônicas do sistema de alimentação.

Em muitos tipos de equipamentos acontecem ambos mecanismos ao mesmo tempo.

Inter-harmônicas podem ser geradas em qualquer nível de tensão e podem ser transferidas entre níveis, ou seja, inter-harmônicas geradas em sistemas de alta tensão e média tensão podem ser injetadas em sistemas de baixa tensão e vice-versa.

Suas intensidades raramente excedem 0,5% da intensidade da tensão fundamental harmônica, embora níveis mais altos podem acontecer sob condições de ressonância.

As fontes básicas desta perturbação incluem:

- Cargas que utilizam arco elétrico;
- Acionadores elétricos de carga variável;
- Conversores estáticos, em particular conversores de freqüência diretos e indiretos;
- Controles de ondulação.

As inter-harmônicas também podem ser causadas por oscilações que acontecem em, por exemplo, sistemas que incluem capacitores em série ou paralelo ou onde transformadores estão sujeitos à saturação e durante processo de chaveamento.

A tensão do sistema de potência contém um ruído de fundo Gaussiano com um espectro contínuo. Níveis típicos desta perturbação estão na faixa de (IEC 1000-2-1):

- 40-50 mV (aproximadamente 0.02% U_N) quando medido com um filtro passa-faixa de 10 Hz;
- 20-25 mV (aproximadamente 0.01% U_N) quando medido com um filtro passa-faixa de 3 Hz.

onde a U_N é a tensão nominal (230 V).

Cargas que utilizam arco elétrico

Este grupo inclui fornos a arco e máquinas de solda. Fornos a arco não produzem normalmente inter-harmônicas significativas, exceto quando ocorre uma amplificação devido a condições de ressonância. A operação transitória, sendo uma fonte de inter-harmônicas, acontece intensivamente durante a fase inicial de fusão (Figura 1).

Máquinas de solda geram um espectro contínuo associado a um processo específico. A duração das operações de soldagem varia de um a mais de dez segundos, dependendo do tipo de máquina de solda.

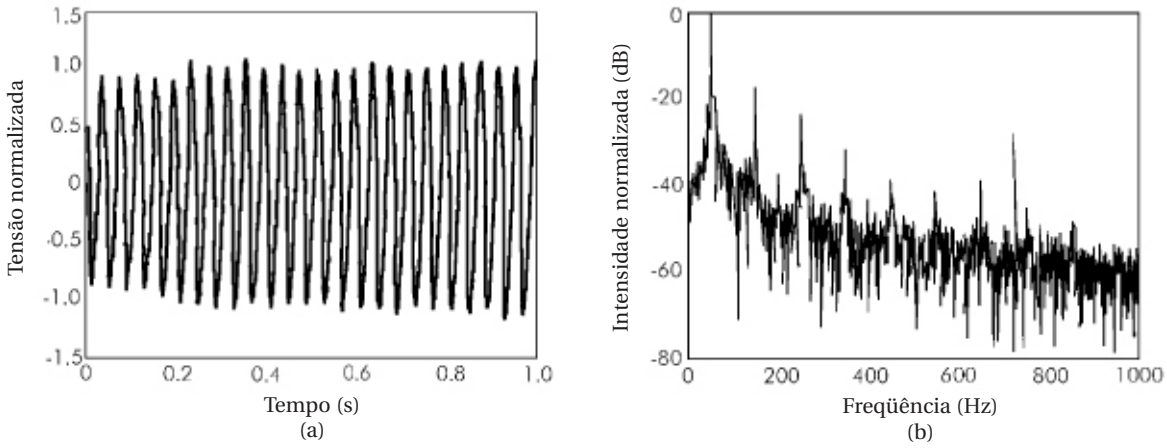


Figura 1 - Cintilamento de tensão típico em um forno a arco medido no secundário do transformador de alimentação.
(a) flutuação de tensão;
(b) espectro mostrando harmônicas (linhas maiores) e inter-harmônicas [1].

Motores elétricos

Motores de indução podem ser fontes de inter-harmônicas por causa das ranhuras no ferro do estator e do rotor, particularmente em combinação com a saturação do circuito magnético (denominadas "harmônicas de ranhura"). Na velocidade nominal do motor, as freqüências dos componentes que causam perturbações normalmente estão na faixa de 500 Hz a 2000 Hz, mas, durante o período de partida, podem se expandir significativamente. Assimetrias naturais do motor (desalinhamento do rotor, etc.) também podem ser fontes de inter-harmônicas (ver Figura 2).

Motores com cargas de torque variável, ou seja, acionadores de forjas, martelos de forja, máquinas de estampagem, serras, compressores, bombas de recalque, etc, também pode ser fontes de subharmônicas. O efeito de cargas variáveis é também visto em acionadores de velocidade variável alimentados por conversores estáticos.

Em usinas eólicas, o efeito da variação de torque no acionamento da turbina, resultado, por exemplo, do "efeito de sombra" da torre, pode modular a componente de tensão fundamental e, conseqüentemente, tornar-se a fonte indesejável de componentes de baixa freqüência.

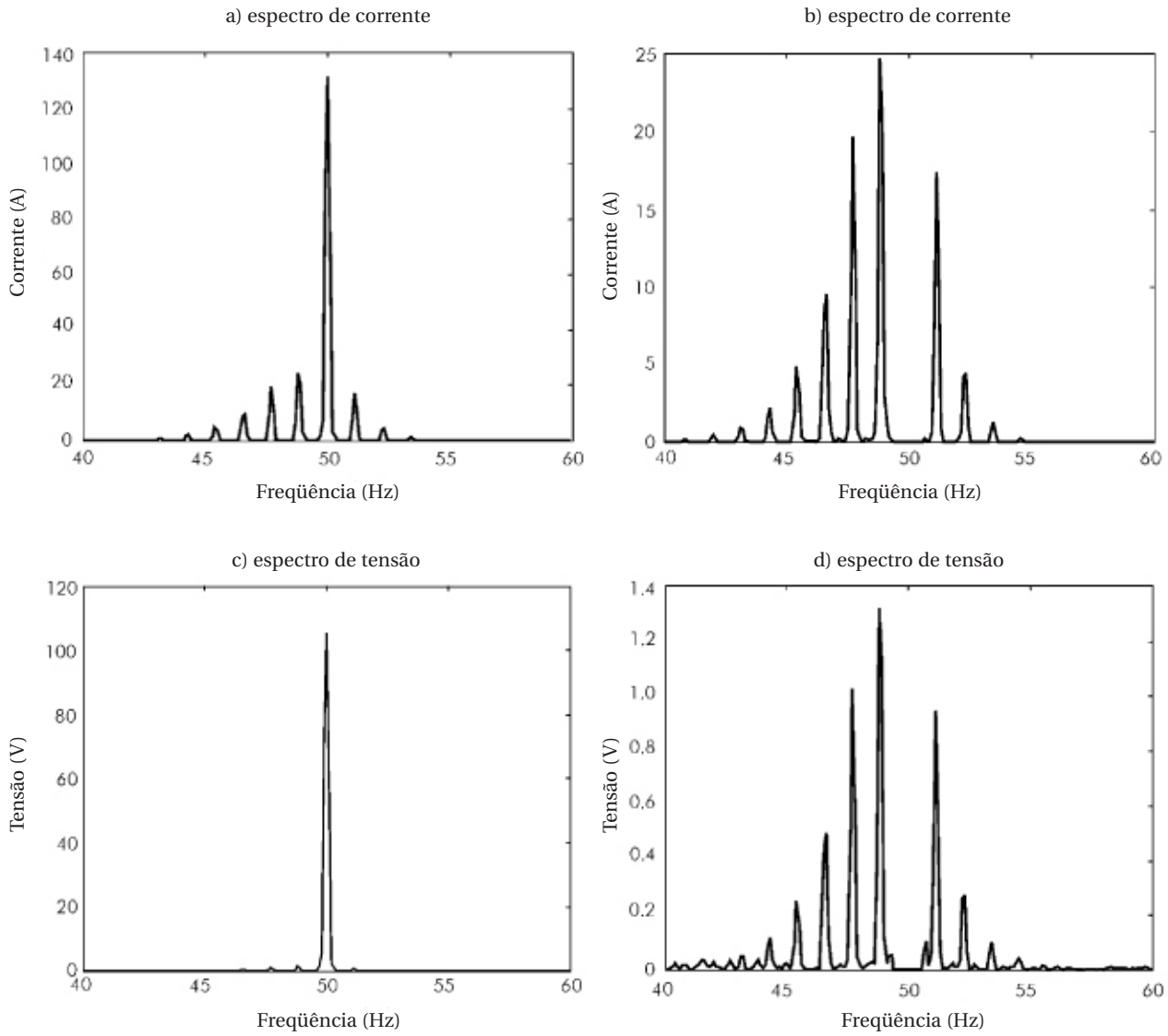


Figura 2 - Resultados da análise espectral da corrente de fase e tensão nos terminais do motor.
a), c) - espectros completos dos sinais;
b), d) - espectros com a componente de freqüência fundamental eliminada.

Conversores de freqüência estáticos indiretos

Os conversores de freqüência indiretos contêm um circuito em corrente contínua (CC) num conversor de entrada no lado da rede de alimentação e um conversor de saída (normalmente operando como um inversor) no lado da carga. Tanto em relação à corrente ou à tensão, o circuito em CC contém um filtro que desacopla os sistemas de corrente ou a tensão da alimentação e da carga. Por esta razão, as duas freqüências fundamentais (da alimentação e da carga) são mutuamente desacopladas. Mas um filtro ideal não existe, e sempre existe um certo grau de acoplamento. Em conseqüência, componentes de correntes associadas à carga estão presentes no lado CC, e componentes deste lado estão presentes no lado de alimentação. Estes componentes são subharmônicas e inter-harmônica em relação à freqüência do sistema de potência.

Inversores comutados pela corrente da carga

Devido à técnica de chaveamento por dispositivos semicondutores, estes equipamentos são classificados como conversores de freqüência indiretamente comutados pela linha. Um conversor de freqüência consiste de duas pontes trifásicas *P1* e *P2* e um circuito CC com reator (de indutância L_d - Figura 3).
Uma das pontes opera no modo de retificador e a outra no modo de inverso, embora suas funções possam ser intercambiáveis.

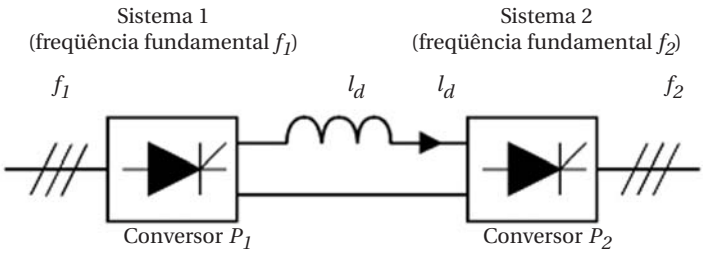


Figura 3 - Conversor de freqüência indireto com um inversor comutado pela carga.

A presença de duas pontes retificadoras alimentadas por dois sistemas de freqüências diferentes resulta que a corrente no lado CC é modulada por duas freqüências - f_1 e f_2. Cada conversor irá impor componentes não característicos no lado CC, que aparecerão como harmônicas não características no lado CA, ambos na carga e no sistema de alimentação.

Componentes no lado CC:

do sistema 1: $f_{d1} = p_1\, k\, f_1$ [k = 0, 1, 2,...]

do sistema 2: $f_{d2} = p_2\, n\, f_2$ [n = 0, 1, 2,...]

onde:

p_1, p_2 = número do pulso, respectivamente dos conversores *P1* e *P2*;

f_1 = freqüência fundamental do sistema 1 (rede de alimentação) [Hz];

f_2 = freqüência fundamental do sistema 2 (carga) [Hz].

A operação de conversor *P1* causará harmônicas de correntes características na rede de alimentação, com as seguintes freqüências:

$f_{hh,char} = (p_1\, k \pm 1)\, f_1$ [k = 1, 2,...]

Além disso, existirão componentes associadas com as componentes do lado CC geradas por *P2*.

Um conjunto completo de freqüências das componentes de corrente da rede de alimentação poderia ser expresso em uma forma geral por:

freqüências da corrente da rede de alimentação (sistema 1) = $(k_{p1} \pm 1)\, f_1 \pm p_2\, n\, f_2$

onde:

$k = 0, 1, 2,...$ e $n = 0, 1, 2,....$

Assumindo $n = 0$, para $k = 0, 1, 2,...$ obtemos ordens de harmônicas características para uma determinada configuração do conversor *P1*. As componentes determinadas para k = constante e $n \neq 0$, são bandas adjacentes às freqüências características do inversor. Assim, cada harmônica característica, por exemplo, para uma ponte de seis pulsos, de ordem $n_1 = 1, 5, 7,...$ tem suas próprias bandas laterais, como mostrado ilustrativamente para a 5ª harmônica na Figura 4.

O primeiro par de inter-harmônicas acontece na vizinhança da componente fundamental, ou seja, com freqüências $f_1 \pm p_2 f_2$, têm a maior intensidade. A indutância do reator no lado CC tem influência significativa no nível de inter-harmônicas.

Inversores de fonte de tensão

Para conversores de fonte de tensão (Figura 5) as harmônicas caracte-rísticas do conversor *P1* são predominantes. Bandas adjacentes, com freqüências determinadas pelo número de pulsos do conversor *P2*, ocorrem ao redor das freqüências características de *P1*, ou seja:

$$(K_{p1} \pm 1) f_1 \pm n\, p_2 f_2$$

para $k = 0, 1, 2, 3, ...$ $n = 0, 1, 2,...$ Na maioria dos casos, as harmônicas não características são um uma parcela muito pequena da corrente de alimentação.

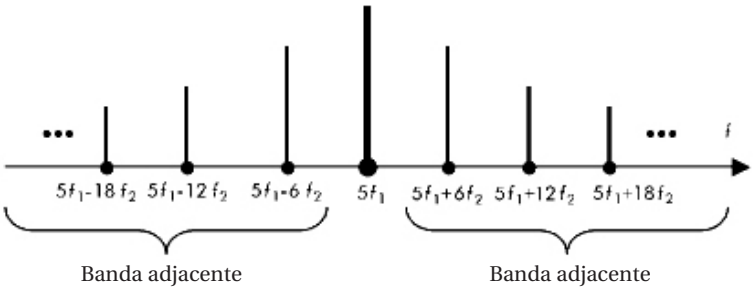


Figura 4 - Bandas adjacentes à 5ª harmônica característica dos conversores de seis pulsos P1 e P2.

A determinação numérica dos valores das harmônicas e inter-harmônicas de corrente requer uma análise precisa de um conversor de freqüência específico, incluindo a carga, ou deve ser obtida a partir de informações do fabricante.

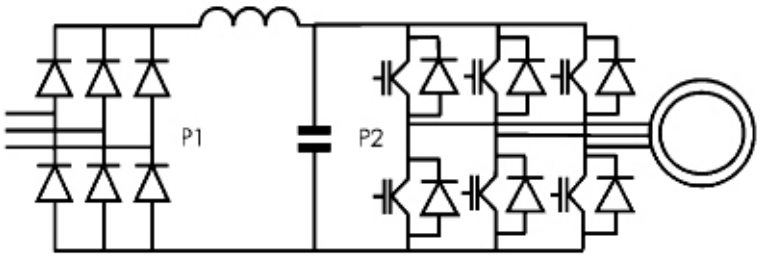


Figura 5 - Diagrama esquemático de um conversor de freqüências.

Alguns conversores incluem um retificador ativo na entrada que opera na freqüência de chavea-mento, que não é uma múltipla inteira da freqüência de linha. Esta freqüência pode ser constante ou variável, dependendo do projeto do controle do conversor.

Os conversores de freqüência com fonte de tensão com um retificador de entrada modulado PWM emitem componentes de corrente na freqüência de chaveamento do dispositivo semicondutor e suas harmônicas que não estão sincronizadas com a freqüência de linha. Normalmente, elas estão numa faixa de várias centenas de Hertz até várias dezenas de kHz.

Chave tiristorizada com controle de ciclo completo

Este tipo de controle permite que um ciclo completo de corrente flua por uma chave semicondutora. Assim a corrente não é distorcida como resultado do controle - ou é senoidal (para uma carga linear) ou é zero.

A Figura 6 mostra um exemplo de chaves semicondutoras controladas em uma configuração trifásica. O chaveamento de uma carga trifásica na passagem das tensões de fase pelo zero resulta em um fluxo de corrente no condutor neutro em sistema a quatro fios. No caso de um chaveamento simultâneo nas fases e uma carga resistiva, não há nenhuma circulação de corrente no condutor neutro (Figura 6), mas, no caso de uma carga indutiva, ocorrem transientes associados com os processos de chaveamento.

A análise de uma configuração como a indicada na Figura 7a (com condutor neutro) pode ser restrita a um circuito monofásico (Figura 7b). Uma carga resistiva monofásica, como acontece na maioria das aplicações práticas usuais, será considerada mais adiante.

Um ciclo de controle completo inclui *N-ciclos* de condução dentro de um número inteiro de ciclos *M* (Figura 8). A potência média fornecida a uma carga é controlada por meio do controle do valor da relação *N/M*. Como base para uma análise de Fourier, o período da forma de onda da corrente deveria ser assumido repetidamente como Mf_1^{-1}, onde f_1 é a freqüência da tensão de alimentação e *M* é o número de ciclos.

O primeiro componente é a inter-harmônica na freqüência $(1/M)f_1$, que é a menor componente de freqüência da corrente. No exemplo da Figura 8, onde $N = 2$, $M = 3$, o valor desta subharmônica é um terço da freqüência da tensão de alimentação. Freqüências de outros componentes são múltiplas deste valor.

Este tipo de controle é uma fonte de subharmônicas e inter-harmônicas, mas não é uma fonte de harmônicas maiores que a componente fundamental. Quando $N = 2$, $M = 3$, como na Figura 8, as intensidades das harmônicas são zero para $n = 6$, 9, 12... O espectro da corrente para este caso é mostrado na Figura 9. Como visto na figura, os componentes principais são harmônicas da freqüência da tensão de alimentação e subharmônica da freqüência *(2f)/3*. Intensidades de harmônicas são iguais a zero.

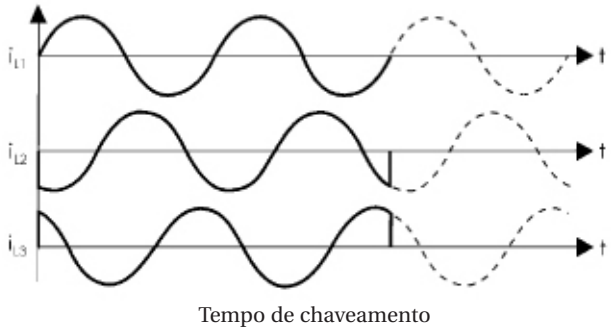


Figura 6 - Formas de ondas das correntes na configuração trifásica com condutor neutro para controle do ciclo completo.

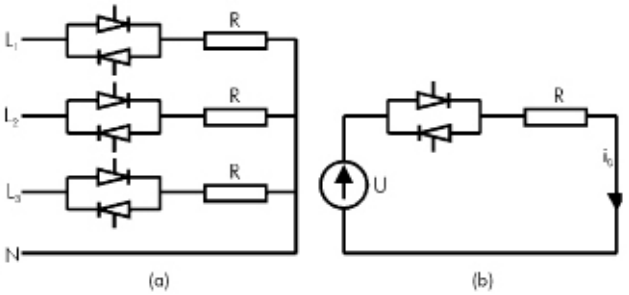


Figura 7 - Controlador de corrente alternada em.
a) Configuração trifásica;
b) Configuração monofásica.

Tensões de sinalização em sistemas de potência

A rede pública de potência é principalmente destinada ao fornecimento de energia elétrica para os clientes. Entretanto, a concessionária usa freqüentemente a rede para transmitir sinais para gerenciamento do sistema como, por exemplo, para controlar certos tipos de cargas (iluminação pública, tarifas variáveis, chaveamento remoto de cargas, etc.) ou transmissão de dados.

Do ponto de vista técnico, estes sinais são fontes de inter-harmônicas que acontece com uma duração de 0,5s a 2s (até 7s em sistemas mais antigos), repetidos em períodos de 6 a 180s. Na maioria dos casos, a duração do pulso é de 0,5s, e o tempo da seqüência completa é de aproximadamente 30s. A tensão e freqüência do sinal são pré-definidos e o sinal é transmitido em momentos especificados.

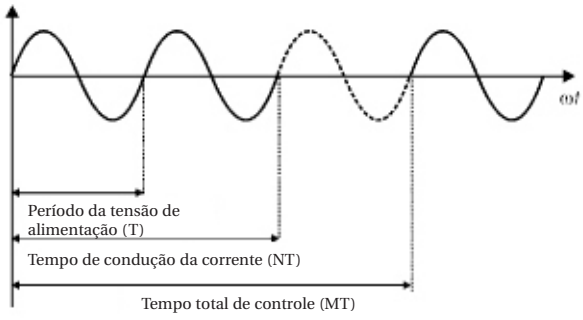


Figura 8 - Forma de onda de uma corrente de carga num sistema de controle de ciclo completo: N = 2, M = 3.

São especificadas quatro categorias básicas destes sinais na norma IEC 61000-2-1:

- *Sinais de controle de ondulação:* sinais senoidais na faixa de 110 Hz a 2200 Hz (3000) Hz com preferência para 110 Hz a 500 Hz em sistemas novos. Principalmente usado em sistemas de potência públicos (às vezes também em sistemas de potência industriais) em níveis de baixa, média e alta tensão. A intensidade do sinal de tensão senoidal está na faixa de 2% a 5% da tensão nominal (dependendo de práticas locais). Sob condições de ressonância, ela pode aumentar para 9%.
- *Sinais de portadoras de linha de potência de freqüências médias*: sinais senoidais na faixa de 3 kHz a 20 kHz, preferentemente entre 6 kHz e 8 kHz. Principalmente usado em sistemas de potência públicos. Intensidade do sinal até 2% U_N.
- *Sinais de portadoras de linha de potência de radio-freqüências*: 20 kHz a 150 kHz (148,5) kHz (até 500 kHz em alguns países). Usado em sistemas de potência públicos, industriais e comunitários, além de aplicações comerciais (controle remoto de equipamentos, etc.).
- *Sistemas mains-mark: máscaras não senoidais na tensão na forma de*:

- pulsos longos (interrupções de tensão de duração 1,5ms a 2ms, preferencialmente no ponto de cruzamento pelo zero da tensão);
- pulsos curtos, duração 20µs a 50µs;
- pulsos com freqüência de 50 Hz e duração igual a um ou a metade da freqüência da tensão de alimentação.

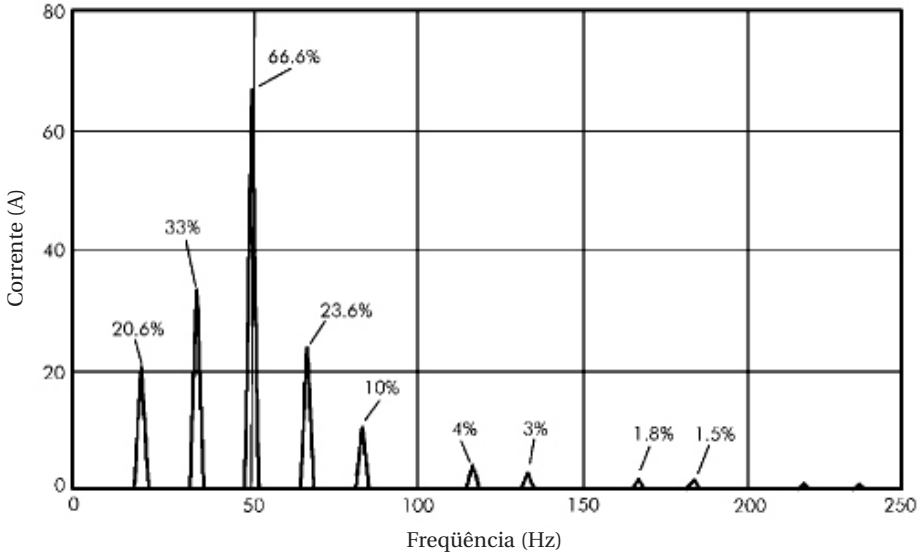


Figura 9 - Espectro da corrente para N = 2, M = 3.

A Figura 10 mostra um exemplo do espectro de tensão por um sistema utilizando transmissão de dados na freqüência de 175 Hz (U_{ih} = 1,35%). No exemplo, há outras inter-harmônicas geradas por interação com freqüências harmônicas. Componentes acima da segunda harmônica não são importantes (eles não perturbarão as cargas), enquanto que inter-harmônicas abaixo de 200 Hz pode causar problemas.

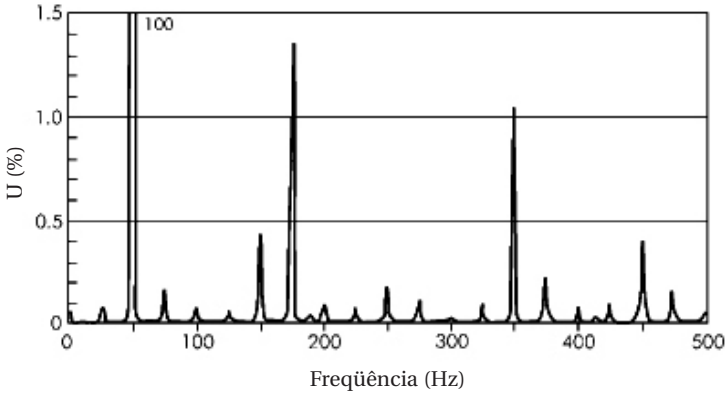


Figura 10 - Resultados da TRF para a tensão durante a emissão de sinal de transmissão de dados (U_{ih} = 1,35%, $f(U_{ih})$ = 175 Hz).

Efeitos da presença de inter-harmônicas

As correntes inter-harmônicas causam distorções inter-harmônicas de tensão que dependem das intensidades das componentes de corrente e da impedância do sistema de alimentação naquela freqüência. Quanto maior a faixa de freqüências das componentes de corrente, maior é o risco da ocorrência de fenômeno de ressonância não desejado, o qual pode aumentar a distorção de tensão e causar sobrecargas ou perturbações na operação dos equipamentos dos clientes e das instalações. Dentre os efeitos diretos mais comuns das inter-harmônicas estão:

- Efeitos térmicos;
- Oscilações de baixas freqüências em sistemas mecânicos;
- Perturbações na operação de lâmpadas fluorescentes e equipamentos eletrônicos. Na prática, a operação de qualquer equipamento que está sincronizado com a passagem da tensão de alimentação pelo zero ou pela tensão de pico pode ser perturbada (Figura 11);
- Interferência com sinais de controle e proteção em linhas de alimentação de potência. Este é agora o principal efeito prejudicial das inter-harmônicas;
- Sobrecarga de filtros passivos paralelos para harmônicas de ordens mais elevadas;
- Interferências em telecomunicação;
- Perturbação acústica;
- Saturação de transformadores de corrente.

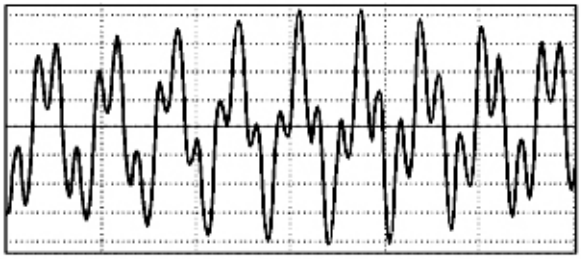


Figura 11 - Múltiplas passagens pelo zero da forma de onda de tensão como resultado da distorção.

Os efeitos mais comuns da presença de inter-harmônicas são variações na intensidade de tensão rms e flicker (cintilamento).

Flutuações de tensão e flicker (cintilamento)

A tensão de alimentação pode ser expressa por:

$$u(t) = U_1 \sin(\omega_1 t)[1+m\sin(\omega_i t)] + \sum_h U_h \sin(\omega_h t) \qquad (1)$$

$$u(t) = U_1 \sin(\omega_1 t) + \left[\sum_h U_h \sin(\omega_h t)\right][1+m\sin(\omega_i t)] \qquad (2)$$

onde $\omega_1 = 2\pi f_1$ e m é o índice do sinal de modulação com freqüência $\omega_i = 2\pi f_i$.

As equações anteriores representam as possíveis fontes de flutuações de tensão causadas pela modulação da componente fundamental com harmônicas múltiplas inteiras. O segundo caso é de pequeno significado prático. Com somente a componente fundamental sendo levada em conta, a equação se torna:

$$u(t) = U_1 \sin(\omega_1 t)[1+m\sin(\omega_i t)] = U_1 \sin(\omega_1 t) + \frac{mU_1}{2}[\cos(\omega_1-\omega_i)t - \cos(\omega_1+\omega_i)t] \qquad (3)$$

Nesta equação, além da componente fundamental, há dois componentes com freqüências relacionadas com a freqüência do sinal de modulação localizada simetricamente de cada lado da componente de freqüência fundamental. Variações periódicas da tensão poderiam ser consideradas como variações do valor rms (ou de pico), ou como resultado da presença de inter-harmônicas que modulam a tensão de alimentação.

Por exemplo, para $u(t) = sen\ (2\pi ft) + m\ sen\ (2\pi f_i t)$ (assumindo $U_1 = 1$), a variação máxima da intensidade de tensão é igual à intensidade da inter-harmônica, enquanto que a variação do valor rms depende da intensidade e freqüência da inter-harmônica. A Figura 12 mostra a variação máxima percentual do valor rms de tensão, determinada durante vários ciclos da forma de onda da fundamental, causada por inter-harmônicas de diferentes freqüências, mas de intensidade constante $m = 0{,}2\%$ da componente fundamental de tensão.

Como visto na Figura 12, a influência das inter-harmônicas de freqüências maiores do que duas vezes a freqüência da alimentação é pequena comparada com a influência das componentes de freqüências menores do que a freqüência da segunda harmônica (100 Hz). No caso de inter-harmônicas, há um risco de flutuações de tensão causarem flicker (cintilamento) se o nível exceder, para uma determinada freqüência, um certo valor de limite. Conseqüentemente, se $f_i \leq f_1$, e, particularmente, para fi próxima da freqüência fundamental - ($f_1 \pm 15$ Hz), a modulação da componente fundamental causa flutuações da intensidade de tensão rms e então é uma fonte de cintilamento. Este fenômeno pode ser observado para lâmpadas incandescentes e fluorescentes, porém o mecanismo e a faixa de freqüência, e também as intensidades permissíveis de componentes perturbadores, são completamente diferentes.

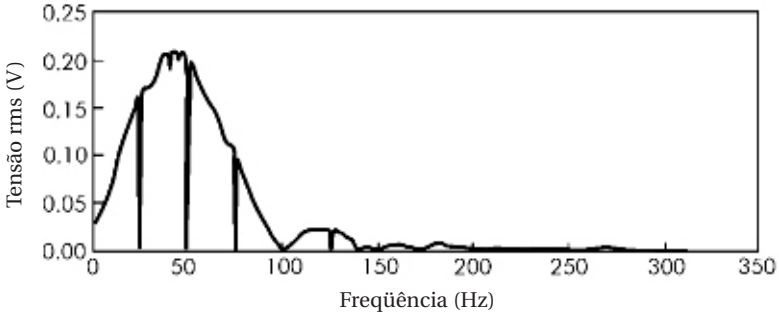


Figura 12 - Dependência da variação da tensão rms máxima na freqüência da inter-harmônica com uma intensidade constante (0,2% da intensidade da componente fundamental) [10].

Uma fonte em particular de cintilamento pode ser um sistema de sinalização pela linha de energia discutida anteriormente. Apesar de suas pequenas intensidades, estes sinais às vezes podem dar origem a cintilamentos no caso de dispositivos de iluminação muito sensíveis, tais como lâmpadas fluorescentes compactas, particularmente com reatores eletromagnéticos. Este tipo de perturbação raramente acontece para fontes de luz com reatores eletrônicos.

Medição

A maioria dos instrumentos que faz medições corretamente no domínio de freqüência somente opera corretamente quando harmônicas estão presentes no sinal medido. Estes instrumentos empregam um laço de fase para sincronizar a medição com a freqüência da componente fundamental e fazem amostras do sinal durante um ou vários ciclos de modo a analisá-las usando a Transformada Rápida de Fourier. Devido ao laço de fase, as amostras de "único-ciclo" podem dar uma representação precisa do espectro de forma de onda, somente quando não contém inter-harmônicas. Se outras freqüências não harmônicas (em relação ao período de medição) estão presentes e/ou a forma de onda amostrada não é periódica neste intervalo de tempo, surgem dificuldades com a interpretação dos resultados.

A ferramenta de análise fundamental é a Transformada de Fourier. Na prática, o sinal é analisado em um intervalo de tempo limitado (janela de medição do tempo T_ω), usando um número limitado de amostras (M) do sinal real. Resultados da Transformada Discreta de Fourier dependem da escolha dos valores de T_ω e de M. O inverso de T_ω é a freqüência de Fourier fundamental - f_F. A Transformada Discreta de Fourier é aplicada ao sinal real dentro da janela de tempo; o sinal fora da janela não é processado, mas é assumido como idêntico à forma de onda dentro da janela. Deste modo, o sinal real é substituído por um sinal virtual que é periódico com um período igual à largura da janela.

Na análise das formas de onda periódicas, não há problema de sincronização do tempo de análise com o período da forma de onda da fundamental (também com harmônicas). Porém, com a análise de inter-harmônicas, o problema se torna mais difícil. As freqüências das componentes de inter-harmônicas são múltiplas não inteiras da freqüência fundamental e freqüentemente variam com o tempo, o que torna a medição mais difícil.

Por causa da presença de componentes harmônicas e inter-harmônicas, a freqüência de Fourier, que é o maior divisor comum de todas as freqüências das componentes contidas no sinal, é diferente da freqüência fundamental da tensão de alimentação e, normalmente, é muito pequena. Há dois problemas:

- O tempo mínimo de amostragem pode ser longo e o número de amostras grande;
- É difícil predizer a freqüência de Fourier fundamental porque nem todas as freqüências das componentes do sinal são conhecidas a priori.

Isto pode ser ilustrado pelos seguintes exemplos:

O sinal a ser analisado é uma soma da componente fundamental (50 Hz), inter-harmônica (71,2 Hz) e harmônica (2500 Hz). A freqüência de Fourier fundamental é 0,2 Hz e é muito menor do que a freqüência da componente fundamental. O período correspondente é 5s e, por conseguinte, o tempo de amostragem mínimo permitido é 5s. Assumindo a freqüência de amostragem igual a 10 kHz, que é praticamente o valor aplicável mínimo obtido pelo critério de Nyquist (Anexo 2), o número mínimo de amostras requerido *M* é 50.000. Se não houvesse nenhuma componente de inter-harmônica (71,2 Hz), o tempo mínimo de medição seria 20ms e o número de amostras seria 200.

O sinal a ser analisado é uma soma da componente fundamental (50 Hz) e harmônica (2500 Hz), a intensidade de cada um variando senoidalmente com as freqüências 0,1 Hz e 5 Hz, respectivamente. Os efeitos destas modulações são quatro inter-harmônicas nas freqüências de 49,9 Hz, 50,1 Hz, 2495 Hz e 2505 Hz. A freqüência de Fourier fundamental é 0,1 Hz, e o tempo de amostragem mínimo é 10s e *M* = 100.000.

Em aplicações práticas, devido às limitações de equipamentos e de software, o número de amostras *M* não pode ser maior do que um certo número máximo, e, conseqüentemente, o tempo de medição é limitado. O uso de um tempo de medição diferente do período de Fourier fundamental resulta em uma descontinuidade entre o sinal no princípio e no fim da janela de medição. Isto dá lugar a erros na identificação de componentes conhecidos como fuga do espectro. Uma possível solução para este problema é o uso de uma janela de tempo ajustada para um sinal que varia com o tempo antes da análise da Transformada Rápida de Fourier. Na prática, dois tipos de janelas de medição são aplicadas: a retangular e a janela de Hanning (Anexo 1).

Normalização

Fatores normalizados

A Tabela 2 indica alguns fatores numéricos de conteúdo de inter-harmônicas usados em vários documentos normativos.

Fator	Definição
Intensidade da inter-harmônica em relação à componente fundamental (tensão ou corrente)	$\frac{Q_i}{Q_1}$
Conteúdo total de distorção	$TDC = \sqrt{Q^2 - Q_1^2}$
Razão de distorção total	$TDR = \frac{TDC}{Q_1} = \frac{\sqrt{Q^2 - Q_1^2}}{Q_1}$
Fator de distorção inter-harmônico total	$TIHD = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} Q_i^2}}{Q_1}$
Distorção subharmônica total	$TSHD = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{S} Q_i^2}}{Q_1}$
Q = valor rms total representando tanto corrente quanto tensão	
Q_1 = valor rms da componente fundamental	
Q_2 = valor rms da inter-harmônica	
i = número da inter-harmônica	
n = número total de inter-harmônicas consideradas	
S = número total de subharmônicas consideradas	

Tabela 2 - Fatores de distorção de harmônicas utilizados nas normas.

Método normalizado de medição

A medição de inter-harmônicas é difícil com resultados que dependem de muitos fatores. A norma [6] sugere um método de medição de inter-harmônicas baseado no conceito do assim chamado "agrupamento". Sua base é análise de *Fourier* executada em uma janela de tempo igual a 10 ciclos da freqüência fundamental (50 Hz), ou seja, aproximadamente 200ms. A amostragem é sincronizada com a freqüência da rede por meio de um laço fechado com a fase. O resultado é um espectro com resolução de 5 Hz. A norma define o método de processamento de linhas individuais de 5 Hz de forma os chamados grupos de harmônicas ou inter-harmônicas, os quais são recomendações de normas e relatórios técnicos. São calculados grupos de harmônicas e inter-harmônicas de acordo com equações da Figura 13.

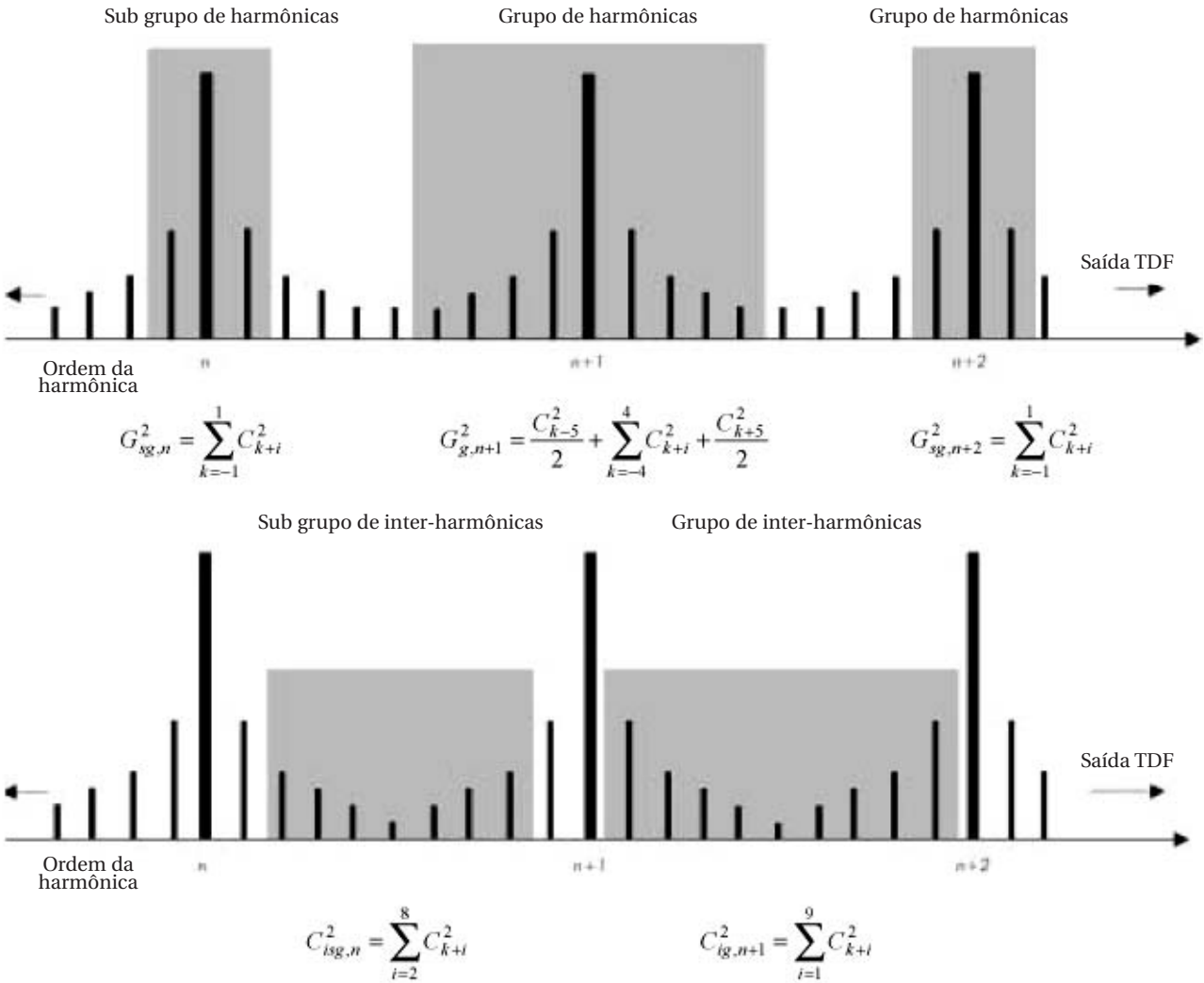


Figura 13 - Ilustração do princípio de grupos de harmônicas e inter-harmônicas.

Definições relativas ao conceito de agrupamento:

Valor rms de um grupo de harmônicas

A raiz quadrada da soma dos quadrados das intensidades das componentes harmônicas e espectrais adjacentes a elas dentro da janela de observação, somando os conteúdos de energia das linhas vizinhas à da própria harmônica.

Valor rms de um subgrupo de harmônicas

A raiz quadrada da soma dos quadrados das intensidades das componentes harmônicas e de dois componentes espectrais imediatamente adjacentes a elas, com a finalidade de incluir o efeito de flutuação de tensão durante as amostragens de tensão. Um subgrupo de componentes de saída da Transformada Discreta de Fourier é obtido somando os conteúdos de energia da componente de freqüência diretamente adjacente à própria harmônica.

Valor rms de um subgrupo de inter-harmônicas

O valor rms de todas as componentes inter-harmônicas no intervalo entre duas freqüências harmônicas consecutivas (ver Figura 13).

Valor rms de um subgrupo central de inter-harmônicas

O valor rms de todas as componentes inter-harmônicas no intervalo entre duas freqüências harmônicas consecutivas, excluindo as componentes de freqüência diretamente adjacentes às freqüências harmônicas (ver Figura 13).

Informações mais detalhadas relativas a este conceito de medição podem ser encontradas na norma [6]. Com base nestas definições, podem ser realizadas medições para qualquer grupo de inter-harmônicas, como também para distorção inter-harmônica total, e referida à componente fundamental, valor rms total ou outro valor de referência. Estes valores são a base para determinar valores limites.

Este método é atrativo para finalidades de monitoramento no caso de reclamações e para testes de compatibilidade, porque os níveis de limite podem ser definidos com base na distorção total e não se referem à medição de freqüências específicas. Este método não é adequado para propósitos de diagnóstico.

Limites de compatibilidade

O processo de normalização de inter-harmônicas está em sua infância, com conhecimento e dados de medição ainda sendo acumulados.

O nível de limite igual a 0,2% para tensões inter-harmônicas é extensamente aplicado, principalmente por causa da falta de uma melhor sugestão. Este nível foi introduzido por conta da sensibilidade das cargas nos sistemas de sinalização, mas sua aplicação em outros casos, sem levar em conta os possíveis efeitos físicos, pode levar a soluções muito caras, como, por exemplo, filtros passivos dispendiosos. Vários documentos que contêm exemplo são citados adiante, mas são evidentes as inconsistências e variações entre eles.

Prescrições da IEC (Internacional Electrotechnical Commission)

De acordo com as recomendações da IEC, as inter-harmônicas de tensão estão limitadas a 0,2% para a faixa de freqüência desde a componente CC até 2 kHz.

A norma [7] indica os níveis de testes de imunidade para inter-harmônicas em várias faixas de freqüências. Dependendo da classe do equipamento, os níveis de tensão estão contidos em 1,5% U_1 (1000 - 2000 Hz). Os níveis de inter-harmônicas acima de 100 Hz estão entre 2 e 9%.

No documento [5], os níveis de compatibilidade são formulados somente para o caso de inter-harmônicas de tensão com freqüências próximas da componente fundamental, o que resulta em modulação da tensão de alimentação e cintilamento. A Figura 14 mostra o nível de compatibilidade para uma única tensão inter-harmônica,

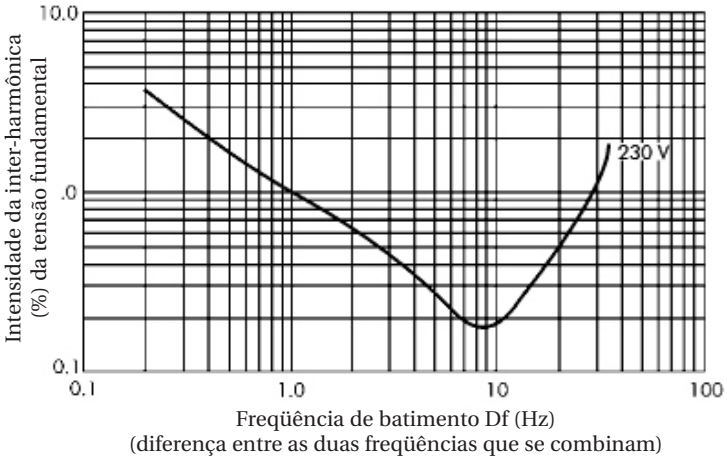


Figura 14 - Níveis de compatibilidade para inter-harmônicas relativas ao cintilamento (efeito de batimento) [5].

expressa como um percentual da intensidade da componente fundamental, e como uma função da freqüência de batimento de dois componentes combinados, cuja interação resulta na inter-harmônica. Esta característica é chamada de severidade de cintilamento P_{st} = 1 para lâmpadas incandescentes de 230 V.

Recomendações mais detalhadas com respeito aos valores de limite nos sistemas de sinalização que utilizam a rede de energia são indicados abaixo:

- *Sinais de controle de ondulação:* O nível destes sinais não deverá exceder valores das harmônicas ímpares que não são múltiplas de 3 para a mesma faixa de freqüência ([5], (Tabela 3). Na prática, este valor está contido na faixa de 2-5% UN.
- *Sinais de portadoras de linha de potência de freqüências médias:* Valor do sinal até 2% UN.
- *Sinais de portadoras de linha de potência de rádio-freqüências:* Níveis de compatibilidade estão sob consideração; não deveriam 0,3% UN.

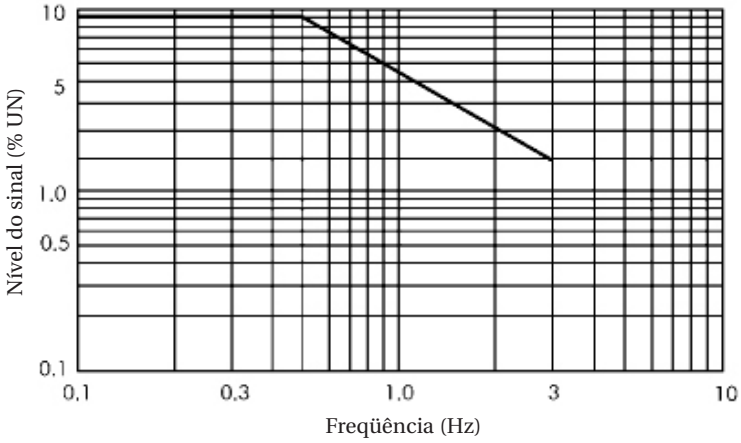


Figura 15 - Curva de Meister para sistemas de controle de ondulação em redes públicas (100 Hz a 3000 Hz) [5].

- *Sistemas mains-mark:* Os fabricantes de equipamentos devem garantir compatibilidade com o ambiente de trabalho.

Em alguns países, a chamada Curva Meister, mostrada na Figura 15, é reconhecida oficialmente.

Ordem da harmônica	5	7	11	13	$17 \leq h \leq 49$
Valor rms da harmônica (% da componente fundamental)	6	5	3,5	3	$2{,}27 * (17/h) - 0{,}27$

Tabela 3 - Valores de harmônicas como base para a determinação de níveis de compatibilidade de inter-harmônicas.

CENELEC (Norma EN 50160)

Durante 99% de um dia, a média das tensões de sinais tomadas a cada três segundos deverá ser menor ou igual aos valores indicados na Figura 16.

Limites de emissão de subharmônicas e inter-harmônicas [13].

No Reino Unido, por exemplo, é assumido que os sistemas de controle de ondulação não são usados e, então, uma carga do consumidor pode ser conectada sem avaliação se as emissões individuais de inter-harmônicas são menores do que os valores de limite da Tabela 4. Limites para freqüências específicas de inter-harmônicas entre 80 e 90 Hz podem ser interpolados linearmente entre os limites dados na Tabela 4.

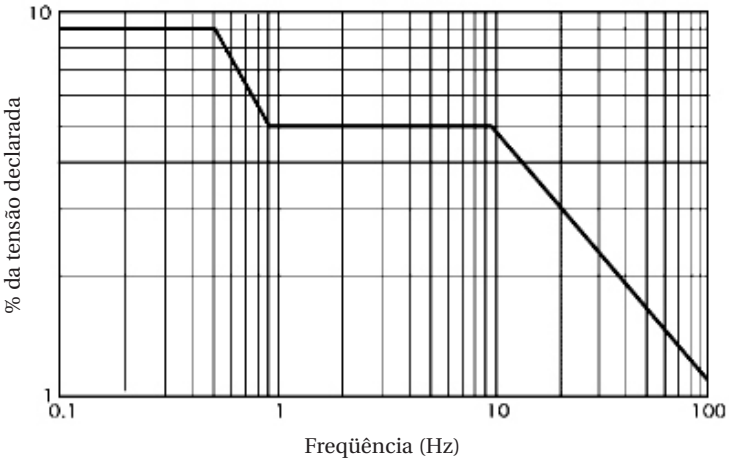


Figura 16 - Níveis de tensão dos sinais utilizados em sistemas de distribuição públicos em média tensão [11].

Freqüência subharmônica ou inter-harmônica (Hz)	< 80	80	90	> 90 e < 500
Distorção de tensão como % da fundamental	0,2	0,2	0,5	0,5

Tabela 4 - Limites de emissão de subharmônicas e inter-harmônicas no Reino Unido.

Métodos para mitigação de inter-harmônicas e redução dos seus efeitos

Os métodos de eliminar os efeitos das inter-harmônicas incluem:

- Redução do nível de emissão;
- Redução da sensibilidade das cargas, e;
- Redução do acoplamento entre geradores e cargas.

Os métodos usados são os mesmos que para harmônicas.

Deveriam ser levados em conta fatores adicionais no projeto de filtros passivos. Por exemplo, a ressonância entre filtros e as inter-harmônicas do sistema de potência pode ser amplificada e causar distorções e flutuações de tensão significativas. Filtros precisam ser projetados com fatores de amortecimento mais altos.

A Figura 17 mostra um exemplo das características da impedância da fonte de um filtro passivo (harmônicas 3, 5, 7 e 12) vista pelo lado dos terminais de entrada do conversor que alimenta a instalação de um grande forno a arco em CC. A linha pontilhada corresponde aos filtros não amortecidos. Havia um risco real de ressonância para inter-harmônicas adjacentes a 120 e 170 Hz. Filtros com amortecimento para 3ª e 7ª harmônicas reduziram o perigo de acontecer a ressonância.

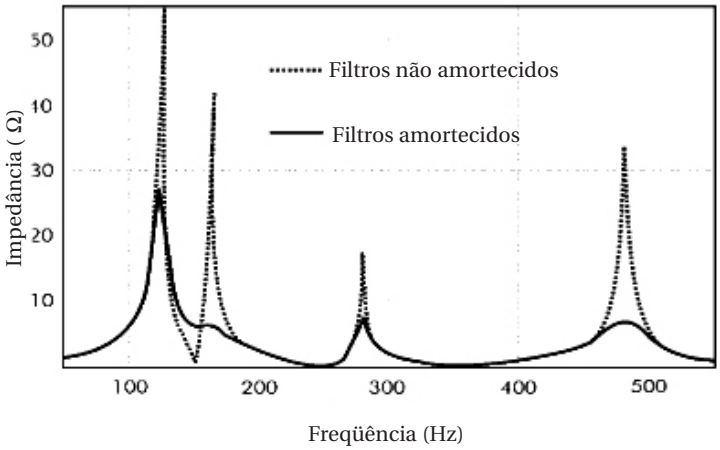


Figura 17 - Exemplo de impedância vista pelos terminais do conversor.

O processo de projeto de um filtro às vezes requer um compromisso entre a precisão da sintonia e as perdas de energia, o que envolve escolher o fator de qualidade do filtro.

O projeto de um filtro passa-faixa com largura estreita de freqüências apresenta vários problemas. O desvio de freqüência do sistema normal de alimentação pode ser importante, especialmente quando combinado com variações da freqüência de sintonia devidas às tolerâncias dos componentes, envelhecimento, variação de temperatura e mudanças na impedância da alimentação.

A variação resultante na freqüência de ressonância do filtro, considerando a faixa de freqüência muito estreita do filtro, pode reduzir significativamente a eficiência do filtro, mesmo se a variação é pequena. Isso requer, às vezes, a escolha de um fator de qualidade reduzido que alarga a faixa da banda e, assim, também é vantajoso em termos de filtragem das inter-harmônicas.

Perturbações causadas pelos sistemas de sinalização que utilizam a linha de energia podem ser eliminadas aplicando-se filtros em série, sintonizados nas freqüências desejadas e corretamente localizados no sistema. Outras soluções envolvem o aumento do nível de imunidade do equipamento em uso ou o emprego de filtros ativos.

Conclusões

A revisão efetuada sobre a presença de inter-harmônicas, suas fontes básicas e as características do espectro contínuo e discreto, permitem a formulação de várias conclusões de natureza geral.

Primeiramente, na grande maioria dos casos, as intensidades e freqüências das correntes e tensões inter-harmônicas são quantidades estocásticas (determinadas estatisticamente) que dependem de numerosos parâmetros complexos de processos transitórios.

Em segundo lugar, a avaliação da intensidade e freqüência de uma inter-harmônica é possível para um processo específico considerado.

Em terceiro lugar, não há regulamentos e normalizações coerentes relativos às inter-harmônicas, embora exista uma grande necessidade prática para eles.

Referências e bibliografia

[1] *Arrillaga J, Watson N R, Chen S: Power system quality assessment, Wiley, 2000.*

[2] *Gunther E W: Inter-harmônicas in power systems, UIEPQ-9727.*

[3] *Inter-harmônica Task Force Working Document – IH0101 20001, IEEE.*

[4] *IEC 61000-2-1: 1990 - Electromagnetic compatibility (EMC) Part 2: Environment - Section 1: Description of the environment - Electromagnetic environment for low-frequency conducted disturbances and signalling in public power supply systems.*

[5] *IEC 61000-2-2: 2002 - Electromagnetic compatibility (EMC) Part 2: Environment - Section 2: Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems. (also materials used in preparation of the standard, obtained from the authors).*

[6] *IEC 61000-4-7: 2002 Electromagnetic compatibility (EMC) Part 4: Testing and measurement techniques Section 7:General guide on harmônicas and inter-harmônicas measurements and instrumentation for power supply systems and equipment connected thereto.*

[7] *IEC 61000-4-13: 2002 Electromagnetic compatibility (EMC) Part 4: Testing and measurement techniques Section 13:Harmônicas and inter-harmônicas including mains signalling at ac power port, low frequency immunity tests (also materials used in preparation of the standard, obtained from the authors).*

[8] *Kloss A: Oberschwingungen, vde Verlag, ISBN 3-8007-1541-4.*

[9] *Materials used in preparation of standard IEC 61000-2-4 (obtained from the authors).*

[10] *Mattaveli P, Fellin L, Bordignon P, Perna M: Analysis of inter-harmônicas in dc arc furnace installations, 8th International Conference on Harmônicas and Quality of Power, Athens, Greece, October 14-16, 1998.*

[11] *EN 50160: 1999 - Voltage characteristics of electricity supplied in public distribution systems.*

[12] *Staudt V: Effects of window functions explained by signals typical to power electronics, 8th International Conference on Harmônicas and Quality of Power, Athens, Greece, October 14-16, 1998.*

[13] *Engineering Recommendation G5/4, Electricity Association, Feb. 2001.*

Anexo 1

A Transformada de Fourier é o método mais popular de análise espectral de um sinal. A teoria fundamental de análise espectral assume que a análise é executada em um intervalo de tempo de - ∞ para + ∞. A Transformada Discreta de Fourier (TDF), ou sua variante Transformada Rápida de Fourier (TRF), pode introduzir componentes espectrais inesperadas do sinal analisado. Este efeito acontece porque a TDF e TRF operam sob um número finito de amostras, ou seja, sob uma parte do sinal real. O espectro real e determinado será idêntico somente quando o sinal é periódico, e o tempo no qual é analisado contém um número inteiro de ciclos do sinal. Esta condição é muito difícil de ser atendida nos casos práticos.

Os resultados apresentados nas Figuras A.1.1 e A.1.2 ilustram como o espectro real pode parecer. Espectros diferentes foram obtidos para o mesmo sinal, enquanto que o tempo de observação na Figura A.1.2 foi 2,5% mais longo. Na literatura, este efeito é chamado de fuga espectral. Poderia ser dito que parte da energia da linha espectral principal é transferida para as linhas laterais. A seguinte interpretação deste fenômeno foi proposta: a amostragem para a análise de TDF pode ser comparada com a multiplicação do sinal real de duração infinita por uma janela retangular que corresponde ao tempo de observação (Figura A.1.3).

Para limitar a fuga espectral é necessário que os valores do sinal analisado não mudem rapidamente na origem e o no final do intervalo de amostragem.

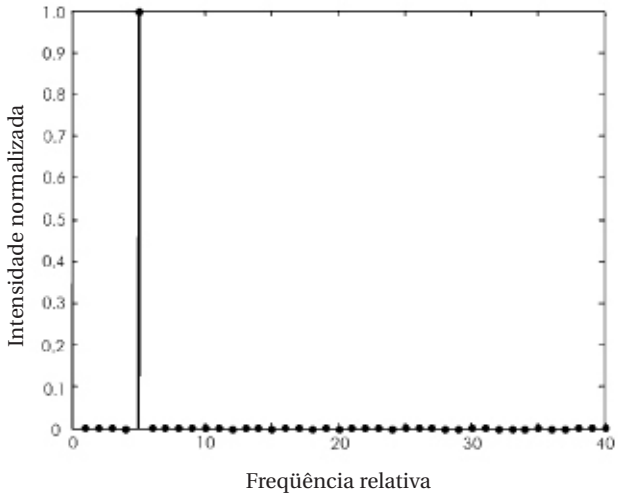


Figura A.1.1 - módulos do espectro do sinal, exatamente 4 ciclos foram usados para análise.

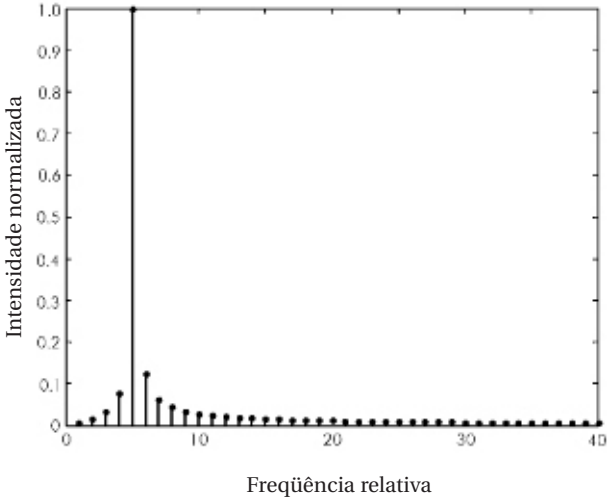


Figura A.1.2 - módulos do espectro do sinal, 4,1 ciclos foram usados para análise.

Figura A.1.3 - Aquisição de amostras para análise TDF.

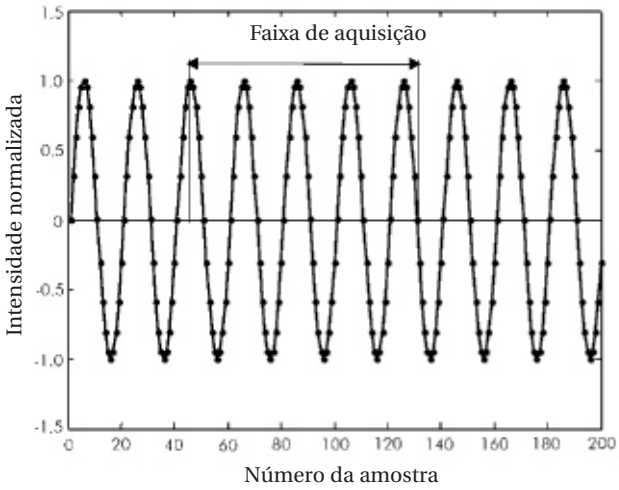


Figura A.1.4 mostra como a janela de tempo deve ser usada para análise do sinal.

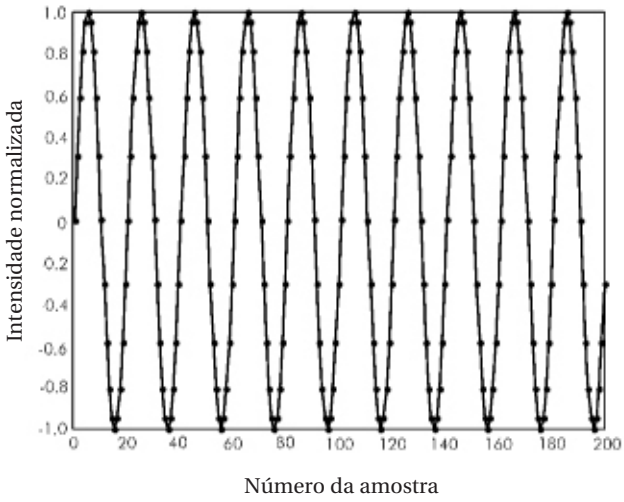


Figura A.1.4a - Amostras para análise.

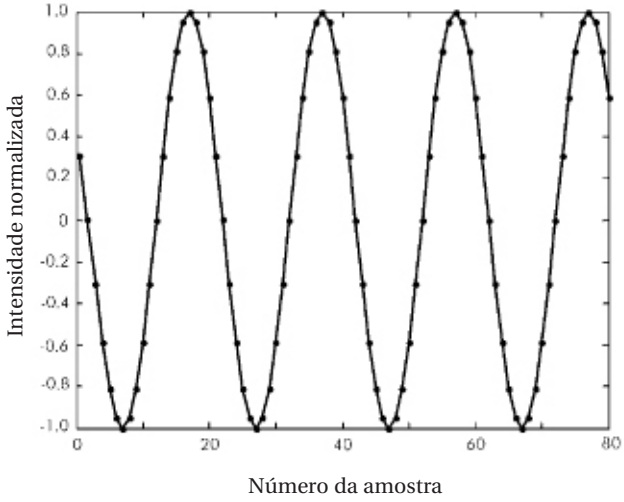


Figura A.1.4b - Operação da janela de tempo impondo $y_i = w_i \cdot x_i$

onde: y_i *= sinal com janela imposta;*
x_i *= amostras medidas;*
w_i *= função janela em i variações de 1 a N (número de amostras).*

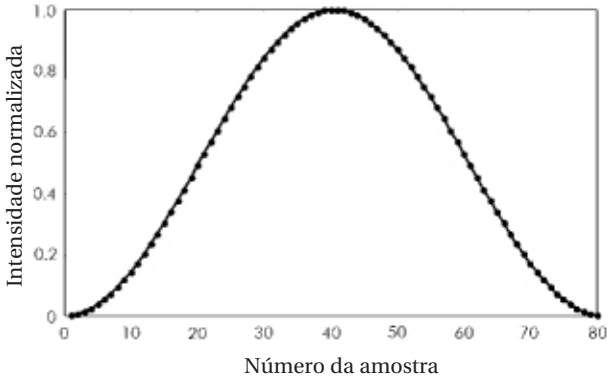


Figura A.1.4c - Análise do espectro TDF.

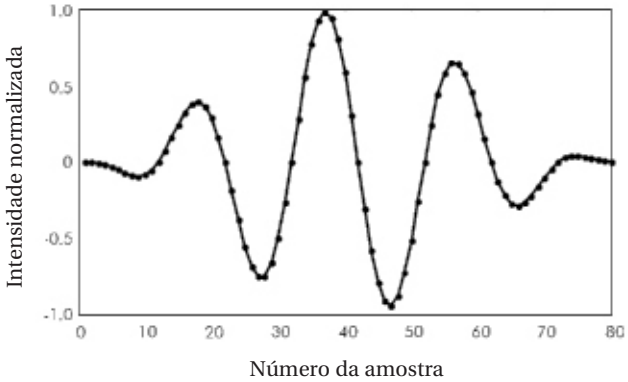
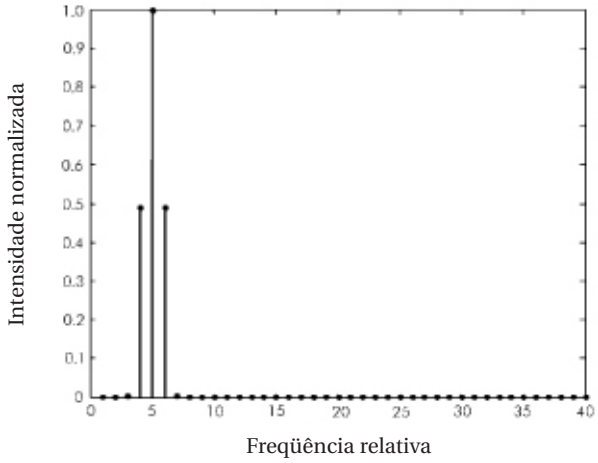


Figura A.1.4d - Análise do espectro TRF.

Figura A.1.4e - Janelas de tempo para a análise do espectro do sinal.



A Figura A.1.5 mostra como os métodos apresentados influenciaram o espectro do exemplo da Figura A.1.2. A janela de Hanning foi usada para a finalidade deste exemplo. O efeito é uma redução no número de linhas espectrais não zeradas, e o espectro se aproxima do correto, como mostrado na Figura A.1.1.

Várias análises de janelas TDF são conhecidas na literatura atual. As mais populares são (Figura A.1.6):

- Janela triangular semelhante à janela de Barlett;
- Janela de Hanning;
- Janela de Hann ou Janela de Hamming.

Estas janelas são freqüentemente utilizadas em instrumentos de medição. Seus usos não eliminam os problemas de fugas espectrais, mas limitam significativamente o efeito do tempo de observação finito. Isto é particularmente evidente como uma melhoria da resolução do espectro.

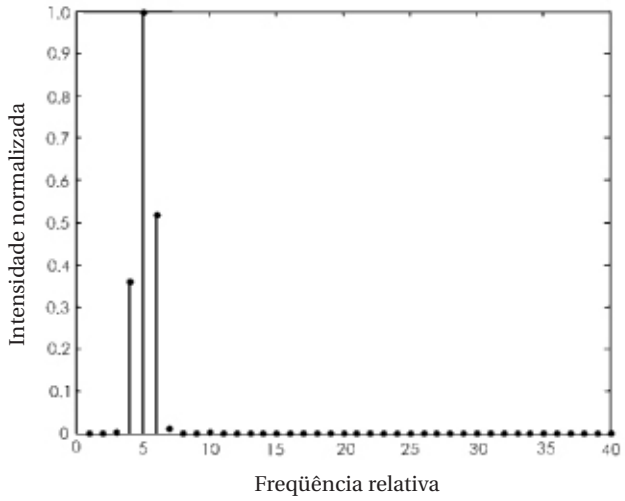


Figura A.1.5 - Exemplo de aplicação da janela de Hamming para análise TDF.

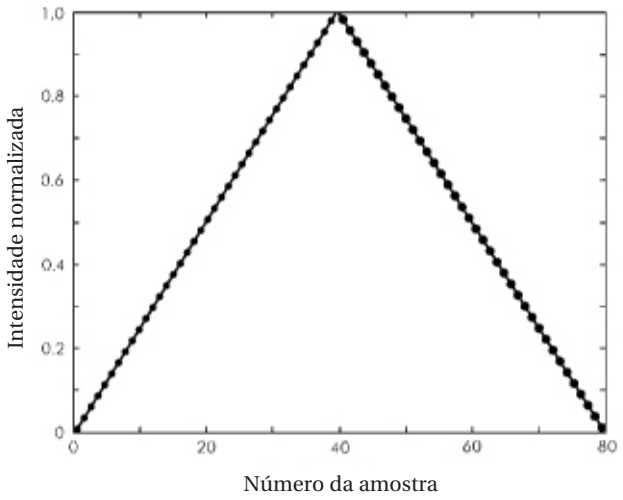


Figura A.1.6a - Janela triangular.

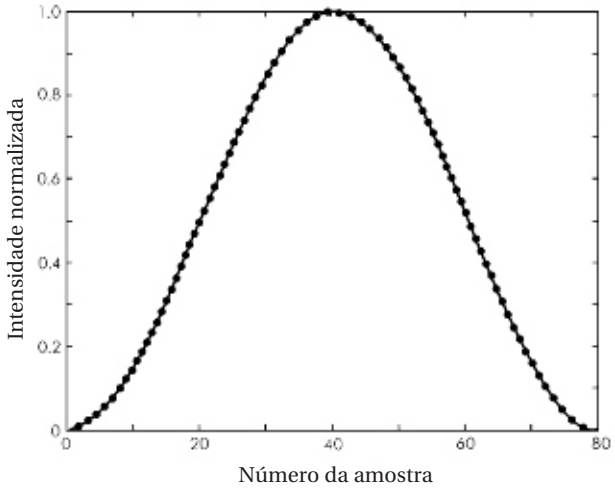


Figura A.1.6b - Janela Hanning.

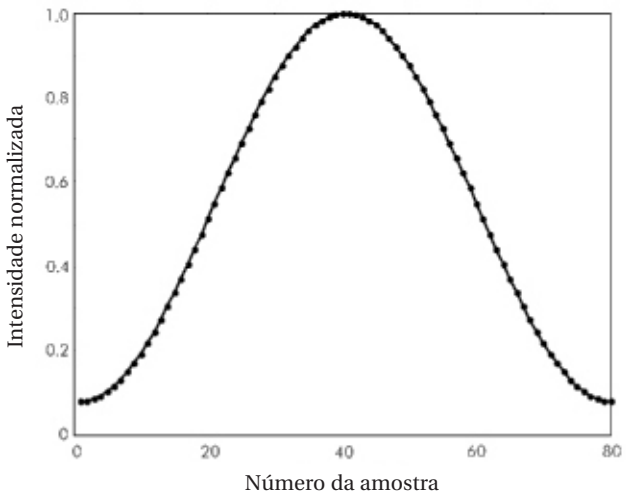


Figura A.1.6c - Janela Hamming.

Anexo 2

A maior dificuldade associada com a amostragem de um sinal contínuo é o problema de ambigüidade. A essência deste problema está ilustrada na Figura A.2.1. Observa-se na figura que o mesmo conjunto de dados amostrados pode descrever várias formas de onda, indistinguíveis pelos equipamentos de medição.

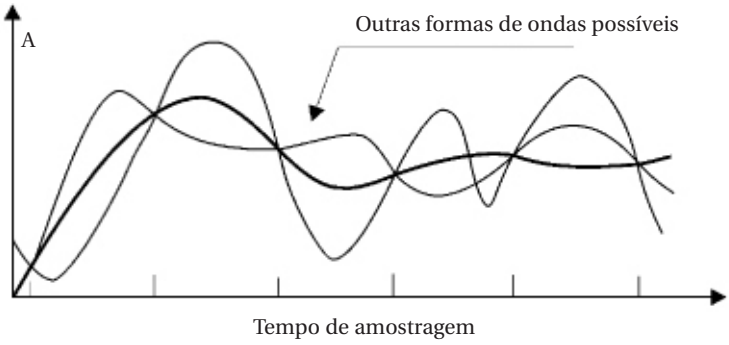


Figura A.2.1 - Ambigüidade.

O princípio da análise de freqüência é a representação de uma forma de onda arbitrária pela soma de uma série de sinais senoidais. Tal método de apresentação permite a análise quantitativa do problema de ambigüidade. Para tanto, considere a forma de onda mostrada na Figura A.2.2.

Um sinal *x(t)* é amostrado em intervalos iguais de tempo *h*, determinando os instantes de amostragem para os quais os valores do sinal medido estão indicados na figura. Assume-se que a função *x(t)* é senoidal com freqüência f_0. Os mesmos pontos poderiam também representar senóides com freqüências f_1 ou f_1, que são múltiplas (não necessariamente múltiplas inteiras) da freqüência f_0. Estas várias freqüências estão obviamente associadas com o período de amostragem. A freqüência f_0 é chamada de freqüência fundamental.

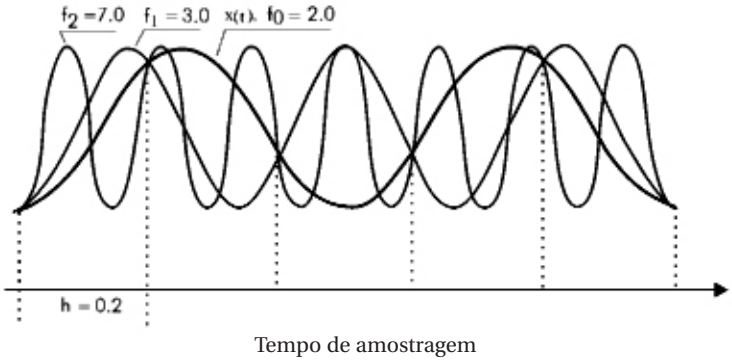


Figura A.2.2 - Análise de ambigüidade.

Poderia ser afirmado, sem a apresentação da prova matemática, que a faixa de freqüências para qual o efeito de ambigüidade não acontece se estende de $f_0 = 0$ a $f_0 = f_0$ onde f_N, a freqüência máxima, é chamada de Freqüência de Nyquist. Ela determina a freqüência limite de amostragem dos dados, o chamado Limite Shannon, além do qual não é mais possível uma única reconstrução de um sinal contínuo. Assim, se o sinal a ser analisado não contém componentes de freqüências maiores do que f_N, então a freqüência mínima de amostragem necessária para permitir que o sinal amostrado represente sinal real é determinado por:

$$f_s \geq 2 f_N, \text{ ou, porque } f_s \geq \frac{1}{h}, \text{ então } f_N \geq \frac{1}{2h}$$

Este é o chamado teorema da amostragem. Em conseqüência, para um determinado espectro de freqüências, os componentes situados entre $f_0 = 0$ e $f_0 = f_N$ podem ser considerados separadamente. Se o sinal contém componentes de freqüências $f > f_N$, estes componentes não serão distinguidos.

Portanto, é necessário limitar largura de banda do sinal medido de modo a reduzir uma conseqüência direta de ambigüidade durante sua amostragem. Isso implica a necessidade de filtrar o sinal a ser medido por meio de um filtro passa-baixa antes da amostragem, a fim de eliminar todas as freqüências maiores do que f_N.

Refer ncias & Membros Fundadores

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

Conselho Editorial

David Chapman (Chief Editor)	CDA UK	david.chapman@copperdev.co.uk
Prof. Angelo Baggini	Università di Bergamo	angelo.baggini@unibg.it
Dr. Araceli Hernández Bayo	ETSII - Universidad Politécnica de Madrid	ahernandez@etsii.upm.es
Prof. Ronnie Belmans	UIE	ronnie.belmans@esat.kuleuven.ac.be
Dr. Franco Bua	ECD	franco.bua@ecd.it
Jean-Francois Christin	MGE UPS Systems	jean-francois.christin@mgeups.com
Prof. Anibal de Almeida	ISR - Universidade de Coimbra	adealmeida@isr.uc.pt
Hans De Keulenaer	ECI	hdk@eurocopper.org
Prof. Jan Desmet	Hogeschool West-Vlaanderen	jan.desmet@howest.be
Dr. ir Marcel Didden	Laborelec	marcel.didden@laborelec.com
Dr. Johan Driesen	KU Leuven	johan.driesen@esat.kuleuven.ac.be
Stefan Fassbinder	DKI	sfassbinder@kupferinstitut.de
Prof. Zbigniew Hanzelka	Akademia Gorniczo-Hutnicza	hanzel@uci.agh.edu.pl
Stephanie Horton	LEM Instruments	sho@lem.com
Dr. Antoni Klajn	Wroclaw University of Technology	antoni.klajn@pwr.wroc.pl
Prof. Wolfgang Langguth	HTW	wlang@htw-saarland.de
Jonathan Manson	Gorham & Partners Ltd	jonathanm@gorham.org
Prof. Henryk Markiewicz	Wroclaw University of Technology	henryk.markiewicz@pwr.wroc.pl
Carlo Masetti	CEI	masetti@ceiuni.it
Mark McGranaghan	EPRI PEAC Corporation	mmcgranaghan@epri-peac.com
Dr. Jovica Milanovic	UMIST	jovica.milanovic@umist.ac.uk
Dr. Miles Redfern	University of Bath	eesmar@bath.ac.uk
Dr. ir Tom Sels	KU Leuven	tom.sels@esat.kuleuven.ac.be
Prof. Dr-Ing Zbigniew Styczynski	Universität Magdeburg	Sty@E-Technik.Uni-Magdeburg.de
Andreas Sumper	CITCEA	sumper@citcea.upc.es
Roman Targosz	PCPC	cem@miedz.org.pl
Hans van den Brink	Fluke Europe	hans.van.den.brink@fluke.nl

Prof Zbigniew Hanzelka

AGH-UST
Al. Mickiewicza 30
30-059 Kraków
Poland

Tel: (012) 617 28 78
Fax: (012) 633 22 84
Email: hanzel@uci.agh.edu.pl
Web: www.agh.edu.pl

Dr eng Andrzej Bień

AGH-UST
Al. Mickiewicza 30
30-059 Kraków
Poland

Tel: (012) 617 28 73
Fax: (012) 633 22 84
Email: abien@uci.agh.edu.pl
Web: www.agh.edu.pl

PRO COBRE Connects Life.™

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

Tel./Fax: 55 11 3816-6383
e-mail: procobrebrasil@copper.org
Internet: www.procobre.org

european COPPER institute

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

Tel: 00 32 2 777 70 70
Fax: 00 32 2 777 70 79
Email: eci@eurocopper.org
Website: www.eurocopper.org