

HARMÔNICAS

NAS INSTALAÇÕES ELÉTRICAS



ÍNDICE

APRESENTAÇÃO	3
CAPÍTULO 1 - ASPECTOS GERAIS RELACIONADOS À QUALIDADE DE ENERGIA ...	5
1.1 Perturbações na amplitude da tensão	
1.2 Perturbações na frequência do sinal	
1.3 Desequilíbrios de tensão ou corrente em sistemas trifásicos	
1.4 As perturbações nas formas de ondas	
CAPÍTULO 2 - CARACTERIZAÇÃO DOS SINAIS HARMÔNICOS	11
2.1 Definição	
2.2 Ordem, frequência e sequência das harmônicas	
2.3 Espectro harmônico	
2.4 Taxa de distorção harmônica total (THD)	
2.5 Fator de potência e $\cos\phi$	
2.6 Fator de desclassificação (K)	
2.7 Fator de crista (FC)	
CAPÍTULO 3 - ASPECTOS GERAIS SOBRE MEDIÇÕES DE HARMÔNICAS	23
3.1 Instrumentos convencionais de valor médio	
3.2 Instrumentos de valor eficaz verdadeiro (true rms)	
CAPÍTULO 4 - CARGAS GERADORAS DE HARMÔNICAS	29
4.1 Cargas lineares	
4.2 Cargas não lineares	
4.3 Exemplos de cargas geradoras de harmônicas	
CAPÍTULO 5 - EFEITOS E CONSEQUÊNCIAS DAS HARMÔNICAS	37
5.1 Aquecimentos excessivos	
5.2 Disparos de dispositivos de proteção	
5.3 Ressonância	
5.4 Vibrações e acoplamentos	
5.5 Aumento da queda de tensão e redução do fator de potência	
5.6 Tensão elevada entre neutro e terra	
CAPÍTULO 6 - COMO LIDAR COM A PRESENÇA DAS HARMÔNICAS	43
6.1 Dimensionamento dos condutores de fase e neutro na presença de harmônicas	
6.2 Dimensionamento de transformadores	
6.3 Filtros de harmônicas	
6.4 Transformadores de separação	
BIBLIOGRAFIA	66

APRESENTAÇÃO

O motivo que leva o Procobre a disponibilizar esta publicação baseia-se na evidência de que, nos últimos anos, vem crescendo vertiginosamente o emprego de equipamentos eletroeletrônicos cada vez mais sofisticados, nas instalações elétricas prediais, comerciais e industriais em geral. A presença desses equipamentos pode afetar a qualidade da energia, tornando a sua própria operação e a de outros componentes inadequada, resultando em perdas de informações, funcionamentos incorretos, disparos indesejados, etc.

O conhecimento do que são harmônicas, quais seus efeitos, como medi-las, quais as cargas que geram harmônicas e, finalmente, como conviver com elas são os principais tópicos desta publicação.

O conjunto de informações disponibilizadas neste livro não pretende esgotar o assunto, mas sim, antes de tudo, pretende ser um fator motivador para que os profissionais se aprofundem no tema. A linguagem adotada ao longo do texto busca, prioritariamente e sem prejuízo do rigor técnico que o assunto merece, que se atinja uma plena compreensão dos conceitos, evitando, ao máximo, o emprego de rebuscadas definições e equações matemáticas.

Com esta publicação, atualizada e ampliada, que substitui o primeiro Manual sobre o tema editado em 1998, o Procobre reafirma a sua missão de ser um agente difusor de informações técnicas onde o cobre está presente e que contribuem para a elevação da qualidade e segurança das instalações elétricas em geral.

PROCOBRE - Instituto Brasileiro do Cobre
São Paulo, novembro de 2001

CAPÍTULO 1

ASPECTOS GERAIS RELACIONADOS À QUALIDADE DE ENERGIA

Os valores associados aos parâmetros que caracterizam um sinal de tensão ou corrente em uma instalação elétrica podem ser alterados em função de muitos fatores, tais como: partida de motores, utilização de equipamentos eletrônicos, fornos a arco, etc. Nesses casos, dizemos que a qualidade do sinal foi afetada ou, então, dizemos que houve um problema de qualidade de energia.

Genericamente, podem ser produzidos quatro tipos de perturbações elétricas básicas em um sinal de tensão ou corrente em uma instalação elétrica:

- Perturbações na amplitude da tensão;
- Perturbações na frequência do sinal;
- Desequilíbrios de tensão ou corrente em sistemas trifásicos e;
- Perturbações na forma de onda do sinal.

Vejamos cada uma dessas perturbações.

1.1 PERTURBAÇÕES NA AMPLITUDE DA TENSÃO

A perturbação de amplitude ocorre quando, sobre um sinal perfeitamente senoidal, são produzidas variações de tensão como, por exemplo: afundamento ("sag"), interrupção, sobretensão, sobretensão transitória, flutuação, cintilação ("flicker") e subtensão.

O afundamento ("sag") se caracteriza por uma diminuição brusca da tensão, seguida por um restabelecimento após um curto intervalo de tempo. Por convenção, um afundamento dura de 10ms a 1 minuto.

A interrupção da alimentação ocorre quando a tensão é inferior a um certo limite, geralmente 1% da tensão de serviço no local.

Os afundamentos e interrupções são devidos, geralmente, a aumentos bruscos da corrente, sejam por curtos-circuitos, partidas ou comutações de cargas de elevadas potências. Essas correntes elevadas provocam quedas de tensão acentuadas na instalação que desaparecem quando as proteções atuam ou quando as cargas que partiram atingem seu regime permanente. Os equipamentos mais afetados por afundamentos ou interrupções são os dispositivos eletrônicos de potência, lâmpadas de descarga, computadores, dispositivos de proteção e controle, etc.

A sobretensão é uma tensão com valor eficaz superior a um dado valor da tensão de alimentação (normalmente aceita-se como 10%) e pode ser de curta ou longa duração, sendo, em geral, as de curta duração de maior intensidade do que as de longa duração.

A sobretensão transitória (também chamada de transitórios ou de impulsos transitórios) é de curta duração (no máximo alguns mili segundos) e, geralmente, apresenta um forte amortecimento em sua forma de onda.

As sobretensões são, via de regra, geradas pela entrada em serviço de grupos geradores, conexões e desconexões de certos elementos da instalação, comutações em bancos de capacitores, operação de retificadores controlados, variadores de velocidade, lâmpadas de descarga, atuação de dispositivos de proteção, descargas atmosféricas, etc. Os transformadores e motores suportam, geralmente, o impulso transitório, porém, dependendo da sua quantidade e intensidade, a vida desses equipamentos pode ser seriamente comprometida. Os equipamentos de eletrônica de potência, fontes de alimentação de computadores ou retificadores podem ser danificados pelo excesso de tensão ou, no caso de suportarem o impulso, pode ocorrer nos circuitos internos a perda de programas, dados ou destruição de discos rígidos. As placas de comunicação dos equipamentos também são muito sensíveis a esses transitórios.

A flutuação de tensão caracteriza-se por uma série de variações na amplitude do sinal, periódicas ou aleatórias, numa faixa que, via de regra, situa-se em mais ou menos 10% em torno do valor nominal. O efeito mais visível da flutuação é a variação da luminosidade das lâmpadas.

A cintilação (flicker) pode ser notada pela sensação visual de que a luminosidade está variando no tempo.

A flutuação e a cintilação têm origem em cargas que apresentam variações rápidas no seu funcionamento, as quais se traduzem em quedas de tensão na rede (flutuação) ao longo do tempo. Entre os equipamentos que mais provocam essas perturbações estão as máquinas de soldar por resistência, os motores durante a partida, a conexão e desconexão de grandes cargas, as partidas de lâmpadas a descarga, os aparelhos eletrodomésticos com regulação automática (de tempo, temperatura, etc.) e outros.

Quando a flutuação ocorre com uma forte queda de tensão, normalmente chamada de subtensão, os transformadores e máquinas girantes sofrem aquecimentos anormais devidos ao aumento da corrente provocado pelas cargas de potência ou torque constantes. Esse efeito pode se agravar em instalações elétricas sub-dimensionadas.

Como atualmente existem diversas tentativas de definições para as perturbações de tensão, a figura 1 apresenta aquela adotada pela (ITIC) Information Technology Industry Council, antes conhecida como CBEMA (Computer & Business Equipment Manufacturers Association).

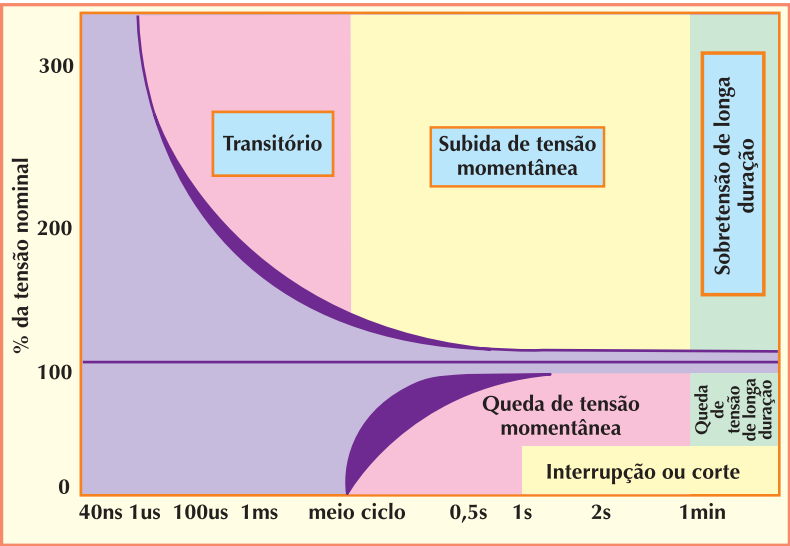


Figura 1 - Curva CBEMA.

1.2 PERTURBAÇÕES NA FREQUÊNCIA DO SINAL

As perturbações de frequência são variações em torno do valor nominal e são causadas, geralmente, por problemas nos sistemas de geração e transmissão de energia elétrica. Provocam a atuação de protetores de sub frequência (quando existirem é claro) e o incorreto funcionamento de motores. Também podem ocorrer em sistemas que possuam grupos geradores e sistemas de cogeração. Felizmente, as perturbações na frequência do sinal não são tão comuns nas instalações elétricas em geral.

1.3 DESEQUILÍBRIOS DE TENSÃO OU CORRENTE EM SISTEMAS TRIFÁSICOS

Os desequilíbrios de tensão são produzidos nos sistemas trifásicos quando existem diferenças significativas entre os valores eficazes das tensões presentes na instalação. Os desequilíbrios de corrente ocorrem quando as intensidades que circulam pelas três fases não são iguais, provocando uma corrente diferente de zero pelo condutor neutro. O resultado dessa circulação de corrente é um aquecimento geral nos componentes da instalação. Matematicamente, o desequilíbrio de corrente pode ser calculado pela seguinte expressão:

Desequilíbrio (%)

$$\frac{[I_{\max(R,S,T)} - I_{\text{média}}]}{I_{\text{média}}}$$

x 100%



O desequilíbrio de tensão pode ser calculado pela mesma expressão, apenas substituindo-se "I" por "U" na fórmula.

Geralmente, admite-se nas instalações elétricas um desequilíbrio de corrente máximo de 10% e de tensão entre 2% e 3%.

A título de exemplo, vamos supor um alimentador trifásico de um quadro onde os condutores são percorridos pelas correntes indicadas na figura 2.

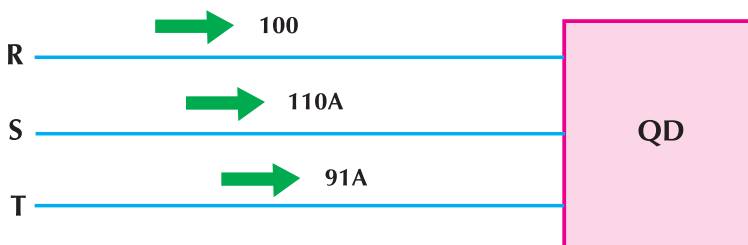


Figura 2 - Exemplo de desequilíbrio de correntes.

Nesse caso, o desequilíbrio de corrente pode ser calculado por:

$$I_R = 100A, I_S = 110A, I_T = 91A, \longrightarrow I_{\max(R,S,T)} = I_S = 110A$$

$$I_{\text{média}} = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} = 100,3A$$

$$\text{Desequilíbrio (\%)} = \frac{110 - 100,3}{100,3} \times 100\% = 9,6\%$$

1.4 AS PERTURBAÇÕES NAS FORMAS DE ONDAS

As perturbações harmônicas tornaram-se importantes a partir da década de noventa, quando a proporção de utilização de equipamentos eletrônicos e elétricos começou a se equiparar. Geralmente, os usuários reclamam das concessionárias de energia elétrica em relação à qualidade da energia fornecida, porém, na maioria dos casos, são os próprios equipamentos ligados à instalação que provocam a deterioração da qualidade da energia. Equipamentos como computadores pessoais, reatores eletrônicos, variadores de velocidade e fontes de alimentação em geral são exemplos de cargas que têm seu funcionamento baseado em componentes de eletrônica de potência tais como: diodos, tiristores, transistores, triacs, diacs, etc.

É incontestável que todos esses equipamentos simplificam a execução de nossas tarefas, aumentam a produtividade, oferecem momentos de lazer, dentre outras vantagens, porém trazem consigo o inconveniente de provocar deformações nas formas de onda presentes nas instalações elétricas, o que resulta nas chamadas tensões e correntes harmônicas.

CAPÍTULO 2

CARACTERIZAÇÃO DOS SINAIS HARMÔNICOS

2.1 DEFINIÇÃO

Uma tensão ou corrente harmônica pode ser definida como um sinal senoidal cuja frequência é múltiplo inteiro da frequência fundamental do sinal de alimentação.

A forma de onda de tensão ou de corrente em um dado ponto de uma instalação pode ter o aspecto do sinal T que está mostrado na figura 3 (onda deformada). Observando essa situação, vemos que o sinal T é a soma ponto a ponto dos sinais 1 e 5 formados por senóides perfeitas de amplitudes e frequências diferentes, chamadas de harmônicas. Com efeito, é possível construir o sinal T a partir dos valores dos sinais 1 e 5 indicados na tabela 1.

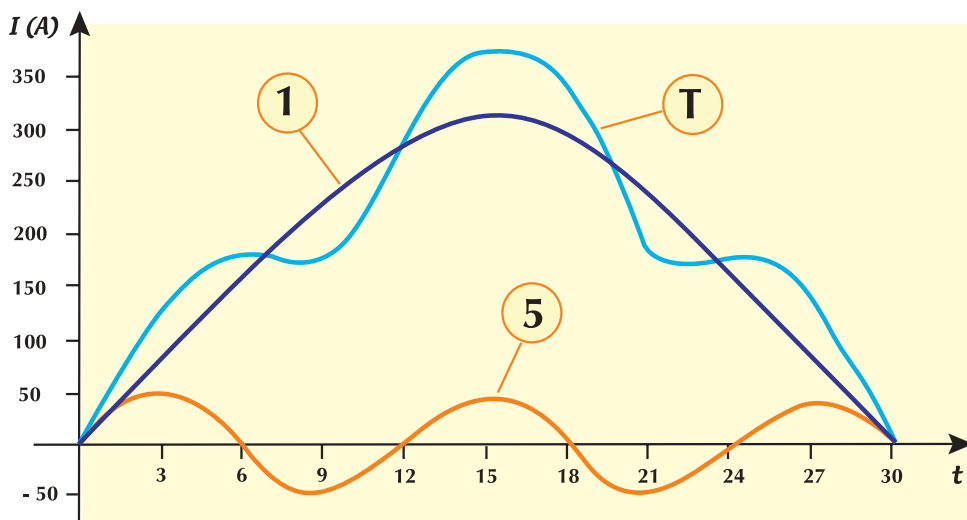


Figura 3 - Onda deformada e suas componentes harmônicas.

t	Sinal 1 (A)	Sinal 5 (A)	Sinal T (A) sinal 1+sinal 5
3	90	50	140
6	190	0	190
9	230	-50	180
12	300	0	300
15	310	50	360
18	300	0	300
21	230	-50	180
24	190	0	190
27	90	50	140
30	0	0	0

Tabela 1 - Valores para os sinais 1, 5 e T da figura 3.

Dessa forma, podemos dizer que um sinal periódico contém harmônicas quando a forma de onda desse sinal não é senoidal ou, dito de outro modo, um sinal contém harmônicas quando ele é deformado em relação a um sinal senoidal.

2.2 ORDEM, FREQUÊNCIA E SEQUÊNCIA DAS HARMÔNICAS

Os sinais harmônicos são classificados quanto à sua ordem, frequência e sequência, conforme indicado na tabela 2:

Ordem	Frequência (Hz)	Sequência
1	60	+
2	120	-
3	180	0
4	240	+
5	300	-
6	360	0
n	n * 60	—

Tabela 2 - Ordem, frequência e sequência das harmônicas.

Em uma situação ideal, onde somente existisse um sinal de frequência 60 Hz, apenas existiria a harmônica de ordem 1, chamada de fundamental.

Observando-se a tabela 2, vemos que há dois tipos de harmônicas:

- Ímpares
- Pares

As ímpares são encontradas nas instalações elétricas em geral e as pares existem nos casos de haver assimetrias do sinal devido à presença de componente contínua.

A seqüência pode ser positiva, negativa ou nula (zero). Tomando-se como exemplo um motor assíncrono trifásico alimentado por quatro condutores ($3F + N$), as harmônicas de seqüência positiva tenderiam a fazer o motor girar no mesmo sentido que o da componente fundamental, provocando, assim, uma sobrecorrente nos seus enrolamentos, que provocaria um aumento de temperatura, reduzindo a vida útil e permitindo a ocorrência de danos ao motor. Essas harmônicas de seqüência positiva provocam, geralmente, aquecimentos indesejados em condutores, motores, transformadores, etc.

As harmônicas de seqüência negativa fariam o motor girar em sentido contrário ao giro produzido pela fundamental, freando assim o motor e também causando aquecimento indesejado. Por sua vez, as harmônicas de seqüência nula, zero ou também conhecidas como homopolares, não provocam efeitos no sentido de rotação do motor, porém somam-se algebricamente no condutor neutro. Isso implica que podem ocorrer situações em que pelo condutor neutro pode circular uma corrente de terceira ordem que é três vezes maior do que a corrente de terceira ordem que percorre cada condutor fase (figura 4). Com isso, ocorrem aquecimentos excessivos do condutor neutro, destruição de bancos de capacitores, etc.

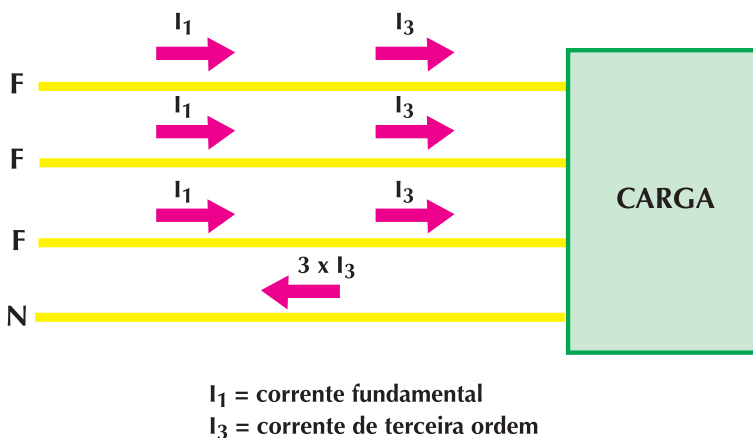


Figura 4 - A corrente no neutro é de terceira ordem com amplitude três vezes maior do que a corrente de terceira ordem de cada uma das fases (supondo as correntes fundamentais das fases de mesma amplitude = sistema equilibrado na freqüência fundamental).

2.3 ESPECTRO HARMÔNICO

O chamado “espectro harmônico” permite decompor um sinal em suas componentes harmônicas e representa-lo na forma de um gráfico de barras, onde cada barra representa uma harmônica com sua frequência, valor eficaz e defasagem.

O espectro harmônico é uma representação da forma de onda no domínio da frequência. Teoricamente, o espectro harmônico de um sinal deformado qualquer chegaria ao infinito. Na prática, geralmente limita-se o número de harmônicas a serem medidas e analisadas por volta da ordem número 40, uma vez que, raramente, os sinais acima dessa ordem são significativos a ponto de poderem perturbar o funcionamento de uma instalação.

A figura 5 mostra a forma de onda e o espectro harmônico de um sinal praticamente senoidal, enquanto que a figura 6 apresenta uma forma de onda bastante distorcida, repleta de harmônicas, sobretudo as de ordem 3, 5, 7 e 9.

Em uma instalação elétrica onde haja a presença predominante de sinais em corrente alternada, o espectro apresenta apenas harmônicas de ordem ímpar, enquanto que as harmônicas de ordem par são encontradas nas instalações com sinais deformados em corrente contínua.

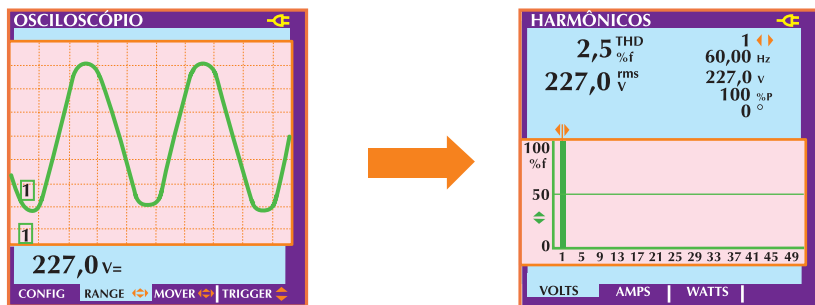


Figura 5 - Forma de onda e espectro de um sinal praticamente senoidal.

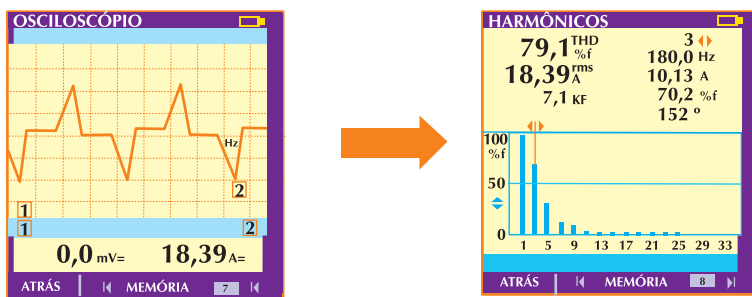


Figura 6 - Forma de onda e espectro de um sinal fortemente distorcido.

2.4 TAXA DE DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL (THD)

A THD é definida em consequência da necessidade de se determinar numericamente as harmônicas presentes em um dado ponto da instalação. Há duas formas de se quantificar a THD:

$$THD_f = \frac{\sqrt{(h_2)^2 + (h_3)^2 + (h_4)^2 + \dots + (h_n)^2}}{h_1} \times 100\%$$

$$THD_r = \frac{\sqrt{(h_2)^2 + (h_3)^2 + (h_4)^2 + \dots + (h_n)^2}}{\sqrt{(h_1)^2 + (h_2)^2 + (h_3)^2 + (h_4)^2 + \dots + (h_n)^2}} \times 100\%$$

Onde h_1, h_2, \dots, h_n representam o valor eficaz das harmônicas de ordem 1, 2, ..., n.

A THD_r representa o grau de distorção harmônica total em relação ao sinal total, enquanto que a THD_f indica a distorção harmônica total em relação à componente fundamental.

Em ambas equações, é possível verificar que, na ausência de componentes harmônicas ($h_2, h_3, \dots, h_n = 0$), a $THD = 0$. Dessa forma, devemos buscar nas instalações elétricas os valores de THD mais próximos de zero possíveis.

No Brasil, não há ainda valores normalizados para THD_f nas instalações elétricas. Nesse caso, uma sugestão é adotar, por exemplo, os valores máximos expressos na norma IEEE 519-2 (ver item 6.3).

São definidos dois valores para THD, sendo um para tensão (THDU) e outro para corrente (THDI), os quais indicam, respectivamente, o grau de distorção das ondas de tensão e corrente, quando comparadas com as senóides puras.

É importante lembrar que a distorção de corrente, indicada pela THDI , é provocada pela carga, ao passo que a distorção de tensão (THDU) é produzida pela fonte geradora como consequência da circulação de correntes distorcidas pela instalação. Isso provoca uma espécie de “efeito de bola de neve” uma vez que, se a tensão é deformada, as correntes nas cargas também se deformam e, se as correntes se deformam, as tensões se deformam mais ainda e assim por diante (lembre-se de que $U = Z \times I$).

Para exemplificar, vamos determinar o valor de THD_f para um sinal de corrente que possua as seguintes características medidas em um dado ponto do circuito:

Ordem	Valor em A
h_1	3,63
h_3	2,33
h_5	0,94
h_7	0,69
h_9	0,50
h_{11}	0,41
h_{13}	0,33
Total	4,53

Tabela 3 - Exemplo de correntes harmônicas em um dado sinal.

Da tabela 3, temos:

$$\text{THD}_f = \frac{\sqrt{(2,33)^2 + (0,94)^2 + (0,69)^2 + (0,50)^2 + (0,41)^2 + (0,33)^2}}{3,63} \times 100\% = 74,5\%$$

A figura 7 mostra o sinal de corrente e o seu respectivo espectro relativo ao exemplo anterior. Deve-se notar que a onda em questão é bastante deformada em relação a uma senóide pura, o que pode ser verificado pelo alto valor de THD_f obtido.

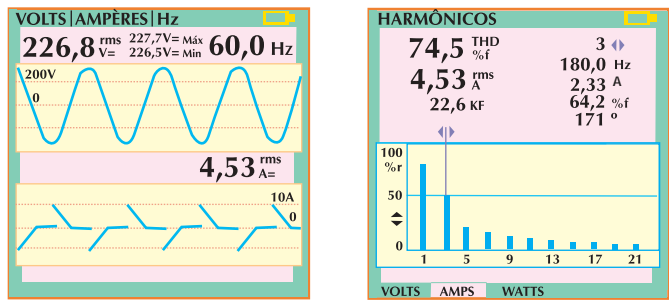


Figura 7 - Forma de onda de corrente e seu espectro ($THD_f = 74,5\%$).

Para uma maior sensibilização em relação ao significado do valor de THD_f e a forma de onda associada, a figura 8 mostra uma onda quase senoidal pura, com $THD_f = 2,5\%$, enquanto que a figura 9 mostra uma onda distorcida com $THD_f = 79,1\%$.

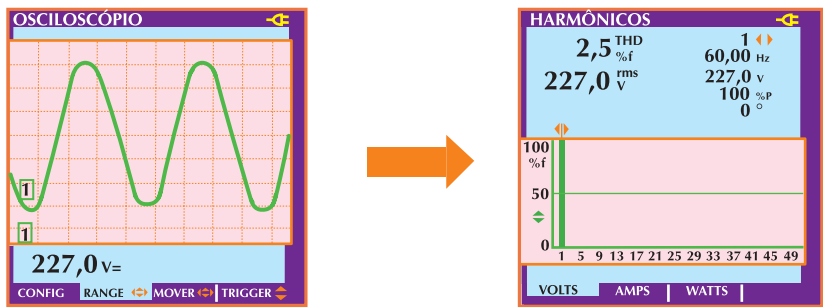


Figura 8 - Forma de onda e espectro de um sinal praticamente senoidal ($THD_f = 2,5\%$).

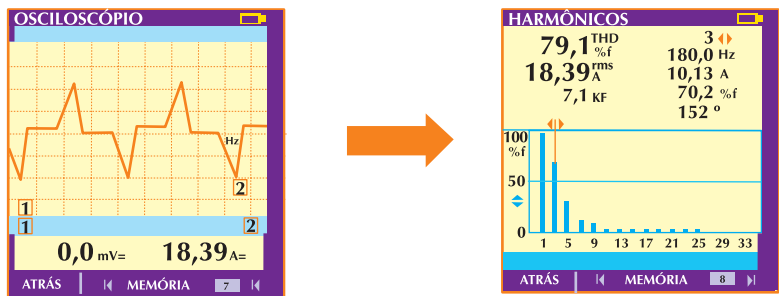


Figura 9 - Forma de onda e espectro de um sinal fortemente distorcido ($THD_f = 79,1\%$).



2.5 FATOR DE POTÊNCIA E $\cos\phi$

Normalmente, utilizamos os termos fator de potência e $\cos\phi$ como sinônimos, o que somente é apropriado no caso de não existirem harmônicas no circuito, ou seja, se os sinais forem senoidais puros.

O fator de potência (fp) é a relação entre a potência ativa e a potência aparente definido para um sinal periódico não senoidal:

$$fp = \frac{P \text{ (W)}}{S \text{ (VA)}}$$

O $\cos\phi$ é a relação entre a potência ativa e a potência aparente definido para cada uma das componentes harmônicas (senoidais):

$$\cos\phi_n = \frac{P_{hn} \text{ (W)}}{S_{hn} \text{ (VA)}}$$

Geralmente, mede-se o $\cos\phi$ da componente fundamental e o fator de potência do sinal deformado (total). Neste caso, em circuitos que apresentam valores de fator de potência e $\cos\phi$ muito diferentes entre si possuem uma forte quantidade de harmônicas tanto de corrente quanto de tensão. Isso pode causar aquecimentos excessivos generalizados na instalação e, sobretudo, sérias avarias em bancos de capacitores. Ao contrário, valores muito próximos de fator de potência e $\cos\phi$ indicam a pequena presença de harmônicas nos circuitos.

A figura 10 mostra as formas de onda de tensão e corrente verificadas em um dado ponto de uma instalação, onde pode-se observar na indicação do instrumento os valores de $fp = 0,70$ e $\cos\phi = 0,87$.

Repare como a forma de onda da corrente é bastante distorcida (repleta de harmônicas).

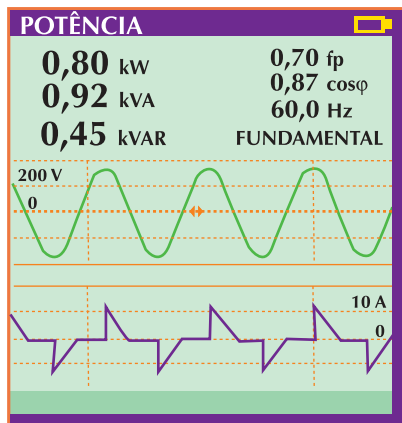


Figura 10 - Forma de onda com diferença significativa entre fator de potência e $\cos\phi$.

2.6 FATOR DE DESCLASSIFICAÇÃO (K)

As subestações de baixa tensão são especialmente sensíveis às harmônicas de corrente que provocam sobreaquecimentos e possíveis defeitos nos equipamentos. Historicamente, a potência nominal e o calor que um transformador dissipa em regime de plena carga são calculados com base na hipótese de que o sistema é composto por cargas lineares que, por definição, não produzem harmônicas. No entanto, se pelo transformador circular uma corrente que contenha harmônicas, ele sofrerá um aquecimento adicional, que poderá levá-lo a uma avaria.

O fator K é um fator de desclassificação definido para os transformadores que indica quanto se deve reduzir a potência máxima de saída quando existirem harmônicas.

A expressão matemática aproximada mais usual para o fator K é definida por:

$$K = \frac{I_{\text{pico}}}{I_{\text{rms}} \sqrt{2}} = \frac{FC}{\sqrt{2}}$$

E a máxima potência fornecida por um transformador é dada por:

$$S_{\max} = \frac{S_{\text{nom}}}{K}$$

Para a utilização dessa expressão, deve-se determinar, por medição (no caso de instalações existentes) ou por cálculo (no caso de projetos), o valor de pico e a corrente eficaz em cada fase do secundário do transformador, calcular então as médias desses valores e com elas entrar na expressão anterior.

Assim, por exemplo, se o fator K determinado para um certo transformador de potência nominal 1000 kVA vale 1,2, então a máxima potência que esse equipamento poderia fornecer sem que houvesse seu sobreaquecimento seria igual a $1000 / 1,2 = 833$ kVA.

A expressão para a determinação do valor de K é aproximada, uma vez que ela não considera todas as componentes harmônicas existentes na instalação. No entanto, ela permite uma adequada aproximação para se determinar a máxima potência disponível por um transformador sujeito à influência da distorção na forma de onda de corrente. Uma fórmula mais completa que define o fator K pode ser obtida, por exemplo, no documento HD428.4 S1 da CENELEC.

No capítulo 6, será apresentada a forma prática de utilização do fator K para transformadores.

2.7 FATOR DE CRISTA (FC)

O fator de crista (FC) é definido como a relação entre o valor de pico e o valor eficaz de um sinal, ou seja:

$$FC = \frac{I_{\text{pico}}}{I_{\text{rms}}}$$

Quando um sinal é perfeitamente senoidal, essa relação é igual a:

$$FC = \sqrt{2} = 1,414$$

Para entendermos melhor o efeito do fator de crista, vamos recorrer à observação dos dois sinais de corrente indicados na figura 11. O sinal indicado por número 1 corresponde à corrente na entrada de um conversor de frequência monofásico e o sinal 2 refere-se ao de uma senóide pura com valor eficaz igual ao do sinal 1.

Por medição, obtiveram-se os seguintes valores para os dois sinais:

	Sinal 1	Sinal 2
Corrente de pico (A)	7,45	2,63
Corrente rms (A)	1,86	1,86
Fator de crista (FC)	4,000	1,414

Tabela 4 - Valores relativos aos sinais da figura 11.

Observando-se os valores da tabela 4, concluímos que, para um mesmo valor eficaz, a corrente de pico pode ser muito diferente, dependendo do grau de deformação da onda. No caso do exemplo, a corrente de pico do sinal 1 é quase três vezes maior do que o do sinal 2, mesmo ambas tendo o mesmo valor eficaz. Isso nos ensina que, nos circuitos onde há a presença de harmônicas, o valor eficaz da tensão ou da corrente por si só é uma informação pouco significativa. Nesses casos, é muito importante conhecermos o tipo de sinal que se está medindo, seu valor de pico e sua distorção harmônica total (THD).

Essa é a melhor forma de se quantificar o conteúdo de harmônicas em um dado ponto de medida considerado. A visualização desses dados por meio de um gráfico de barras permite ao profissional a realização de ações corretivas em relação àquelas harmônicas que mais prejudicam a qualidade do sinal, a instalação elétrica em geral e os componentes, equipamentos e máquinas e dispositivos elétricos e eletrônicos presentes.

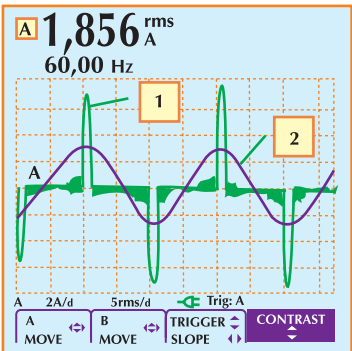


Figura 11 - Os sinais 1 e 2 têm o mesmo valor eficaz, mas apresentam fatores de crista muito diferentes.



CAPÍTULO 3

ASPECTOS GERAIS SOBRE MEDIÇÕES DE HARMÔNICAS

Os instrumentos usuais de medição de tensão e corrente são projetados e construídos para uma adequada leitura de sinais perfeitamente senoidais (que estão cada vez mais raros de serem encontrados). No caso da presença de harmônicas, as leituras desses aparelhos podem apresentar erros grosseiros que levam o profissional a tirar conclusões erradas sobre o circuito analisado.

Para entendermos um pouco mais em detalhe o motivo pelo qual os instrumentos convencionais não são adequados quando existem harmônicas, vamos comparar o princípio de funcionamento desses aparelhos com o dos instrumentos específicos para ler sinais distorcidos.

3.1 INSTRUMENTOS CONVENCIONAIS DE VALOR MÉDIO

Os instrumentos portáteis mais usuais são os multímetros e alicates amperimétricos que foram projetados e vem sendo fabricados há anos, época em que os sinais presentes nas instalações eram predominantemente senoidais e pouco se sabia ou se ouvia falar em harmônicas. Esses instrumentos são chamados de “valor médio” e possuem um desenho otimizado em termos de construção / desempenho / preço, fazendo com que eles possam medir sinais senoidais corretamente com os erros típicos associados à classe de exatidão do equipamento.

Quando o sinal não é senoidal, o resultado da medição pode ser muito diferente do valor eficaz real da tensão ou corrente que se está medindo. A explicação para essa diferença está no método de medição que se utiliza para calcular o valor eficaz.

Os instrumentos de valor médio empregam a relação que existe entre o valor eficaz e o valor médio em meio período para calcular o valor eficaz do sinal. Esse tipo de instrumento utiliza sempre o coeficiente 1,11 que relaciona o valor eficaz com o valor médio em meio período de um sinal senoidal, ou seja, o valor médio de um sinal retificado. É importante entendermos que esse coeficiente somente é válido quando o sinal é senoidal.

A figura 12 mostra um circuito típico utilizado pelos equipamentos convencionais. Basicamente, o circuito é constituído por uma ponte de diodos que retifica o sinal, um circuito amplificador que multiplica o sinal por 1,11 e um circuito que calcula o valor médio. O resultado é um número que coincide com o valor eficaz, independentemente da frequência e do valor do sinal, desde que o sinal não contenha harmônicas.

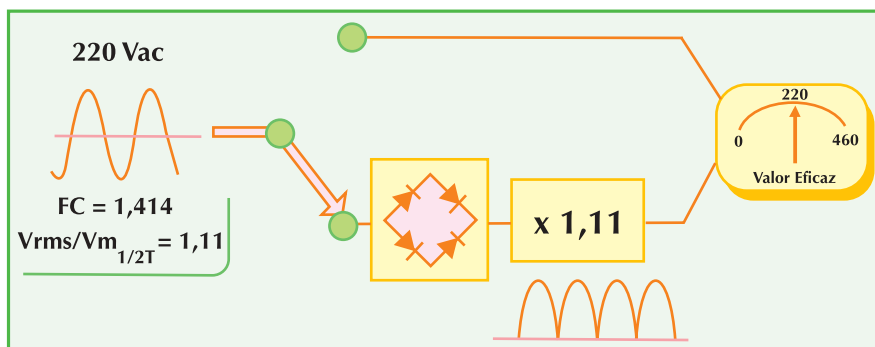


Figura 12 - Circuito típico de um instrumento de valor médio medindo um sinal senoidal.

A figura 13 mostra o mesmo instrumento anterior, porém submetido a um sinal distorcido (com harmônicas). No caso dessa forma de onda, a relação entre o valor eficaz e o valor médio do sinal retificado é igual a 2,1, sendo que o amplificador do instrumento multiplica o sinal sempre por 1,11.

No caso desse circuito, a indicação do multímetro seria 116V, enquanto que o valor correto deveria ser 220V, ou seja, um erro de mais de 50% na indicação. Uma situação como essa pode explicar porque algumas vezes disjuntores com corrente nominal 15 A abrem um circuito onde se mede 12 A com um instrumento convencional. Na realidade, a corrente nesse caso pode ser de 18 A!

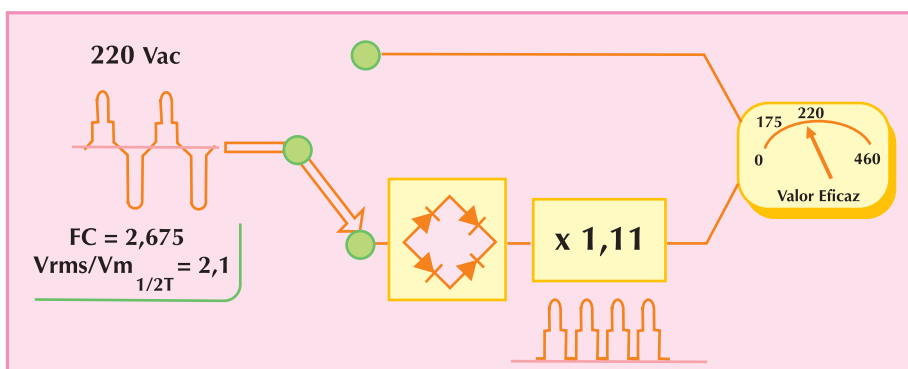


Figura 13 - Circuito típico de um instrumento de valor médio medindo um sinal com harmônicas.

3.2 INSTRUMENTOS DE VALOR EFICAZ VERDADEIRO ("TRUE RMS")

Os instrumentos de valor eficaz verdadeiro, também chamados de TRUE RMS, surgiram como consequência da necessidade de se medir o valor eficaz de sinais que não eram senoidais, ou seja, que continham harmônicas.

Os circuitos de entrada desses multímetros e alicates amperimétricos podem variar em função do fabricante do aparelho. Uns aplicam a fórmula matemática para cálculo do valor eficaz, outros calculam o aquecimento efetivo, etc.

A figura 14 mostra um exemplo de circuito de um instrumento de valor eficaz verdadeiro, onde podemos ver dois transistores e um amplificador operacional. Quando o aquecimento produzido por um sinal em corrente contínua é equivalente ao gerado pelo sinal alternado que se deseja medir, o circuito operacional deixa passar um valor de contínua equivalente ao valor de alternada. Esse é o Valor Eficaz Verdadeiro do sinal.

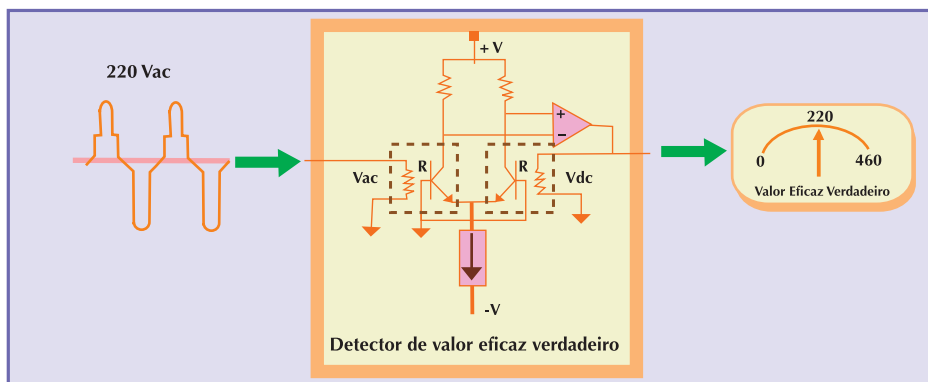
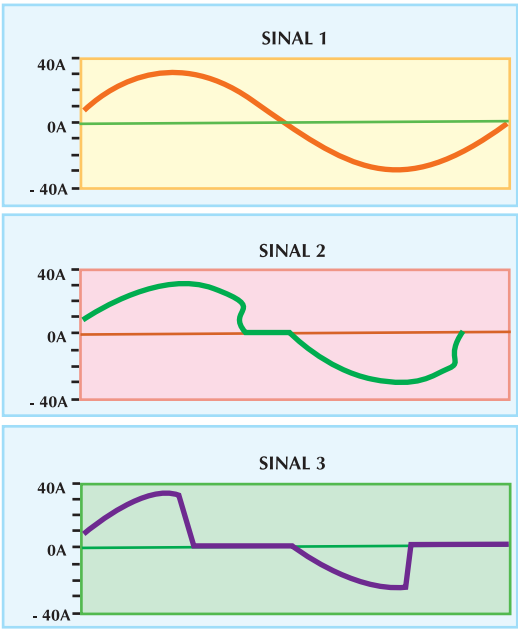


Figura 14 - Circuito de entrada típico de um instrumento de valor eficaz verdadeiro.

Uma especificação importante no caso dos aparelhos de valor eficaz verdadeiro é a sua largura de banda. Ela refere-se à faixa de frequências do sinal dentro da qual o medidor é capaz de realizar medidas confiáveis. Essa largura de banda é similar a um filtro passa-baixa. Normalmente, é necessário um equipamento de medição de, pelo menos, 1kHz (até a 17ª harmônica) de largura de banda para realizar medições de formas de onda distorcidas em ambientes comerciais e industriais.

Como exemplo, a figura 15 mostra três sinais medidos com instrumentos de valor eficaz verdadeiro e de valor médio, considerando-se ambos com a mesma classe de exatidão. Pode-se observar que à medida que o sinal se deforma, o erro do instrumento de valor médio vai aumentando.



	Sinal		
	1	2	3
Instrumento de valor eficaz verdadeiro (A)	22,0	21,3	16,8
Instrumento de valor médio (A)	22,0	19,5	12,4
$I_{rms} / I_{médio}$ em meio período	1,11	1,21	1,5
Fator de crista (FC)	1,41	1,46	1,86
Erro (%)	0	9	26

Figura 15 - Sinais com diferentes graus de distorção e valores medidos pelos instrumentos.

A tabela 5 resume, para três tipos de sinais, os erros que se podem cometer utilizando instrumentos de medição de valor médio (convencionais) e de valor eficaz verdadeiro (true rms).

Tipo de onda	Senoidal (sem harmônicas)	Quadrada (com harmônicas)	Pulsante (com harmônicas)
Instrumento de valor médio	Medida correta	Medida 10% superior ao valor real	Medida até 40% inferior ao valor real
Instrumento de valor eficaz verdadeiro	Medida correta	Medida correta	Medida correta

Tabela 5 - Comparação entre diferentes tipos de sinais e de instrumentos.

Em resumo, o uso de instrumentos de valor eficaz verdadeiro (figura 16) nas instalações elétricas modernas é indispensável para todos aqueles que precisam diagnosticar os problemas causados pelas harmônicas e apontar soluções adequadas.



Figura 16 - Exemplo de instrumento de valor eficaz verdadeiro (cortesia Fluke do Brasil).



CAPÍTULO 4

CARGAS GERADORAS DE HARMÔNICAS

4.1 CARGAS LINEARES

Genericamente, são consideradas cargas lineares aquelas constituídas por resistências, indutâncias e capacitâncias, onde as formas de onda de tensão e corrente são sempre senoidais.

Por exemplo, se a carga é um motor de 1/6 de cv, rendimento de 80% e fator de potência 0,85, a tensão e corrente possuem a forma de onda da figura 17.

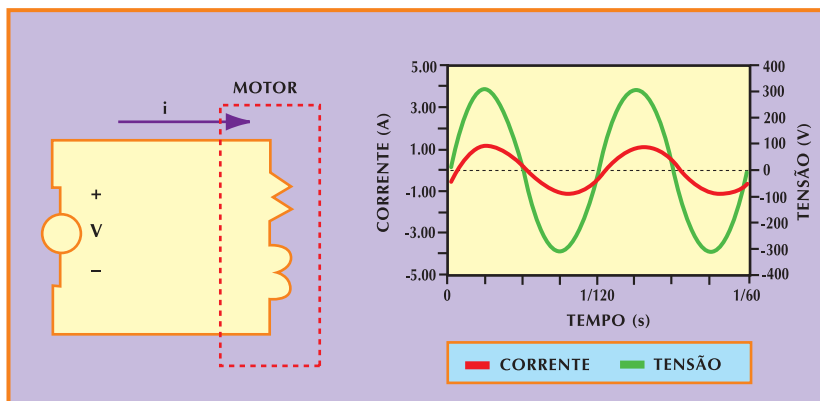


Figura 17 - Consumo de um motor monofásico de 1/6 cv.

4.2 CARGAS NÃO LINEARES

A eletrônica de potência disponibilizou para os escritórios e indústrias diversos equipamentos capazes de controlar o produto final: iluminação variável, velocidade ajustável, etc.

Desse modo, aproximadamente 50% da energia elétrica passa por um dispositivo de eletrônica de potência antes que seja finalmente utilizada. Essa eletrônica faz uso de diodos, transistores e tiristores, sendo que praticamente todos eles operam em modo de interrupção.

Isso significa que funcionam essencialmente em dois estados:

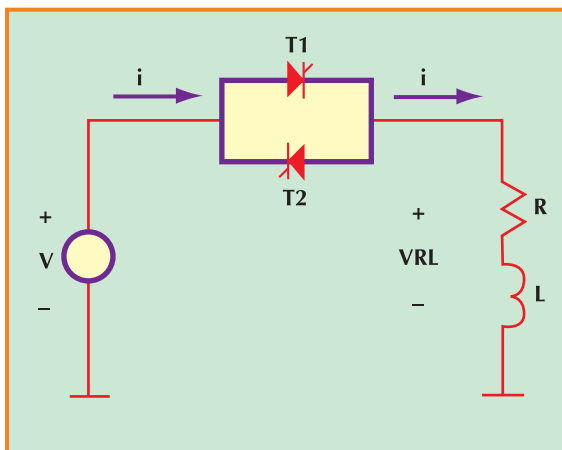


Figura 18 - Dispositivo de controle semicondutor da corrente e da tensão.

A) ESTADO DE CONDUÇÃO

Corresponde a um interruptor fechado. A corrente pelo dispositivo pode alcançar valores elevados, porém a tensão é praticamente nula e, portanto, a dissipação de potência no dispositivo é muito pequena.

B) ESTADO DE BLOQUEIO

Corresponde a um interruptor aberto. A corrente pelo dispositivo é muito pequena e a tensão é elevada e, portanto, a dissipação de potência no dispositivo também é muito pequena nesse estado.

Todos os semicondutores de potência passam rapidamente de um estado para outro através de circuitos que consomem, tipicamente, menos de 5W.

A figura 18 mostra um dispositivo para controlar a corrente em uma carga linear constituída por uma resistência e uma indutância. A tensão é interrompida pelos semicondutores e deixa de ser senoidal.

A corrente é nula em determinados intervalos de tempo. O usuário pode controlar os instantes de condução e, portanto, pode variar a tensão e a corrente no circuito.

Ao resultar na circulação de correntes não senoidais pelo circuito, fala-se então em distorção harmônica e cargas não lineares (figura 19).

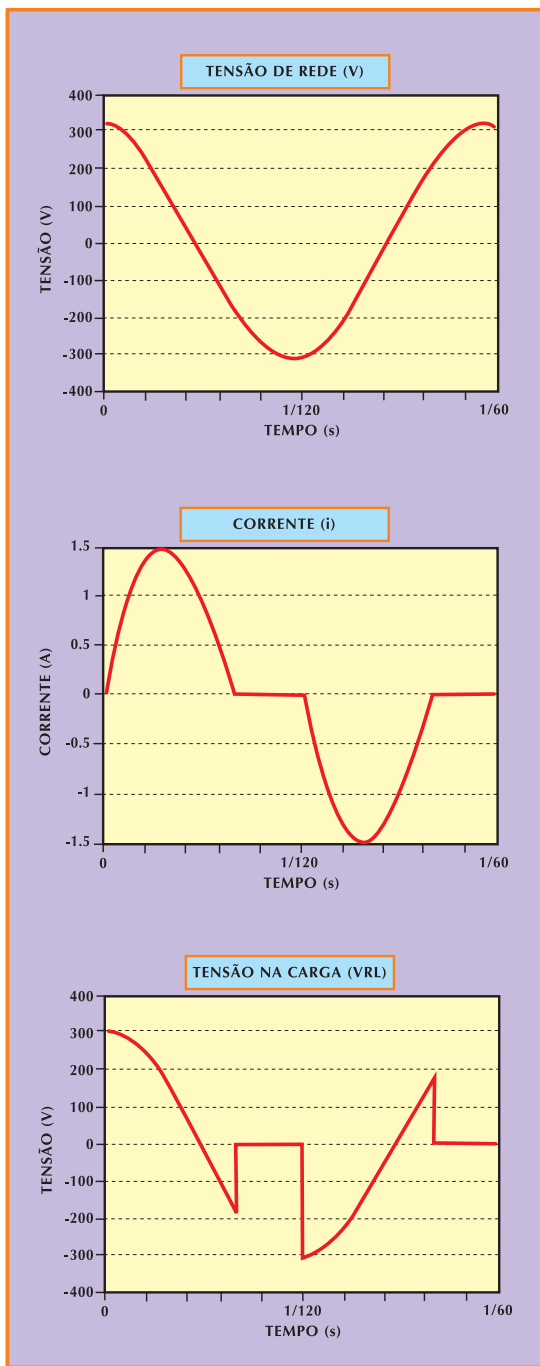


Figura 19 - Formas de onda no circuito com dispositivo de controle.

4.3 EXEMPLOS DE CARGAS GERADORAS DE HARMÔNICAS

São descritas a seguir algumas cargas (equipamentos) normalmente encontradas nas instalações elétricas de baixa tensão e que são importantes fontes de correntes harmônicas.

A) RETIFICADOR CARREGADOR

Os retificadores carregadores trifásicos são compostos por uma Ponte de Graetz que pode utilizar diodos não controlados, diodos e tiristores semicontrolados ou tiristores totalmente controlados, com forte geração de quinta e sétima harmônicas, conforme ilustrado na figura 20.

No caso do exemplo, a taxa de distorção de corrente é de 30%, sendo 28% para a 5ª harmônica, 5% para a 7ª e 6% para a 11ª, podendo-se desprezar as demais componentes.

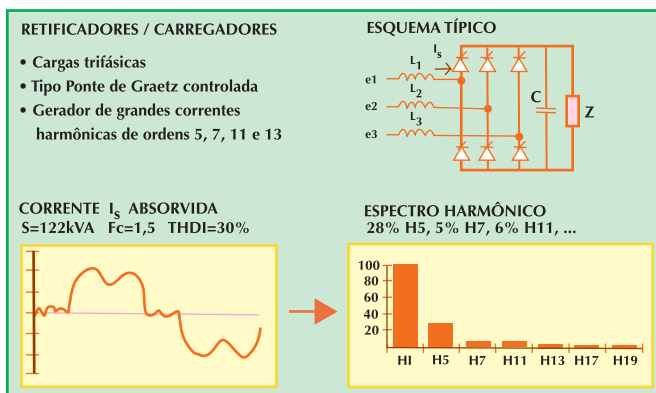


Figura 20 - Circuito retificador carregador totalmente controlado, com indutância série.

B) VARIADOR DE VELOCIDADE

Os variadores de velocidade conquistaram espaço no mercado nos últimos anos, sobretudo pelas suas elevadas qualidades na partida dos motores, com economia de energia e contribuindo para o aumento da vida útil dos mesmos.

O variador de velocidade é uma carga muito poluidora, com alto conteúdo de harmônicas, alcançando valores de distorção de corrente superiores a 100%, o que significa que a soma das harmônicas supera o valor da fundamental.

A figura 21 mostra um variador de velocidade típico, com sua forma de onda bastante deformada e um amplo espectro harmônico, com destaque para 81% de 5ª harmônica, 74% de 7ª, 42% de 11ª, além da presença de correntes de 13ª, 17ª e 19ª ordens.

A onda de corrente gerada pelo variador também apresenta um elevado fator de crista (2,8), o que sugere uma atenção especial no caso de se utilizar transformador para alimentação desses equipamentos.

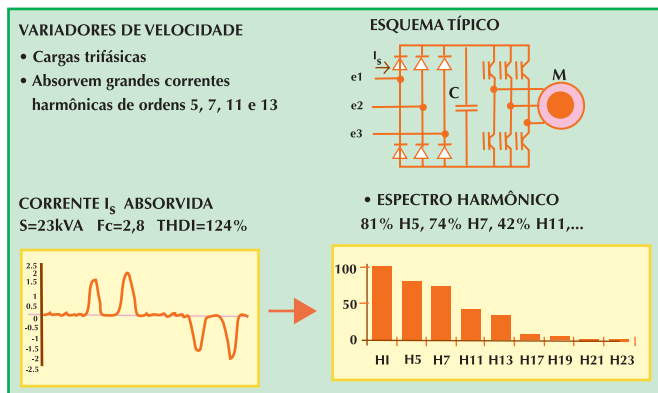


Figura 21 - Circuito típico de um variador de velocidade.

C) FONTE DE ALIMENTAÇÃO MONOFÁSICA

Esse tipo de carga é o mais disseminado nas instalações elétricas em geral, uma vez que qualquer equipamento eletrônico possui sua própria fonte de alimentação. Tratam-se de fontes comutadas, de baixo custo, que integram computadores pessoais, fotocopiadoras, impressoras, aparelhos de fax e secretárias eletrônicas, centrais telefônicas, etc.

Nos locais onde há grandes concentrações desses equipamentos, como nos edifícios comerciais e de escritórios, por exemplo, existe uma grande presença de harmônicas que podem afetar severamente a operação e o desempenho das instalações elétricas.

A figura 22 mostra um circuito típico de uma fonte monofásica, onde prevalecem a 3ª harmônica com 78% e a 5ª com 44%, além da presença da 7ª e 9ª também. O destaque é para a taxa de distorção global de 93% e para o elevado fator de crista (2,4).

Atenção especial deve ser dada à circulação de corrente de 3ª harmônica e suas múltiplas pelo condutor neutro de circuitos 3F+N.

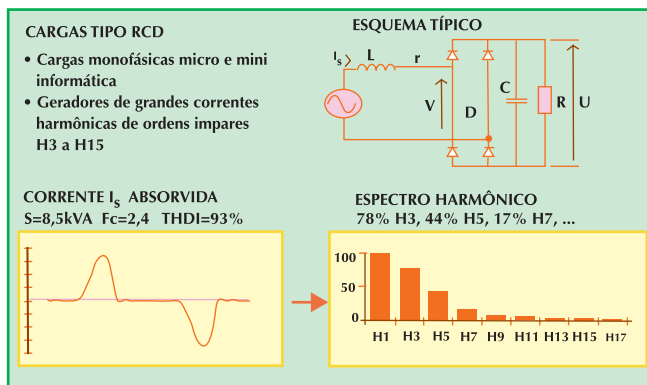


Figura 22 - Circuito típico de uma fonte de alimentação monofásica.

D) MÁQUINA DE SOLDAR ELÉTRICA

Trata-se de uma carga que apresenta um consumo de energia instável e sobre apenas uma fase. Conforme indicado na figura 23, a forma de onda da corrente gerada pela máquina de soldar tem uma certa semelhança com a forma da fonte de alimentação monofásica, porém seu tempo de consumo de energia é maior, uma vez que sua passagem por zero é de menor duração.

A taxa de distorção global é de 58% devida, sobretudo, à presença marcante da 3ª harmônica (56%), com discreta presença (9%) das harmônicas de ordem 5ª e 7ª.

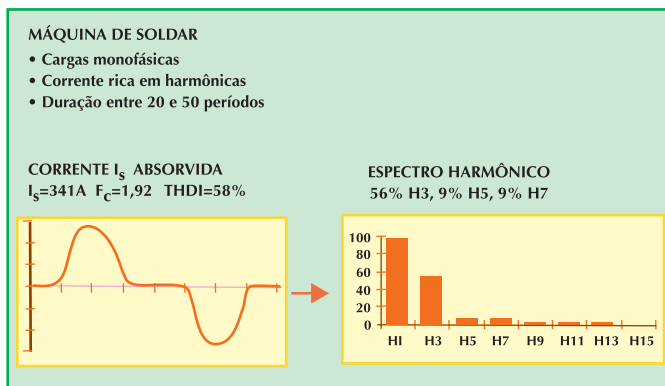


Figura 23 - Corrente absorvida e espectro harmônico para uma máquina de soldar típica.

CAPÍTULO 5

EFEITOS E CONSEQÜÊNCIAS DAS HARMÔNICAS

Qualquer sinal de corrente ou de tensão, cuja forma de onda não seja senoidal, pode provocar danos na instalação elétrica em que está presente e/ou em seus componentes e aparelhos a ela conectados.

Há vários efeitos provocados pelas harmônicas, sendo que alguns podem ser notados visualmente, outros podem ser ouvidos, outros são registrados por medidores de temperatura e ainda há os casos em que se necessitam utilizar equipamentos especiais para detectá-los.

Os principais efeitos observados em instalações e componentes submetidos à presença de harmônicas são: aquecimentos excessivos, disparos de dispositivos de proteção, ressonância, vibrações e acoplamentos, aumento da queda de tensão e redução do fator de potência da instalação, tensão elevada entre neutro e terra, etc.

Em consequência dos efeitos mencionados, podem haver problemas associados ao funcionamento e desempenho de motores, fios e cabos, capacitores, computadores, transformadores, etc.

5.1 AQUECIMENTOS EXCESSIVOS

O aquecimento é um dos efeitos mais importantes das correntes harmônicas. Pode estar presente em fios e cabos da instalação elétrica, nos enrolamentos dos transformadores, motores e geradores, etc. Devido ao “efeito pele”, à medida que a frequência do sinal de corrente aumenta (harmônicas), ela tende a circular pela periferia do condutor, o que significa um aumento da sua resistência elétrica e, conseqüentemente, das perdas por efeito Joule.

5.2 DISPAROS DE DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO

Os sinais harmônicos podem apresentar correntes com valores eficazes pequenos, porém com elevados valores de pico (alto fator de crista), o que pode fazer com que alguns dispositivos de proteção termomagnéticos e diferenciais disparem. Isso ocorre porque as correntes harmônicas provocam um aquecimento ou um campo magnético acima daquele que haveria sem a sua presença.

Em locais com grande concentração de computadores pessoais, fotocopiadoras, impressoras e outros aparelhos eletroeletrônicos são comuns haver disparos imprevistos das proteções, o que pode significar, em muitos casos, a perda de grandes quantidades de trabalhos.

Assim sendo, recomenda-se que sejam previstos circuitos separados para impressoras, fotocopiadoras e computadores. Além disso, não se devem instalar muitos computadores no mesmo circuito, evitando-se, dessa forma, a perda de operação simultânea de muitas máquinas por desligamento ocasional dos dispositivos de proteção.

Em relação aos dispositivos diferenciais, o efeito sobre eles dependerá da sua resposta em relação às correntes pulsantes.

5.3 RESSONÂNCIA

Um capacitor em paralelo com uma indutância forma um circuito ressonante capaz de amplificar os sinais de uma dada frequência. Quando em uma instalação elétrica instalamos um banco de capacitores, estamos formando um circuito ressonante, uma vez que colocamos em paralelo os capacitores e a instalação elétrica, que é de natureza indutiva. Assim, certas harmônicas podem ser amplificadas, provocando danos principalmente nos capacitores, levando-os à queima ou explosões.

Dessa forma, antes de instalar um banco de capacitores, é fundamental que sejam quantificadas as harmônicas presentes e tomadas as providências necessárias para torná-las inofensivas aos capacitores.

5.4 VIBRAÇÕES E ACOPLAMENTOS

As altas frequências das harmônicas podem provocar interferências eletromagnéticas irradiadas ou conduzidas que, por sua vez, provocam vibrações em quadros elétricos, em transformadores e/ou acoplamentos em redes de comunicações, prejudicando a qualidade da conversação ou da troca de dados e sinais em geral.

5.5 AUMENTO DA QUEDA DE TENSÃO E REDUÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

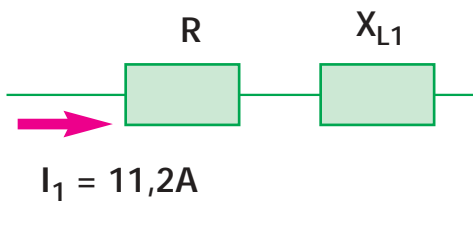
Dentre os diversos efeitos provocados pela presença de harmônicas nas instalações elétricas, dois serão detalhados a seguir, utilizando-se a representação do circuito físico pelo seu equivalente elétrico. Como estamos tratando de instalações elétricas de baixa tensão, consideraremos apenas as componentes de resistência e indutância do circuito. Os cálculos realizados a seguir são muito simples e ao mesmo tempo bastante ilustrativos a respeito do que ocorre numa instalação quando percorrida por correntes harmônicas.

Para simplificar os cálculos, consideraremos que o circuito do exemplo é poluído apenas por terceira harmônica. Vale lembrar que a resistência elétrica (R) é pouco afetada pela frequência (no exemplo, desprezaremos os efeitos pela e proximidade), porém a reatância indutiva (X_L) varia diretamente com a frequência: $X_L = 2\pi fL$.

Nos circuitos mostrados a seguir, R representa a resistência total de um circuito desde a fonte até a carga, enquanto que X_{L1} e X_{L3} representam as reatâncias indutivas totais do circuito nas frequências de 60Hz e 180Hz, respectivamente (fundamental e terceira harmônica). Observe que, para um mesmo valor de L , temos $X_{L3} = 3 X_{L1}$ uma vez que $180\text{Hz} = 3 \times 60\text{Hz}$.

A) REDUÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

• SEM HARMÔNICAS



$$R = 1\Omega \quad X_{L1} = 1\Omega$$

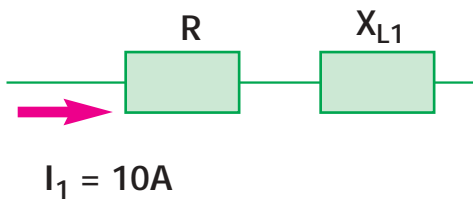
$$P_1 = R \cdot I_1^2 = 1 \cdot 11,2^2 = 125W$$

$$Q_1 = X_{L1} \cdot I_1^2 = 1 \cdot 11,2^2 = 125VAr$$

$$\text{tg}\phi_1 = Q / P = 125 / 125 = 1$$

$$\longrightarrow \cos\phi_1 = 0,71$$

• COM 3ª HARMÔNICA



$$R = 1\Omega \quad X_{L1} = 1\Omega$$

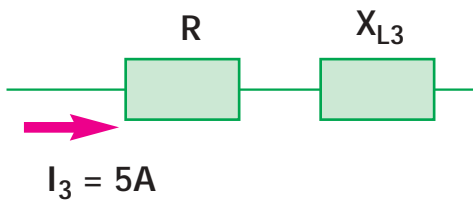
$$P_1 = R \cdot I_1^2 = 1 \cdot 10^2 = 100W$$

$$Q_1 = X_{L1} \cdot I_1^2 = 1 \cdot 10^2 = 100VAr$$

$$\text{tg}\phi_1 = Q / P = 100 / 100 = 1$$

$$\longrightarrow \cos\phi_1 = 0,71$$

+



$$R = 1\Omega \quad X_{L3} = 3\Omega$$

$$P_3 = R \cdot I_3^2 = 1 \cdot 5^2 = 25W$$

$$Q_3 = X_{L3} \cdot I_3^2 = 3 \cdot 5^2 = 75VAr$$

$$\text{tg}\phi_3 = Q / P = 75 / 25 = 3$$

$$\longrightarrow \cos\phi_3 = 0,32$$

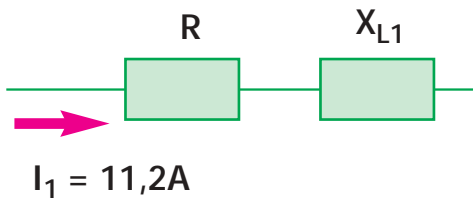
$$P_{TOTAL} = 100 + 25 = 125W$$

$$Q_{TOTAL} = 100 + 75 = 175VAr$$

$$\text{tg}\phi = Q_{TOTAL} / P_{TOTAL} = 175 / 125 = 1,4 \longrightarrow \cos\phi = 0,58$$

B) AUMENTO DA QUEDA DE TENSÃO

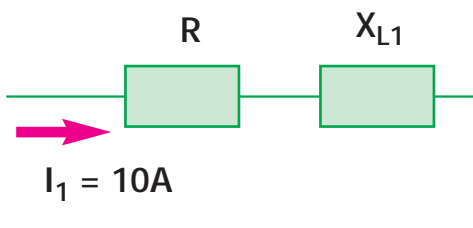
• SEM HARMÔNICAS



$$Z = \sqrt{1^2 + 1^2} = 1,4 \Omega$$

$$U_1 = 1,4 \cdot 11,2 = 16V$$

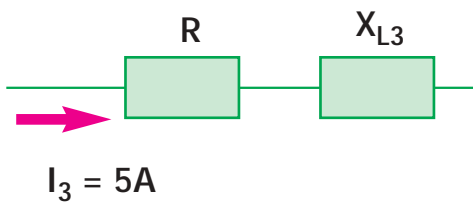
• COM 3ª HARMÔNICA



$$Z = \sqrt{1^2 + 1^2} = 1,4 \Omega$$

$$U_1 = 1,4 \cdot 10 = 14V$$

+



$$Z = \sqrt{1^2 + 3^2} = 3,2 \Omega$$

$$U_3 = 3,2 \cdot 5 = 16V$$

$$U_{TOTAL} = \sqrt{14^2 + 16^2} = 21V$$

5.6 TENSÃO ELEVADA ENTRE NEUTRO E TERRA

A circulação de correntes harmônicas pelo condutor neutro provoca uma queda de tensão entre esse condutor e a terra, uma vez que a impedância do cabo não é zero. Em alguns equipamentos eletrônicos, a presença de uma certa tensão entre neutro e terra pode prejudicar a correta operação do mesmo.

CAPÍTULO 6

COMO LIDAR COM A PRESENÇA DAS HARMÔNICAS

6.1 DIMENSIONAMENTO DOS CONDUTORES DE FASE E NEUTRO NA PRESENÇA DE HARMÔNICAS

Pensando no jeito que tradicionalmente determinamos a bitola dos condutores de uma instalação elétrica qualquer, o que muda no cálculo quando os fios e cabos são percorridos por correntes harmônicas de diferentes ordens? É preciso aumentar a seção dos condutores devido à presença das harmônicas?

Para dimensionar os cabos com harmônicas, vamos lembrar, primeiramente, como determinar a seção dos condutores sem harmônicas. Para tanto, valem os seis critérios de dimensionamento de um circuito de acordo com a NBR 5410, a saber: seção mínima, capacidade de corrente, queda de tensão, sobrecarga, curto-circuito e contato indireto (apenas para esquemas TN).

Para a aplicação desses critérios, é necessário definir a chamada corrente de projeto (I_B). Na prática, essa é a maior corrente eficaz prevista de circular num dado circuito. Essa corrente de projeto é a corrente nominal do circuito afetada por todos os fatores que se possa imaginar numa instalação, tais como: fator de demanda, fator de reserva, etc. É a partir dessa corrente de projeto que se entra na tabela de capacidade de condução dos cabos, que se calcula a queda de tensão no circuito e que se escolhe o dispositivo de proteção contra sobrecarga.

Na era “pré-harmônica” das instalações elétricas, era só obter I_B e pronto! Se o circuito em questão fosse trifásico com neutro, quase sempre era considerado equilibrado (corrente no neutro como igual a zero), determinava-se a seção dos condutores de fase e escolhíamos a seção do neutro como sendo metade da fase.

No entanto, quando existirem harmônicas em um dado circuito, elas devem ser consideradas em conjunto na obtenção do valor de I_B para aquele dimensionamento. Além disso, dependendo da ordem da harmônica, no caso de circuitos trifásicos com neutro, ao invés da corrente no neutro ser próxima de zero, ela poderá ser até três vezes o valor da fundamental da corrente de fase! Isso significa que, nestes casos, a seção do neutro deverá ser maior do que a dos condutores de fase.

Cálculo da corrente de projeto I_B em circuitos com presença de harmônicas

O valor eficaz da corrente total resultante em um circuito percorrido por correntes harmônicas de ordem 1, 2, 3, 4, ... , n é dado por:

$$I_B = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_n^2}$$

Exemplo de dimensionamento

Seja um circuito de 2 fases que alimenta um quadro de distribuição de um setor de uma instalação, conforme indicado na figura 24.

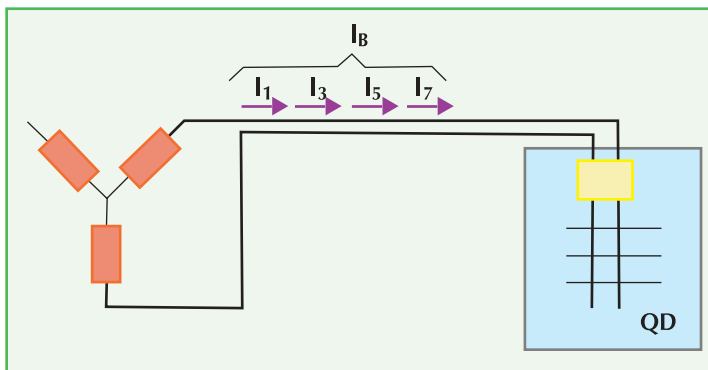


Figura 24

As correntes que estão presentes nesse circuito são de ordens 1 (fundamental), 3 (terceira harmônica), 5 (quinta) e 7 (sétima), com intensidades (valores eficazes) de, respectivamente, 110 A, 57 A, 25 A e 17 A. Nessas condições, qual o valor da corrente de projeto I_B a considerar no cálculo da seção dos condutores desse circuito?

Solução:

$$I_B = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + I_7^2} = \sqrt{(110)^2 + (57)^2 + (25)^2 + (17)^2} = 127 \text{ A}$$

Note que é esse valor de I_B que devemos utilizar para os dimensionamentos dos condutores pelos critérios de capacidade de corrente, queda de tensão e sobrecarga.

Supondo que esse circuito esteja sozinho no interior de um eletroduto aparente, com temperatura ambiente de 30°C e que sejam utilizados condutores com isolamento em PVC, determinar a seção desses condutores.

Solução:

Aplicando-se diretamente a tabela 31 da NBR 5410/97 (ver tabela 6), método de instalação B1, coluna de 2 condutores carregados (os fatores de correção por agrupamento e temperatura são, nesse caso, iguais a 1), obtemos: $S_F = 50 \text{ mm}^2$.

Observe que, se o presente dimensionamento fosse realizado sem levar em consideração a presença das harmônicas, mas tão somente o valor da corrente fundamental (110 A), a seção dos condutores resultaria em **S_F = 35mm²**.

Esse cálculo, na prática, significa que os condutores iriam operar em regime de sobrecarga, com a conseqüente redução de sua vida útil e com o eventual risco desse sobreaquecimento provocar um futuro dano à integridade da instalação.

SEÇÃO NOMINAL (mm²)	METODOS DE INSTALAÇÃO DEFINIDOS NA TABELA 28											
	A1		A2		B1		B2		C		D	
	2 condutores carregados	3 condutores carregados	2 condutores carregados	3 condutores carregados	2 condutores carregados	3 condutores carregados	2 condutores carregados	3 condutores carregados	2 condutores carregados	3 condutores carregados	2 condutores carregados	3 condutores carregados
	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
COBRE												
0,5	7	7	7	7	9	8	9	8	10	9	12	10
0,75	9	9	9	9	11	10	11	10	13	11	15	12
1	11	10	11	10	14	12	13	12	15	14	18	15
1,5	14,5	13,5	14	13	17,5	15,5	16,5	15	19,5	17,5	22	18
2,5	19,5	18	18,5	17,5	24	21	23	20	27	24	29	24
4	26	24	25	23	32	28	30	27	36	32	38	31
6	34	31	32	29	41	36	38	34	46	41	47	39
10	46	42	43	39	57	50	52	46	63	57	63	52
16	61	56	57	52	76	68	69	62	85	76	81	67
25	80	73	75	68	101	89	90	80	112	96	104	86
35	99	89	92	83	125	110	111	99	138	119	125	103
50	119	108	110	99	151	134	133	118	168	144	148	122
70	151	136	139	125	192	171	168	149	213	184	183	151
95	182	164	167	150	232	207	201	179	258	223	216	179
120	210	188	192	172	269	239	232	206	299	259	246	203
150	240	216	219	196	309	275	265	236	344	299	278	230
185	273	245	248	223	353	314	300	268	392	341	312	258
240	321	286	291	261	415	370	351	313	461	403	361	297
300	367	328	334	298	477	426	401	358	530	464	408	336

Tabela 6 - Tabela 31 da NBR 5410/97, capacidades de condução de corrente, em ampères, para métodos de referência A1, A2, B1, B2, C e D. Condutores isolados, cabos unipolares e multipolares cobre e alumínio, isolamento de PVC. Temperatura no condutor - 70°C, Temperatura ambiente - 30°C e do Solo - 20°C.

Sejam agora as mesmas correntes do exemplo anterior, porém percorrendo um circuito com 3 fases e neutro (figura 25).

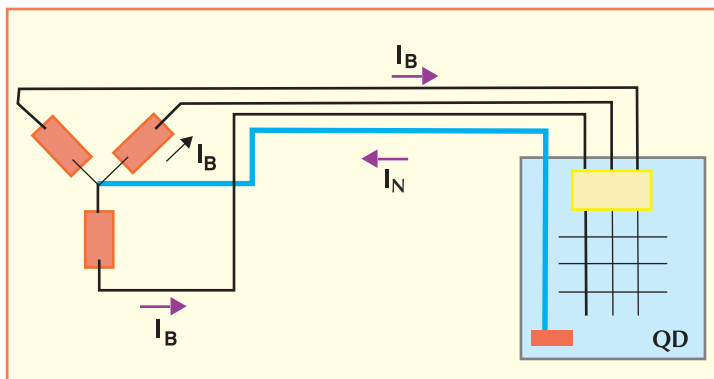


Figura 25

As correntes em cada fase são exatamente iguais, tanto a fundamental quanto as harmônicas.

Vamos determinar a corrente de projeto e dimensionar os condutores.

Solução:

Em relação à corrente de projeto I_B que percorre as fases não há nenhuma diferença no cálculo em relação ao exemplo anterior e seu valor eficaz é de 127 A.

A grande diferença neste caso, refere-se à corrente que irá circular pelo condutor neutro (I_N). Como se sabe, as correntes de ordem 3ª e seus múltiplos que circulam pelas fases somam-se algebricamente. No caso de nosso exemplo, temos apenas a corrente de terceira ordem (57 A). Desse modo, a corrente eficaz que percorrerá o neutro será:

$$I_N = 57 + 57 + 57 = 171 \text{ A}$$

Note que esse valor é 35% (171/127) maior do que a corrente de fase e 55% (171/110) maior do que a corrente fundamental.

Vejamos como ficam os dimensionamentos dos condutores nesse caso, mantendo as mesmas condições de instalação já descritas no exemplo anterior.

CONDUTORES DE FASE

Como temos um circuito 3F + N com corrente circulando no neutro, trata-se então de 4 condutores carregados. Como na tabela 31 da NBR 5410/97 (ver tabela 6), temos 2 ou 3 condutores carregados, supomos que os condutores a serem dimensionados compõem 2 circuitos de 2 condutores carregados cada um. Assim, temos um fator de correção por agrupamento igual a 0,8 (conforme tabela 35 da NBR 5410/97) e a corrente fictícia de projeto $I_B' = 127 / 0,8 = 153$ A. Entrando com esse valor na tabela 6, coluna de 2 condutores carregados, vemos que a seção dos condutores de fase será de $S_F = 70\text{mm}^2$.

CONDUTOR NEUTRO

No caso do condutor neutro, a corrente de projeto a considerar será $I_N = 171$ A, o que resulta em uma corrente fictícia de projeto de $171 / 0,8 = 214$ A, a qual nos leva a uma seção do condutor neutro de $S_N = 95\text{mm}^2$.

Observe que, se realizarmos o presente dimensionamento sem levar em consideração a presença das harmônicas, mas tão somente o valor da corrente fundamental (110 A), a seção dos condutores resultaria em $S_F = 35\text{mm}^2$. Neste caso ainda, se realizarmos o dimensionamento como “antigamente”, a tendência seria reduzir o neutro para 25mm^2 , conforme a tabela 44 da NBR 5410/97.

Em resumo, veja a grande diferença entre os dimensionamentos considerando ou não a presença de harmônicas:

	Seção do condutor de fase (mm²)	Seção do condutor neutro (mm²)
Considerando as harmônicas	70	95
Não considerando as harmônicas	35	25

Na prática, considerando a presença de harmônicas, a especificação dos condutores desse circuito seria $3 \times 70\text{ mm}^2 + 1 \times 95\text{ mm}^2$. Parece estranho especificar a seção do neutro maior que a das fases, mas na era das harmônicas é isso mesmo o que ocorre.

Ainda em relação ao dimensionamento desse circuito, vejamos como ele seria realizado se utilizarmos o item 6.2.6.4 da NBR 5410/97, que remete o cálculo para o uso da tabela 45 da mesma norma (ver box).

Neste caso, é preciso determinar a porcentagem de terceira harmônica na corrente de fase (p). Em nosso caso, como visto anteriormente, a corrente total de fase (valor eficaz) é igual a 127 A e a corrente de terceira harmônica é igual a 57 A, o que resulta em uma porcentagem $p = (57 / 127) \times 100\% = 45\%$.



Com esse valor de p , a tabela 45 nos fornece um fator de correção $f = 0,86$, sendo a escolha da seção com base na corrente de neutro, ou seja:

$$I = (1/f) \times I_B \times (p/100) \times 3 = (1/0,86) \times 127 \times (45/100) \times 3 = 199 \text{ A}$$

Entrando com 199 A na tabela 6, método B1, coluna de 3 condutores carregados, encontramos a seção do condutor de 95 mm^2 , mesmo valor obtido pelo outro modo de calcular indicado. Observe que o texto do item 6.2.6.4 é claro ao prescrever que aquela prescrição (uso da tabela 45) é válido admitindo-se que os 4 condutores do circuito (3F + N) sejam de mesmo material e tenham a mesma seção nominal.

Na prática, isso significa que esse circuito seria especificado, de acordo com a NBR 5410/97 como sendo $3 \times 95 \text{ mm}^2 + 1 \times 95 \text{ mm}^2$.

O texto a seguir reproduz as prescrições da NBR 5410/97 no que diz respeito ao dimensionamento de circuitos na presença de harmônicas.

6.2.6.4 Determinação das seções nominais de circuitos trifásicos considerando a presença de harmônicas

As prescrições que se seguem aplicam-se a circuitos trifásicos a 4 condutores, onde o desequilíbrio entre fases é inferior a 50% e onde é prevista a presença de correntes harmônicas de 3ª ordem nos condutores fase, admitindo-se que os 4 condutores sejam de mesmo material e tenham a mesma seção nominal.

A tabela 45 dá os fatores de correção que aplicados às capacidades de correção relativas a 3 condutores carregados (tabelas 31, 32, 33 e 34), fornecem os valores correspondentes a 4 condutores carregados, quando a corrente no condutor neutro é devida a harmônicas.

Tabela 45 - Fatores de correção aplicáveis a circuitos trifásicos a 4 condutores, onde é prevista a presença de correntes harmônicas de 3ª ordem

Porcentagem de 3ª harmônica na corrente de fase (%)	Fator de correção	
	Escolha da seção com base na corrente de fase	Escolha da seção com base na corrente de neutro
0-15	1,0	—
15-33	0,86	—
33-45	—	0,86
> 45	—	1,0

NOTAS

1. A tabela foi originalmente obtida para cabos tetrapolares e pentapolares, mas pode, em princípio, ser utilizada para circuitos com cabos unipolares ou condutores isolados.
2. A corrente (I) a ser utilizada para a determinação da seção dos 4 condutores do circuito, utilizando as tabelas 31, 32 ou 34 (colunas de 3 condutores carregados) é obtida pelas expressões:

- escolha pela corrente de fase: $I = I_B$

- escolha pela corrente de neutro: $I = \frac{1}{f} \times I_B \times \frac{p}{100} \times 3$

onde:

I_B = corrente de projeto do circuito

p = porcentagem da harmônica de 3ª ordem (tabela 45)

f = fator de correção (tabela 45)

6.2 DIMENSIONAMENTO DE TRANSFORMADORES

Conforme indicado no capítulo 2, a expressão matemática mais usual para o fator K é definida por:

$$K = \frac{I_{\text{pico}}}{I_{\text{rms}} \sqrt{2}} = \frac{FC}{\sqrt{2}}$$

E a máxima potência fornecida por um transformador é dada por:

$$S_{\text{max}} = \frac{S_{\text{nom}}}{K}$$

Na prática, vejamos como seria o procedimento para a determinação do fator K de um transformador. A figura 26 mostra a forma de onda medida no secundário de um transformador de 750 kVA. O aparelho utilizado informa que o fator de crista (FC) da onda de corrente é igual a 2. Isso significa que o valor de pico do sinal é duas vezes maior que o seu valor eficaz. Aplicando-se a expressão para o fator K, temos:

$$K = \frac{2}{\sqrt{2}} = 1,414$$

Isso significa que a máxima potência que o transformador em questão poderia fornecer seria igual a

$$S_{\text{max}} = \frac{S_{\text{nom}}}{K} = \frac{750}{1,414} = 530 \text{ kVA}$$

ou seja, o transformador foi desclassificado em cerca de 29% devido à presença das harmônicas na instalação.

Os instrumentos especializados em medição e análise de harmônicas facilitam a obtenção do fator K, evitando a realização dos cálculos anteriores. A figura 27 mostra a tela de um instrumento que indica o espectro harmônico de um sinal e a indicação do valor K.

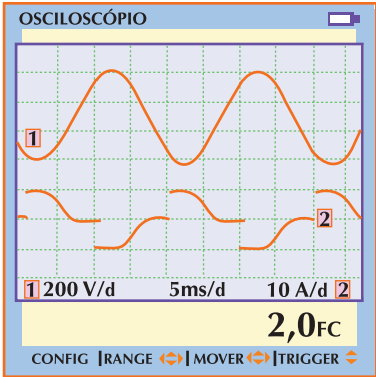


Figura 26 - Sinal com fator de crista (FC) = 2,0.

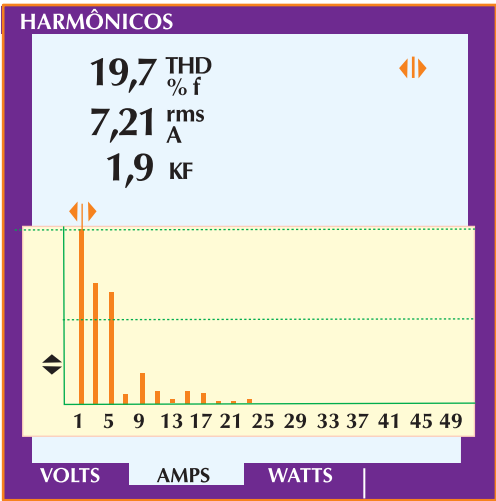


Figura 27 - Sinal medido no secundário de um transformador com fator de desclassificação K = 1,9.

6.3 FILTROS DE HARMÔNICAS

Controlar a presença das correntes harmônicas na instalação elétrica é tarefa fundamental e cada vez mais necessária nos dias atuais para estarem asseguradas as seguintes condições:

- Garantir uma distribuição elétrica “limpa”, com um baixo THDI (distorção harmônica de corrente), através da redução ou eliminação das correntes harmônicas;
- Obter valores de THDU (distorção harmônica de tensão) aceitáveis de modo a garantir que as cargas de uma instalação recebam uma alimentação praticamente senoidal. Uma prática internacionalmente aceita é limitar o THDU em torno de 5% em todos os pontos da instalação;
- Possuir uma instalação que atenda aos requisitos normativos existentes ou em preparação, tais como:

NORMAS SOBRE EMISSÃO DE EQUIPAMENTOS

- IEC 61000-3-2 para dispositivos com correntes de entrada ≤ 16 A/ por fase;
- IEC 61000-3-4 para dispositivos com correntes de entrada > 16 A/ por fase.

A norma IEC 61000-3-2 estabelece as exigências sobre harmônicas que devem ser atendidas por todos os equipamentos que consomem menos de 16A por fase em redes de 220V a 415V. Dentre esses, estão os computadores pessoais e os televisores.

A tabela 7 mostra os limites que todo equipamento com mais de 50W devem cumprir. Abaixo dessa potência, não há limite algum. A norma estabelece os limites com base nos valores eficazes (rms) de cada harmônica. A relação entre valor eficaz e valor máximo é:

$$I_{\text{rms}h} [\text{A rms}] = \frac{I_{\text{mh}} [\text{A max}]}{\sqrt{2}}$$

O valor efetivo total da soma quadrática do valor eficaz de cada harmônica é:

$$I_{\text{rms tot}} [\text{A rms}] = \sqrt{I_{\text{rms}1}^2 + I_{\text{rms}2}^2 + I_{\text{rms}3}^2 + \dots + I_{\text{rms}h}^2}$$

Limites da norma IEC 61000-3-2		
Harmônica h	Limite (mA / W)	Limite (A)
3	3,4	2,30
5	1,9	1,14
7	1,0	0,77
9	0,5	0,40
11	0,35	0,33
13 ou maior	3,85/n	0,15 . 15/n

Tabela 7

Os limites especificados na tabela 7 se aplicam, por exemplo, ao consumo de um computador pessoal que possui uma fonte de potência de 200W, com rendimento de 75%, o que resulta em uma potência absorvida da rede de $200 / 0,75 = 267W$.

A tabela 8 mostra os limites resultantes da norma. Nesse caso, como em todo equipamento menor do que 670W, o limite está imposto pelo valor em mA/W descrito na norma.

Dessa forma, normalmente os computadores provocam distorções na rede com uma corrente harmônica que é ligeiramente superior à admitida pela norma. Uma solução para o problema pode consistir, dentre outras, em instalar uma indutância (da ordem de 10 mH) em série com a fonte. Com isso, os valores se modificam e praticamente cumprem com o exigido. Em todos os casos, a norma permite injetar até 75% de harmônica de 3ª ordem, sendo essa uma situação a se considerar nos projetos dos circuitos de alimentação dos equipamentos.

Limites da norma IEC 61000-3-2 aplicados a um PC de 200W		
Harmônica h	Limite (A rms)	Onda da fig. 6b (A rms)
1	—	1,201
3	0,908	0,977 *
5	0,508	0,620 *
7	0,266	0,264
9	0,133	0,068
11	0,094	0,114 *
13	0,079	0,089 *
15	0,069	0,029
17	0,061	0,042
19	0,054	0,044
21	0,049	0,019
23	0,045	0,020

(*) valor de norma excedido

Tabela 8

NORMA SOBRE INSTALAÇÕES ELÉTRICAS

A norma IEEE 519-2 traz recomendações explícitas de limites de THDI a serem respeitados nos mais diversos pontos de uma instalação elétrica, conforme indicado na sua tabela reproduzida a seguir.

Máxima distorção de corrente harmônica em % I_B						
Ordem da harmônica individual (harmônicas ímpares)						
I_{sc}/I_B	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
< 20*	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20<50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50<100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100<1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
< 1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0
As harmônicas pares são limitadas a 25% dos limites das harmônicas ímpares indicadas acima						
* Todo equipamento de geração está limitado a esses valores de distorção de corrente independentemente da relação I_{sc}/I_B						
onde: I_{sc} = máxima corrente de curto-circuito no ponto de conexão I_B = máxima corrente de projeto (componente na frequência fundamental) no ponto de conexão						

Tabela 9 - Tabela10.3 da IEEE 519-2, limites de distorção de corrente para sistemas de distribuição em geral (120V até 69000 V).

- Conseguir uma redução na demanda em kVA, evitando assim um sobredimensionamento das fontes de alimentação (transformadores e grupos geradores);

As reduções dos valores de THDI e THDU estão interligadas e dependem da redução ou eliminação das correntes harmônicas predominantes numa instalação elétrica. Com o objetivo de controlar essas harmônicas indesejadas, há atualmente, genericamente, três soluções típicas, a saber:

- Utilização de uma indutância;
- Utilização de filtro passivo;
- Utilização de filtro ativo (compensador ativo).



Vejamos cada uma das soluções indicadas:

A) INDUTÂNCIA

Trata-se de uma solução paliativa que atenua todas as harmônicas presentes no ponto de instalação. Consiste na utilização de uma indutância (LF) em série, entre a fonte de energia e a carga poluidora, conforme a figura 28.

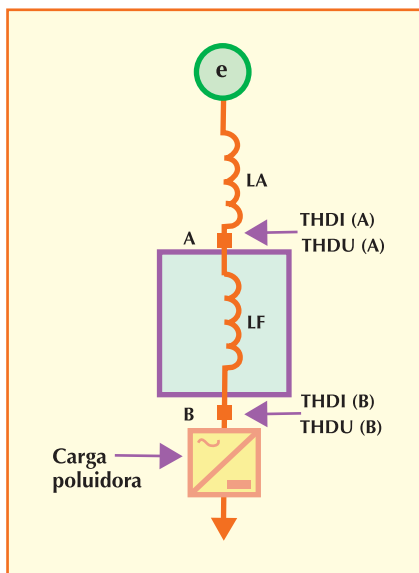


Figura 28 - Emprego de indutância para atenuação de todas as harmônicas.

Nesse caso, a indutância LF soma-se à indutância LS da fonte (transformador ou gerador) e à dos cabos, o que significa uma redução (atenuação) no valor de:

$$R = \frac{LS}{(LS + LF)}$$

resultando em:

$$THDU(A) = THDU(B) \times R$$

A técnica de instalação de indutâncias em série com a fonte poluidora é comumente utilizada internamente em equipamentos como UPS, ou seja, tais bobinas já vêm incorporadas de fábrica.

As principais vantagens da indutância são:

- É uma solução simples, confiável e de baixo custo;
- A bobina pode ser utilizada com qualquer tipo de fonte.

E as principais desvantagens são:

- Limitada eficiência;
- Grandes dimensões;
- Introduz uma queda de tensão na linha.

B) FILTRO PASSIVO LC

Essa solução consiste, geralmente, na inclusão de um filtro LC em paralelo com a fonte poluidora. A figura 29 mostra uma ligação típica desse filtro, onde também pode ser visto o emprego adicional de uma indutância (LF) para amortecimento das harmônicas, conforme explicado anteriormente. Nesse caso, a indutância LP e a capacitância CP são escolhidas de modo que a impedância do filtro seja zero para a frequência que se deseja eliminar e seja muito pequena para outras frequências próximas dessa, ou seja:

$$LP \times CP \times \omega^2 = 1$$

Por exemplo, se é necessário eliminar a 5ª harmônica, temos:

$$\begin{aligned} LP \times CP \times (2 \times \pi \times 5 \times 60)^2 &= 1 \\ LP \times CP &= 0,281 \times 10^{-6} \end{aligned}$$

Neste exemplo, com o produto LP x CP calculado, obtemos:

- Para a harmônica de 5ª ordem (300 Hz), a impedância em paralelo (LP+CP) é igual a zero e a corrente nessa frequência flui apenas entre a fonte poluidora e os componentes LP+CP, não afetando assim as eventuais cargas a montante do filtro.
- Para a harmônica de 7ª ordem, se ela existir, a impedância do filtro ainda é baixa e parte da corrente em 420 Hz é atenuada.
- Para as harmônicas superiores à 7ª ordem, prevalece o valor da reatância indutiva de LP (a reatância capacitiva de CP tende a zero, pois $X_c = 1 / 2\pi fC$).

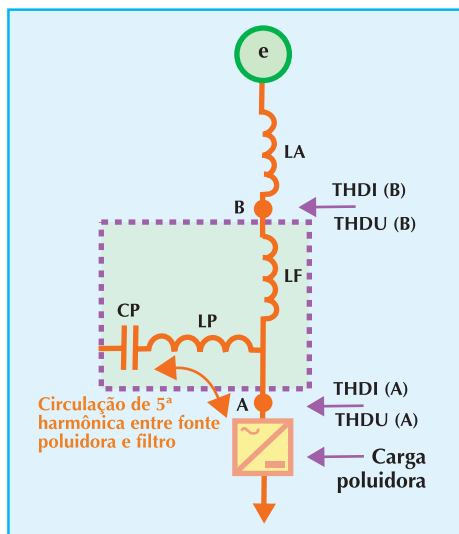


Figura 29 - Emprego de Filtro de Harmônicas Ativo LC combinado com indutância para atenuação de uma harmônica específica (no exemplo, a 5ª harmônica).

O filtro de harmônicas passivo LC descrito anteriormente, é chamado de **filtro não compensado**, porém há, genericamente, um outro tipo de filtro passivo, chamado de **filtro de harmônicas compensado** (figura 30), que é particularmente recomendado para instalações onde seja utilizada uma fonte de substituição de energia como, por exemplo, grupos geradores.

A indutância adicional (LA) instalada em paralelo com o filtro LC reduz a energia capacitiva que precisa ser fornecida pelo grupo gerador por causa da presença da capacitância introduzida pelo filtro, tanto na partida quanto em regime permanente.

Isso faz com que não seja necessário haver um sobredimensionamento do grupo gerador para compensar a energia capacitiva da instalação e evita problemas de mau funcionamento do gerador (acelerações e desacelerações bruscas).

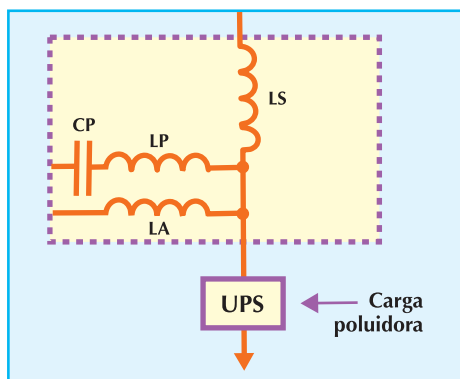


Figura 30 - Emprego de Filtro de Harmônicas Ativo LC Compensado, combinado com Indutância para atenuação de uma harmônica específica.

As principais vantagens dos filtros de harmônicas passivos LC são as seguintes:

- Simples e confiáveis;
- A indutância de compensação (LA) pode ser instalada a qualquer momento;
- Desempenho muito satisfatório, sobretudo na frequência sintonizada, obtendo-se, via de regra, THDI $\leq 5\%$;
- Aumento do fator de potência da instalação, uma vez que a introdução do capacitor (CP) compensa parte da energia indutiva dos componentes existentes.

Por sua vez, os filtros de harmônicas passivos LC apresentam algumas desvantagens:

- Limite de espectro de atuação, ou seja, o filtro elimina apenas o sinal harmônico sintonizado e atenua outras harmônicas próximas, mas não é eficaz para uma banda mais larga de sinais;
- Depende da fonte de alimentação, pois o uso de filtro compensado é obrigatório no caso da presença de grupos geradores;
- Funciona adequadamente apenas se não houver alteração nas cargas durante a vida da instalação, uma vez que, a mudança das cargas pode provocar alteração no espectro harmônico da instalação, fazendo com que a frequência de sintonia previamente estabelecida para o filtro seja diferente do novo valor existente.

C) FILTRO (CONDICIONADOR) ATIVO

O filtro (ou condicionador) ativo é usualmente ligado em paralelo entre a fonte e a carga poluidora, conforme a figura 31.

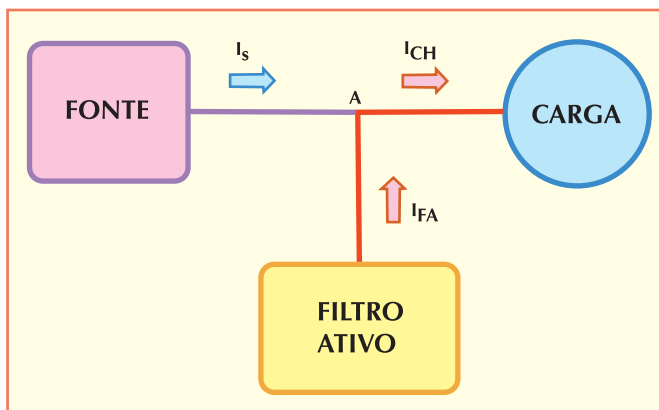


Figura 31 - Ligação típica de um filtro ativo de harmônicas.

Esse filtro analisa cada uma das fases continuamente, em tempo real, monitorando a corrente de carga I_{CH} . Dessa análise, obtém-se o espectro harmônico, que é a indicação da presença da fundamental e de todas as demais componentes harmônicas do sinal.

O condicionador então gera um sinal de corrente (I_{FA}) que é igual à diferença entre a corrente total de carga (I_{CH}) e a fundamental (I_{CH1}). Essa corrente (I_{FA}), que é a soma das correntes harmônicas defasadas de 180° , é injetada na carga de forma que a resultante no ponto de ligação do filtro ativo será uma corrente senoidal semelhante (forma de onda e intensidade) à fundamental da fonte.

Com esse funcionamento, não existe a circulação de correntes harmônicas no trecho entre a fonte e o nó A da figura 31, o que assegura que outros eventuais equipamentos ligados nesse trecho da instalação não irão ser afetados pela presença da carga harmônica.

Os filtros ativos, que via de regra empregam transistores IGBT no módulo de potência, são geralmente projetados para cobrir uma faixa do espectro harmônico (tipicamente de H2 a H25 - 2ª a 25ª harmônicas), são relativamente simples de instalar e podem ser conectados em qualquer ponto da instalação, visando a compensação das harmônicas geradas por uma ou várias cargas não lineares.

Assim, um filtro ativo pode estar localizado:

- Junto às cargas que geram grande quantidade de harmônicas, assegurando que a filtragem seja realizada localmente;
- Junto aos quadros de distribuição, realizando uma compensação parcial das harmônicas ou;
- Junto ao quadro geral da instalação, para prover uma compensação geral das correntes harmônicas.

Idealmente, um filtro ativo deveria ser instalado no ponto de origem da geração da harmônica, pois assim teríamos as seguintes vantagens:

- Não circulação de correntes harmônicas pela instalação elétrica, o que pode afetar os demais componentes;
- Redução das perdas por efeito Joule nos cabos, componentes em geral e da carga no transformador ou gerador;
- Redução da seção dos condutores.

No entanto, o local ideal para a localização dos condicionadores ativos deve ser identificado a partir de um levantamento completo dos níveis de poluição harmônica presentes na instalação e de um estudo técnico e econômico que considere a influência da presença ou não das harmônicas num dado trecho da instalação.

Para se ter uma melhor idéia do funcionamento do filtro ativo de harmônicas, vamos observar a figura 32, onde são indicadas as formas de onda reais obtidas em uma aplicação desse dispositivo.

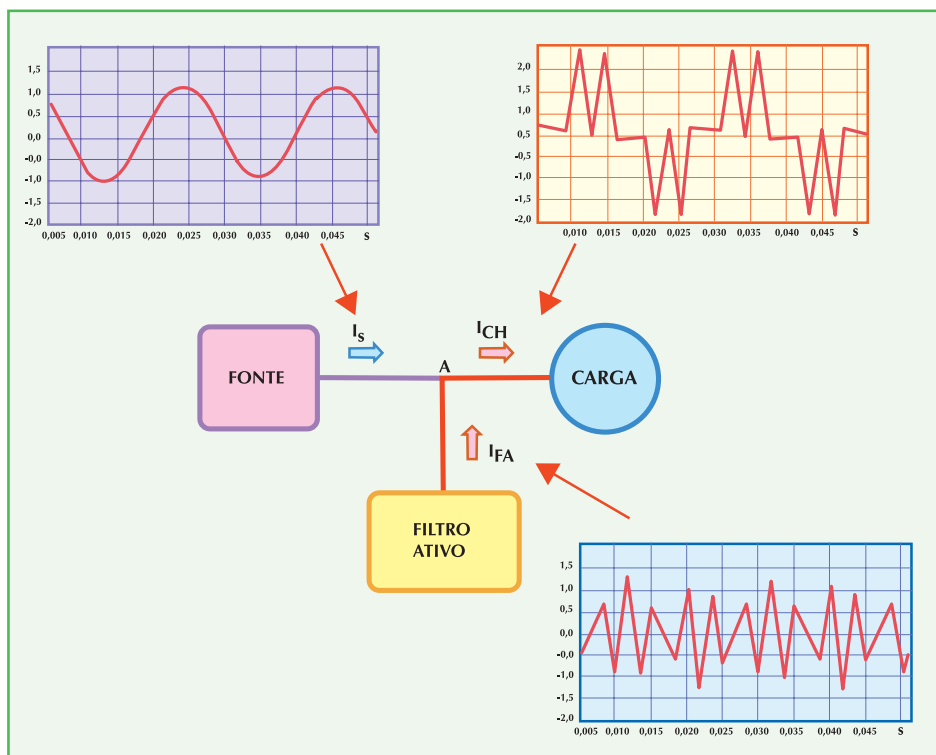


Figura 32 - Exemplo real de atuação de um filtro ativo.

6.4 TRANSFORMADORES DE SEPARAÇÃO

Os transformadores, geralmente utilizados como elementos de modificação de tensões e correntes, também são empregados em algumas ocasiões para modificar o regime do neutro da instalação, para isolar galvanicamente trechos de circuitos ou ainda como medida auxiliar na proteção contra contatos diretos

Mais recentemente, os transformadores vêm sendo também aplicados na área de harmônicas, sobretudo por sua propriedade de poder isolar as cargas da fonte. Com isso, é possível confinar os equipamentos problemáticos em termos de geração de harmônicas em um dado setor da instalação, evitando que os mesmos prejudiquem o restante do sistema a montante do transformador.

Os transformadores utilizados especificamente para o confinamento e controle das harmônicas não devem ser encarados como equipamentos convencionais, uma vez que estão submetidos a um aquecimento excessivo (maiores perdas), o que faz com que sofram um maior fator de desclassificação (K), além de estarem sujeitos a um maior nível de ruídos, vibrações, etc.

Dependendo da forma como são ligados os enrolamentos primário e secundário de um transformador, ele torna-se mais adequado para o confinamento de certas ordens de harmônicas, conforme veremos a seguir.

A) TRANSFORMADOR DE SEPARAÇÃO PARA 3ª HARMÔNICA E SUAS MÚLTIPLAS

A utilização de transformadores com a ligação triângulo/estrela provocará o confinamento da terceira harmônica e suas múltiplas inteiras. Essa solução é muito vantajosa, uma vez que a terceira harmônica e suas múltiplas não irão poluir a instalação a montante do ponto onde foi instalado o transformador.

Com isso, os diversos componentes da instalação situados antes do transformador podem ser dimensionados sem nenhuma preocupação adicional em relação às harmônicas, sobretudo o condutor neutro.

O emprego de transformadores triângulo/estrela é particularmente recomendado para a alimentação de quadros que atendam principalmente a equipamentos que possuam fontes monofásicas, tais como computadores pessoais, máquinas de fax, copiadoras, eletrodomésticos em geral, etc. (figura 33)

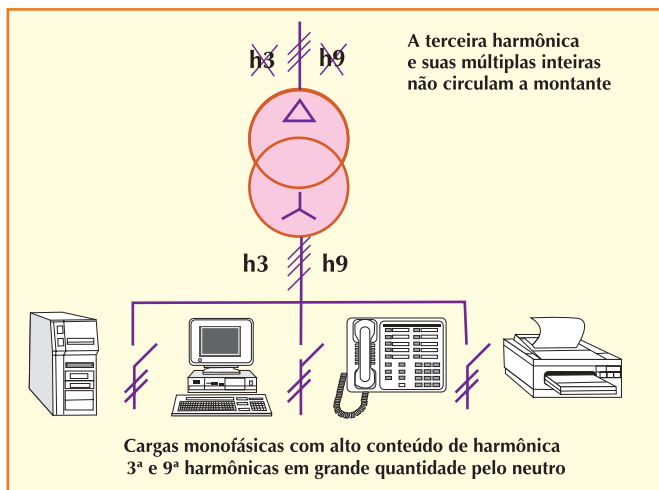


Figura 33 - Transformador para confinamento de 3ª harmônica e suas múltiplas.

B) TRANSFORMADOR DE SEPARAÇÃO PARA 5ª E 7ª HARMÔNICAS E SUAS MÚTIPLAS

Se as cargas geradoras de harmônicas são trifásicas, predominam principalmente as harmônicas de ordem 5ª e 7ª. Nesses casos, uma técnica recomendada para segregação dessas harmônicas consiste na utilização de um transformador com duplo secundário, onde se realiza um defasamento angular de 30° entre os enrolamentos. Outra solução consiste no emprego de dois transformadores com diferentes ligações de forma a também se obter um defasamento de 30° entre as tensões (figura 34). Com essa defasagem entre os secundários, as correntes harmônicas dos dois conjuntos de cargas estão defasadas e a montante (primário) se somam. Como resultado, obtém-se uma redução da taxa de distorção da corrente (THDI) e, em particular, das harmônicas de ordem 5ª e 7ª. Isso porque, com essa defasagem angular, as harmônicas de ordem 5ª e 7ª de um dos enrolamentos estão em oposição de fase em relação às mesmas ordens de harmônicas do outro enrolamento.

O mesmo ocorre com as harmônicas de 17ª e 19ª ordem e, portanto, utilizando-se essa configuração, as primeiras harmônicas que podem aparecer são de ordem 11ª e 13ª.

Para que esta aplicação possa oferecer resultados satisfatórios, os transformadores devem alimentar apenas cargas trifásicas em ambos os secundários. Além disso, as cargas poluidoras devem apresentar características similares (mesmo espectro harmônico) nas duas distribuições e os carregamentos dos dois transformadores (ou enrolamentos secundários) precisam ser praticamente iguais para que a soma das correntes no primário seja muito próxima de zero.

O emprego desse arranjo é particularmente recomendado para a alimentação de quadros que atendam principalmente a equipamentos do tipo retificadores trifásicos, variadores de velocidade, etc.

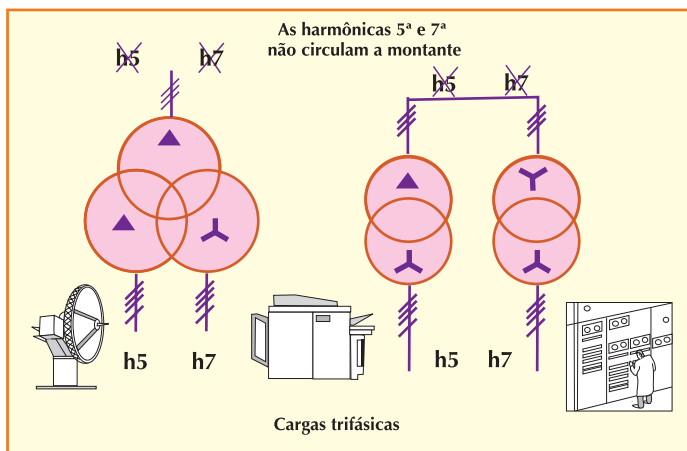


Figura 34 - Transformador para confinamento de 5ª e 7ª harmônicas.

BIBLIOGRAFIA

- Miguel, Angel Alberto Pérez e outros. "La amenaza de los armónicos y sus soluciones". Centro Espanol de Informacion del Cobre, Espanha (no Brasil, Procobre). 1999
- Moreno, Hilton e Cotrim, Ademaro. "Qualidade de energia - Harmônicas". Procobre Brasil. 1998
- "IEEE Std 519-1992 - IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems". IEEE, 1992
- "IEEE Std 1100-1999 - IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment". IEEE, 1999
- IEC 61000-3-2: Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-2: Limits - Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase)
- IEC 61000-3-4: Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-4: Limits - Limitation of emission of harmonic currents in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16 A

AUTOR

HILTON MORENO

Engenheiro Eletricista - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Professor de Instalações Elétricas da Escola de Engenharia Mauá - SP

Membro do Comitê Brasileiro de Eletricidade da ABNT

Diretor Geral no Brasil da NEMA - National Electrical Manufacturers Association

Colaborador do Procobre

DIREITOS RESERVADOS

Proibida a reprodução total ou parcial sem a autorização
expressa do Instituto Brasileiro do Cobre.

São Paulo, SP, Brasil

Novembro de 2001

1ª edição

AGRADECIMENTOS

O Procobre - Instituto Brasileiro do Cobre agradece ao Centro Espanhol de Informações do Cobre (CEDIC) pela cessão da utilização do seu livro "La Amenaza de Los Armónicos y Sus Soluciones" como base para esta publicação, assim como agradece aos engenheiros José Starosta e Paulo Barreto pela colaboração.

O Procobre agradece também a todos os profissionais que participaram de suas palestras sobre Harmônicas, os quais muito contribuíram para o enriquecimento do material ora publicado.

APOIO



.....
O Instituto Brasileiro do Cobre - Procobre
promove campanhas de conscientização,
distribui publicações e patrocina cursos e palestras.
O cobre participa de uma vida melhor.
.....

 **PROCOBRE**
INSTITUTO BRASILEIRO DO COBRE

Av. Brigadeiro Faria Lima, 2128 - conj. 1102 - CEP 01451-903
Tel. / Fax: (11) 3816-6383 - São Paulo - SP - Brasil
internet: www.procobrebrasil.org e-mail: unicobre@procobrebrasil.org

