

Harmônicas nas Instalações Elétricas

causas, efeitos e soluções



International Copper
Association Brazil
Copper Alliance

PRODUÇÃO: POTÊNCIA EDUCAÇÃO
AUTOR: HILTON MORENO

ÍNDICE

APRESENTAÇÃO	03	CAPÍTULO 4 - CARGAS GERADORAS DE HARMÔNICAS	21
CAPÍTULO 1 - ASPECTOS GERAIS RELACIONADOS À QUALIDADE DE ENERGIA.....	04	4.1 Cargas lineares	22
1.1 Perturbações na amplitude da tensão	05	4.2 Cargas não lineares.....	22
1.2 Perturbações na frequência do sinal	06	4.3 Exemplos de cargas geradoras de harmônicas	23
1.3 Desequilíbrios de tensão ou corrente em sistemas trifásicos.....	06	CAPÍTULO 5 - EFEITOS E CONSEQUÊNCIAS DAS HARMÔNICAS	26
1.4 As perturbações nas formas de ondas.....	07	5.1 Aquecimentos excessivos.....	27
CAPÍTULO 2 - CARACTERIZAÇÃO DOS SINAIS HARMÔNICOS	08	5.2 Disparos de dispositivos de proteção	27
2.1 Definição.....	09	5.3 Ressonância.....	27
2.2 Ordem, frequência e sequência das harmônicas.....	09	5.4 Vibrações e acoplamentos	28
2.3 Espectro harmônico.....	10	5.5 Aumento da queda de tensão e redução do fator de potência	28
2.4 Taxa de distorção harmônica total (THD).....	11	5.6 Tensão elevada entre neutro e terra.....	29
2.5 Valor Eficaz de um sinal harmônico	13	CAPÍTULO 6 - COMO LIDAR COM A PRESENÇA DAS HARMÔNICAS	30
2.6 Fator de potência e $\cos\phi$	13	6.1 Dimensionamento dos condutores fase e neutro na presença de harmônicas	31
2.7 Fator de crista (FC)	14	6.2 Dimensionamento de transformadores	35
2.8 Fator de desclassificação de transformadores (K)	15	6.3 Normas técnicas sobre harmônicas	36
CAPÍTULO 3 - ASPECTOS GERAIS SOBRE MEDIÇÕES DE HARMÔNICAS.....	17	6.4 Filtros de harmônicas	37
3.1 Instrumentos convencionais de valor médio	18	6.5 Transformador de separação.....	41
3.2 Instrumentos de valor eficaz verdadeiro (TRUE RMS).....	19	LEITURA COMPLEMENTAR	43

APRESENTAÇÃO

O motivo que leva o Procobre a disponibilizar esta publicação revisada 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. 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.

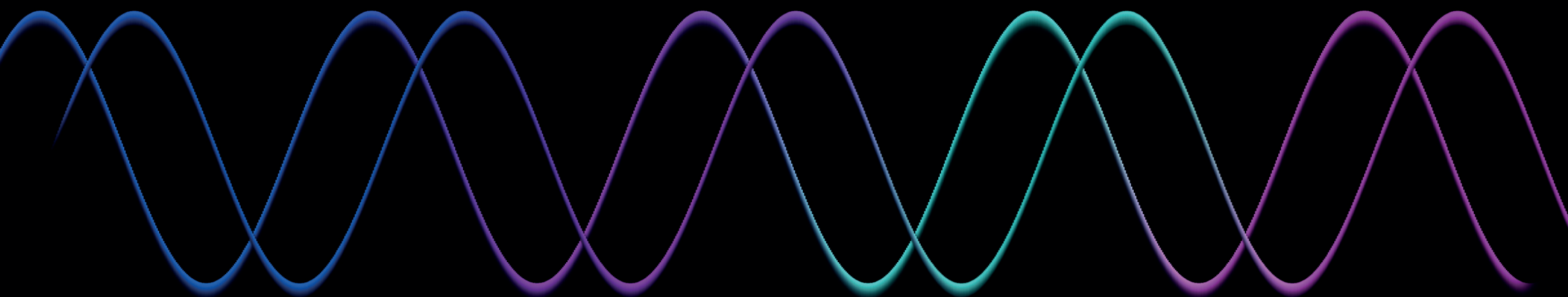
O conhecimento do que são harmônicas, quais seus efeitos, como medi-las, quais as cargas que geram harmônicas e, finalmente, como conviver com elas são os principais tópicos desta publicação.

O conjunto de informações disponibilizadas neste e-book 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 este e-book atualizado 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 BRASIL - Instituto Brasileiro do Cobre

São Paulo, março de 2019



CAPÍTULO 1



International Copper
Association Brazil
Copper Alliance

PRODUÇÃO: POTÊNCIA EDUCAÇÃO
AUTOR: HILTON MORENO

Aspectos gerais relacionados à qualidade de energia

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 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;
- Perturbações na forma de onda do sinal (harmônicas).

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 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 10 ms 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 podem 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 milissegundos) 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 útil desses equipamentos pode ser seriamente comprometida. Os equipamentos com eletrônica de potência embarcada e as fontes de alimentação de computadores ou retificadores podem ser danificados pelo excesso de tensão ou, no caso de suportarem o impulso, podem 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 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.), dentre 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 elevada potência ou torque constantes. Esse efeito pode se agravar em instalações elétricas subdimensionadas.

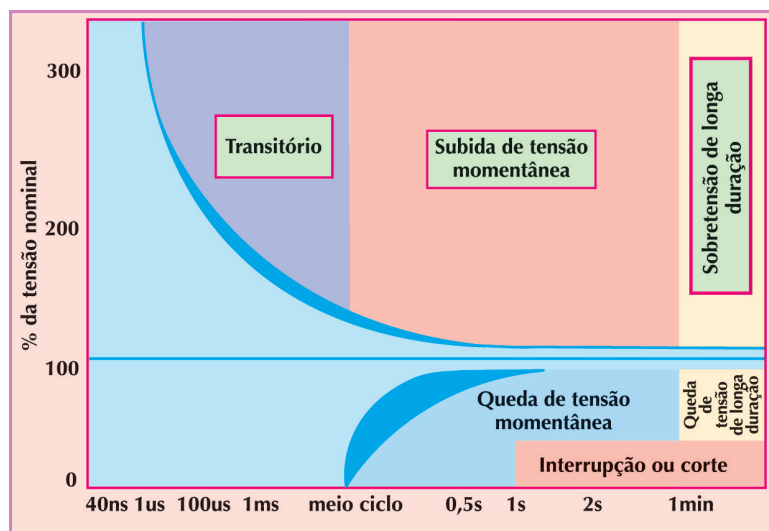


Figura 1 - Curva CBEMA

Como ainda 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).

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 subfrequência (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 a intensidade que circula pelas três fases não é igual, provocando uma corrente diferente de zero pelo condutor neutro. O resultado dessa circulação de corrente é um sobreaquecimento geral nos componentes da instalação.

Matematicamente, o desequilíbrio de corrente pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$\text{Desequilíbrio (\%)} = \frac{[I_{\max(R,S,T)} - I_{\text{média}}]}{I_{\text{média}}} \times 100 \%$$

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 %.

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

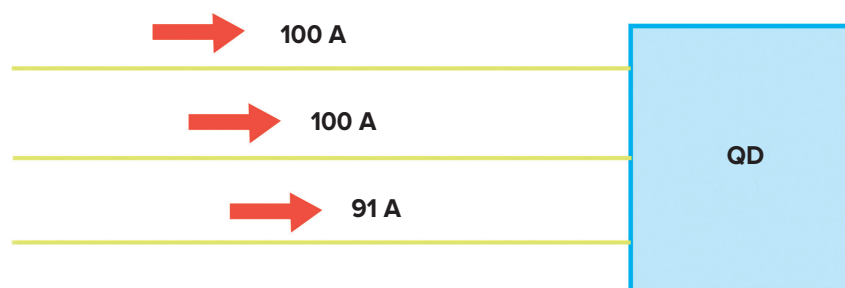


Figura 2 - Exemplo de desequilíbrio de correntes

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

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

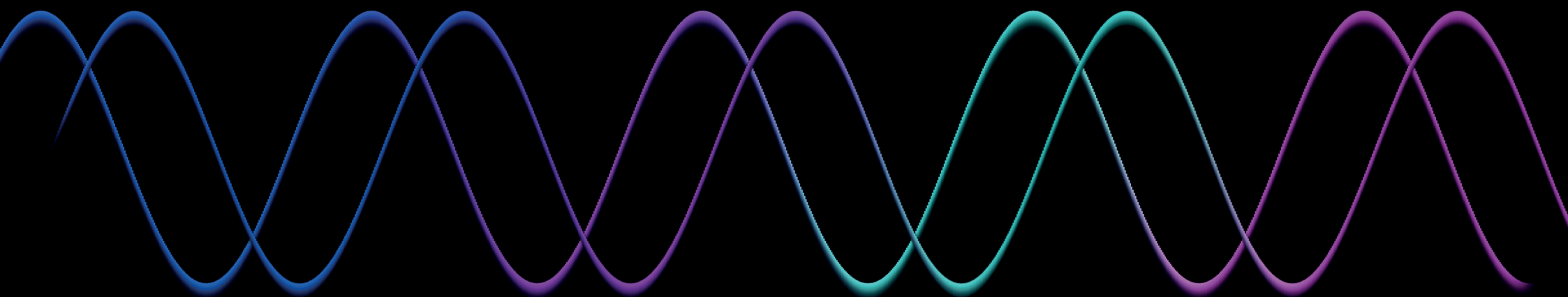
$$I_{\text{média}} = (I_R + I_S + I_T) / 3 = 100,3 \text{ A}$$

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

1.4 AS PERTURBAÇÕES NAS FORMAS DE ONDAS

As perturbações harmônicas tornaram-se importantes a partir da década de 1990, quando a proporção de utilização de equipamentos eletrônicos e elétricos começou a se equiparar. Geralmente, os usuários reclamam das distribuidoras 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, drivers de LEDs, 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



International Copper
Association Brazil
Copper Alliance

PRODUÇÃO: POTÊNCIA EDUCAÇÃO
AUTOR: HILTON MORENO

Caracterização dos sinais harmônicos

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.

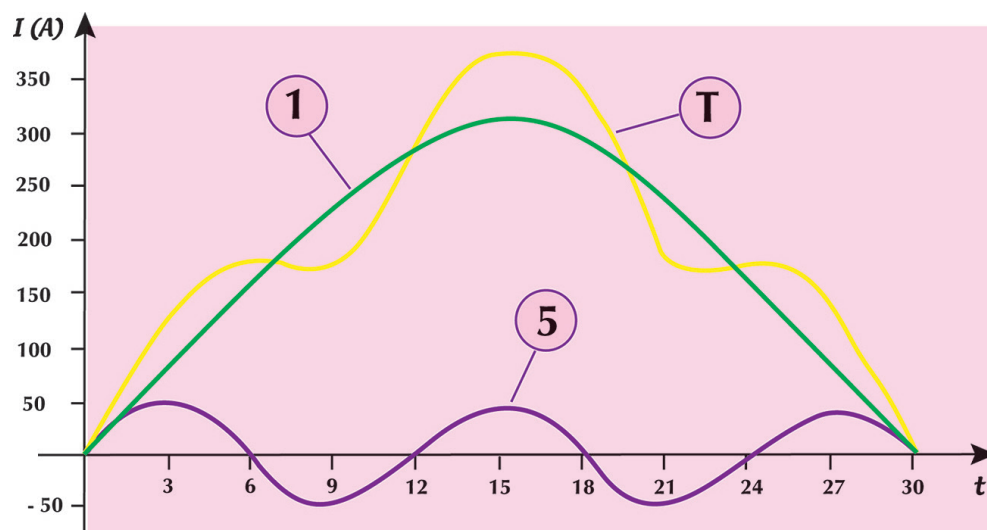


Figura 3 - Onda deformada e suas componentes harmônicas

TABELA 1 - VALORES PARA OS SINAIS 1, 5 E T DA FIGURA 3

t	Sinal 1 (A)	Sinal 5 (A)	Sinal T (A) = sinal 1 + sinal 5
0	0	0	0
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

Assim, podemos dizer que um sinal periódico contém harmônicas quando a forma de onda desse sinal não é senoidal, ou seja, 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:

TABELA 2 - ORDEM, FREQUÊNCIA E SEQUÊNCIA DAS HARMÔNICAS

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

Em uma situação ideal, onde somente existisse um sinal de frequência de 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 e pares. As ímpares são mais comuns nas instalações elétricas em geral e as pares existem quando ocorrem assimetrias do sinal devido à presença de componente contínua, como nas instalações alimentadas em corrente contínua (metrô, ferrovias, etc.).

A sequência pode ser positiva, negativa ou nula (zero).

Tomando-se como exemplo um motor assíncrono trifásico alimentado por quatro condutores (3 F + N), as harmônicas de sequência 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 sequência positiva provocam, geralmente, aquecimentos indesejados em condutores, motores, transformadores, etc.

As harmônicas de sequência negativa fariam o motor girar em sentido contrário ao giro produzido pela fundamental, freando assim o motor e também causando aquecimento indesejado.

As harmônicas de sequência 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 (e suas múltiplas inteiras) 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.

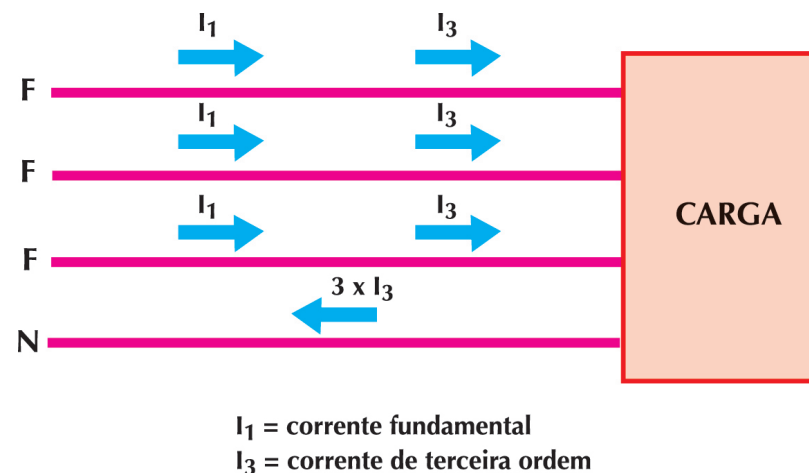


Figura 4 - A corrente no neutro é de terceira ordem com amplitude três vezes maior do que a corrente de terceira ordem de cada uma das fases (supondo as correntes fundamentais das fases de mesma amplitude = sistema equilibrado na frequência fundamental)

2.3 ESPECTRO HARMÔNICO

O chamado “espectro harmônico” permite decompor um sinal em suas componentes harmônicas e representá-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 ou equipamento.

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 há 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.

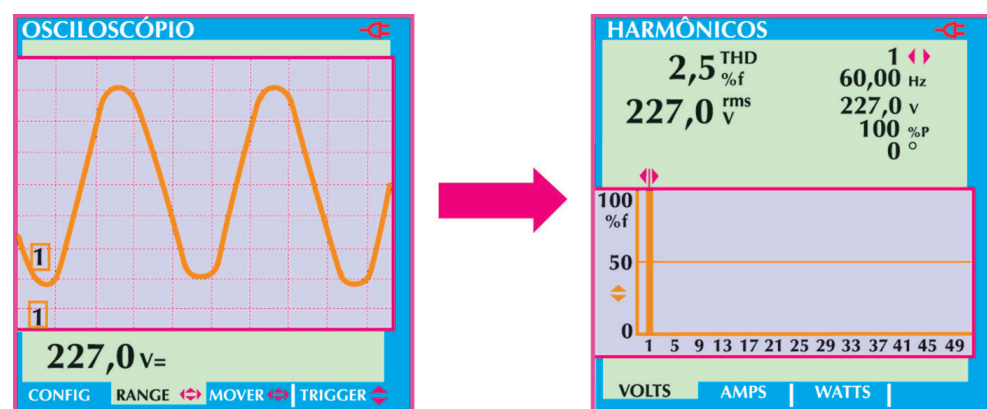


Figura 5 - Forma de onda e espectro de um sinal praticamente senoidal

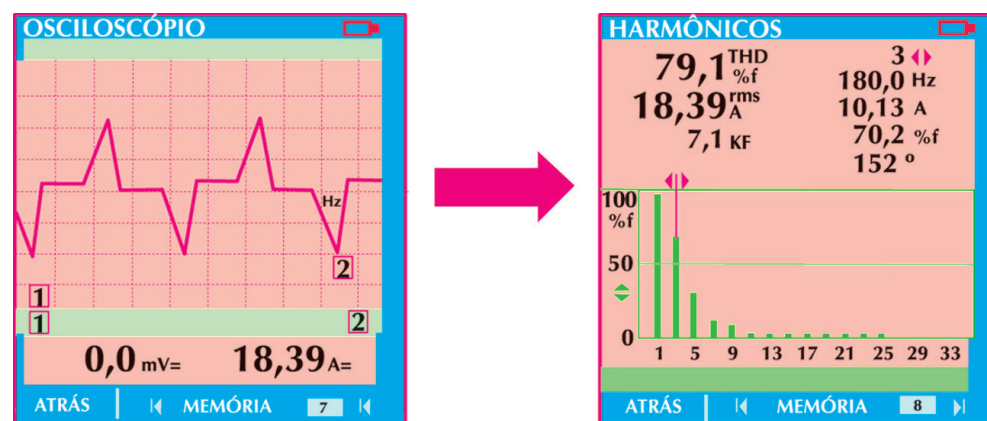


Figura 6 - Forma de onda e espectro de um sinal fortemente distorcido

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

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

No Brasil ainda não foram definidos valores normalizados para THD_f nas instalações internas dos consumidores. Nesse caso, uma sugestão é adotar os valores máximos estabelecidos na norma IEEE 519 (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 significa que, quanto mais cargas que provocam distorção de corrente uma instalação possuir, maiores as possibilidades de distorção na forma de onda de tensão. 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 que $U = Z \times I$).

Para exemplificar, vamos determinar o valor de THD_f para um sinal de corrente que possua as características medidas em um dado ponto do circuito indicadas na Tabela 3.:

TABELA 3 - EXEMPLO DE CORRENTES HARMÔNICAS EM UM DADO SINAL

Ordem	Valor em A
h1	3,63
h3	2,33
h5	0,94
h7	0,69
h9	0,50
h11	0,41
h13	0,33
Total	4,53

Da Tabela 3, temos:

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

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.

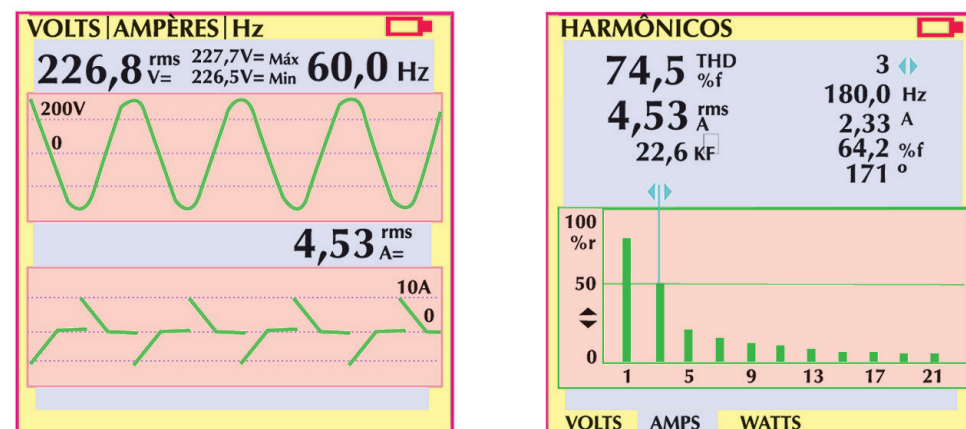


Figura 7 - Forma de onda de corrente e seu espectro ($THD_f = 74,5 \%$)

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 $THD_f = 79,1 \%$

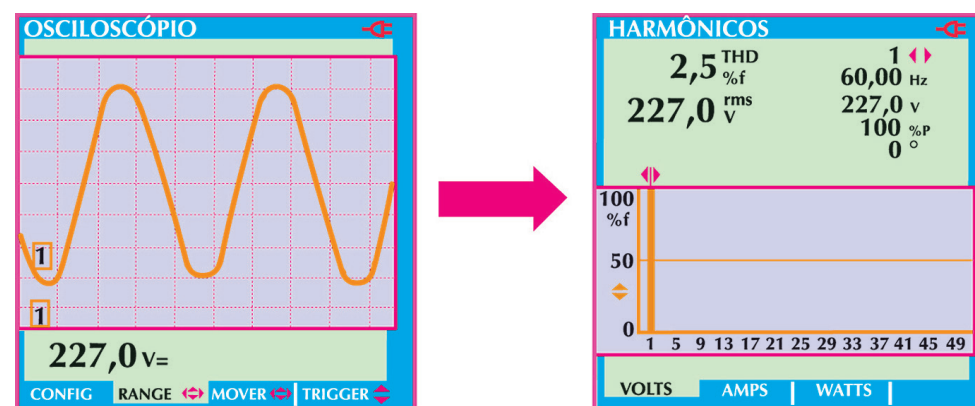


Figura 8 - Forma de onda e espectro de um sinal praticamente senoidal ($THD_f = 2,5 \%$)

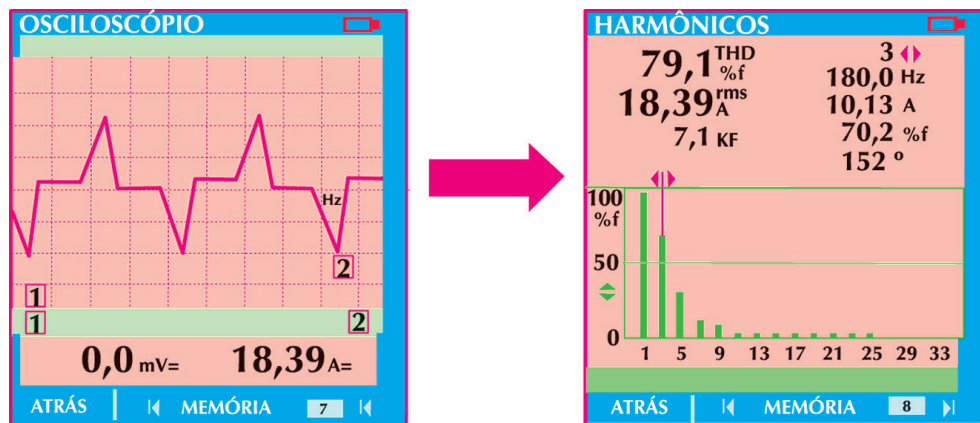


Figura 9 - Forma de onda e espectro de um sinal fortemente distorcido (THD_r = 79,1 %)

2.5 VALOR EFICAZ DE UM SINAL HARMÔNICO

A determinação do valor eficaz de qualquer sinal é de fundamental importância para que se possam escolher os componentes de um circuito, como condutores, transformadores, dispositivos de proteção, etc.

No caso de ondas de corrente distorcidas, o valor eficaz resultante em um circuito percorrido por correntes harmônicas de ordem 1, 2, 3, 4, ..., n é dado por:

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

Analogamente, no caso de ondas de tensão distorcidas, o valor eficaz resultante em um circuito onde são aplicadas tensões harmônicas de ordem 1, 2, 3, 4, ..., n é dado por:

$$U_{rms} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots + U_n^2}$$

Como exemplo, vamos determinar o valor eficaz do sinal de corrente da Figura 7, cujos valores das componentes harmônicas estão indicados na Tabela 3. Nesse caso, temos:

$$I_{rms} = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + \dots + I_{13}^2} =$$

$$= \sqrt{3,63^2 + 2,33^2 + 0,94^2 + 0,69^2 + 0,50^2 + 0,41^2 + 0,33^2} = 4,53 \text{ A}$$

2.6 FATOR DE POTÊNCIA E COSφ

Normalmente, utilizamos os termos fator de potência e cosφ 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 definida 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 definida para cada uma das componentes harmônicas (senoidais):

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

Geralmente, mede-se o $\cos\phi$ da componente fundamental e o fator de potência do sinal deformado (total). Nesse caso, 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 $f_p = 0,70$ e $\cos\phi = 0,87$. Repare como a forma de onda da corrente é bastante distorcida (repleta de harmônicas).

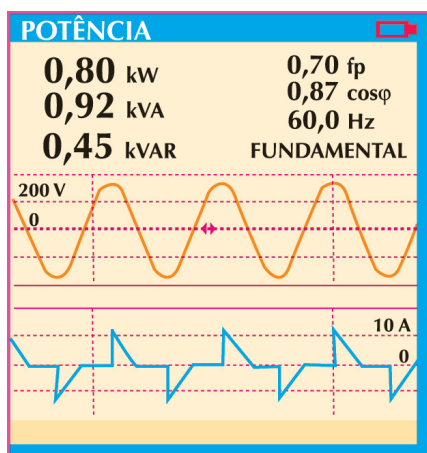


Figura 10 - Forma de onda com diferença significativa entre fator de potência e $\cos\phi$

2.7 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:

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

Quando um sinal é perfeitamente senoidal, essa relação é igual a $\sqrt{2} = 1,414$.

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 indicados na Tabela 4.

TABELA 4 - VALORES RELATIVOS AOS SINAIS DA FIGURA 11

	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

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 a 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 conhecer o tipo de sinal que está sendo medido, 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 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, máquinas e dispositivos elétricos e eletrônicos presentes.

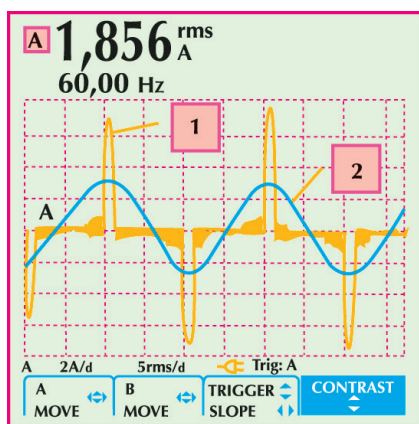


Figura 11 - Os sinais 1 e 2 têm o mesmo valor eficaz, mas apresentam fatores de crista muito diferentes

2.8 FATOR DE DESCLASSIFICAÇÃO DE TRANSFORMADORES (K)

As subestações são especialmente sensíveis às harmônicas de corrente que provocam sobreaquecimentos e possíveis falhas nos seus equipamentos.

Historicamente, a potência nominal e o calor dissipado por um transformador em regime de plena carga são calculados com base na hipótese que o sistema é composto apenas por cargas lineares (sem harmônicas). No entanto, na prática, os transformadores são quase sempre percorridos por correntes harmônicas, provocando assim elevações de temperatura indesejadas, que podem levar o transformador à falha.

Há dois fatores que são úteis para levar em conta a presença de harmônicas em transformadores: um que se aplica a transformadores existentes e outro que se aplica no dimensionamento e seleção de novos transformadores.

Fator K para transformadores existentes

O fator K de desclassificação de um transformador existente indica quanto deve ser reduzida a sua potência máxima de saída quando ele é percorrido por harmônicas.

A expressão matemática mais usada para este 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 existente percorrido por harmônicas é dada por:

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

Para a utilização desta expressão deve-se determinar, por medição, o valor de pico e o valor eficaz da corrente elétrica em cada fase do transformador, calcular a média desses valores e então utilizá-los na expressão indicada. Instrumentos especializados em medição e análise de harmônicas facilitam a obtenção do fator K, evitando a realização dos cálculos anteriores.

Por exemplo, seja um fator $K = 1,2$ para um certo transformador existente de 1.000 kVA (S_{nom}). Então, a máxima potência a ser fornecida por este transformador é $S_{\text{max}} = 1.000 / 1,2 = 833$ kVA.

A expressão para 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.

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

Fator K para transformadores novos

O fator K para transformadores novos é uma ponderação das correntes de carga harmônicas de acordo com seus efeitos no aquecimento do transformador, conforme estabelecido na norma ANSI/IEEE C57.110.

Um fator K igual a 1,0 indica a presença de uma carga linear (sem harmônicas). Quanto maior o fator K, maiores os efeitos de aquecimento devido às correntes harmônicas.

O Fator K é usado pelos fabricantes para ajustar a potência do transformador em função das correntes harmônicas que circulam por ele. Assim, para fatores K maiores que 1, a potência máxima do transformador é reduzida. Do ponto de vista do projetista ou instalador, o fator K deve ser determinado para dimensionar corretamente o transformador necessário.

O método de cálculo do fator K, conforme definido na norma IEEE 1100-1992, é dado por:

$$K = \frac{\sum_{h=1}^{34} (i_h \cdot h)^2}{\sum_{h=1}^{34} i_h^2}$$

Onde:

- i_h : valor eficaz da corrente harmônica de ordem h;
- h: ordem da harmônica

Por exemplo, um sinal de corrente com um conteúdo de 10% de 3ª harmônica, 5% de 5ª harmônica e 3% de 7ª harmônica tem um fator K calculado por:

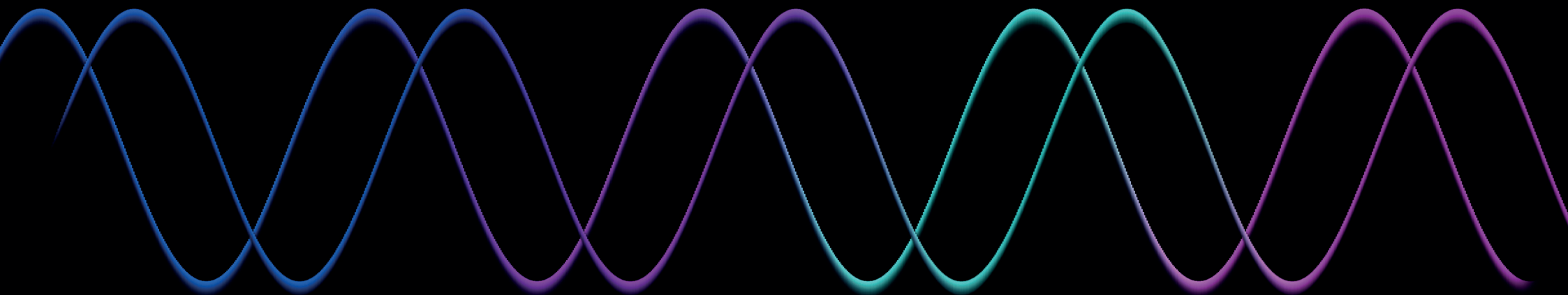
$$K = \frac{(1,0 \cdot 1)^2 + (0,1 \cdot 3)^2 + (0,05 \cdot 5)^2 + (0,03 \cdot 7)^2}{(1,0)^2 + (0,1)^2 + (0,05)^2 + (0,03)^2} = 1,18$$

O Underwriters Laboratories (UL) reconheceu os potenciais riscos de segurança associados ao uso de transformadores submetidos às cargas não-lineares e desenvolveu um sistema de classificação para indicar capacidade de um transformador para lidar com cargas harmônicas. As classificações são descritas na norma UL 1561 e são conhecidas como fatores K do transformador. Desta forma, os transformadores com fator K são projetados para reduzir os efeitos de aquecimento das correntes harmônicas criadas por cargas como aquelas descritas na tabela abaixo.

TABELA 5: EXEMPLOS DE FATOR K

Carga	Fator K
Iluminação a descarga	K-4
UPS com filtro de entrada	K-4
Máquinas de soldar	K-4
Equipamento de aquecimento por indução CLPs e controladores por estado sólido (exceto acionadores de velocidade variável)	K-4
Equipamento de telecomunicação (por ex., PABX)	K-13
UPS sem filtro de entrada	K-13
Circuitos com múltiplas tomadas, geralmente em áreas de saúde e salas de aula	K-13
Computadores	K-20
Acionadores de motores a estado sólido (acionadores de velocidade variável)	K-20

Os transformadores apropriados para lidar com as harmônicas são disponíveis em fatores K básicos, como 4, 9, 13, 20, 30, 40 e 50. Assim, o projetista deve calcular o fator K para sua carga e, em seguida, especificar um transformador com um fator K igual ou superior ao valor calculado.



CAPÍTULO 3



International Copper
Association Brazil
Copper Alliance

PRODUÇÃO: POTÊNCIA EDUCAÇÃO
AUTOR: HILTON MORENO

Aspectos gerais sobre medições de harmônicas

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 vêm 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.

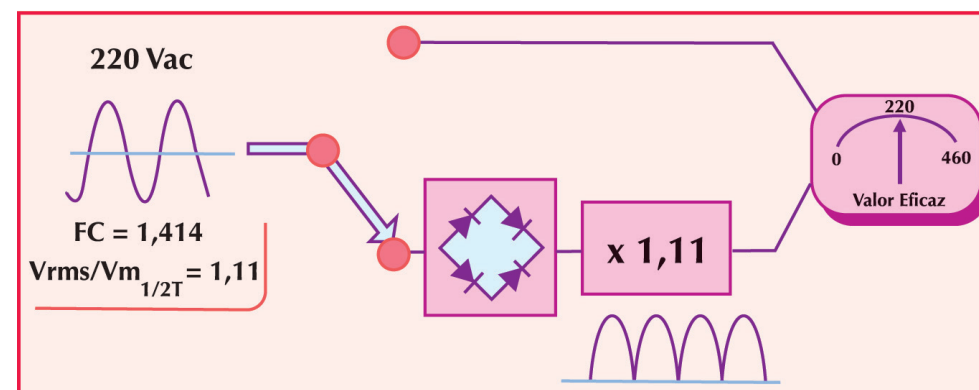


Figura 12 - Circuito típico de um instrumento de valor médio medindo um sinal senoidal

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 116 V, enquanto que o valor correto deveria ser 220 V, 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.

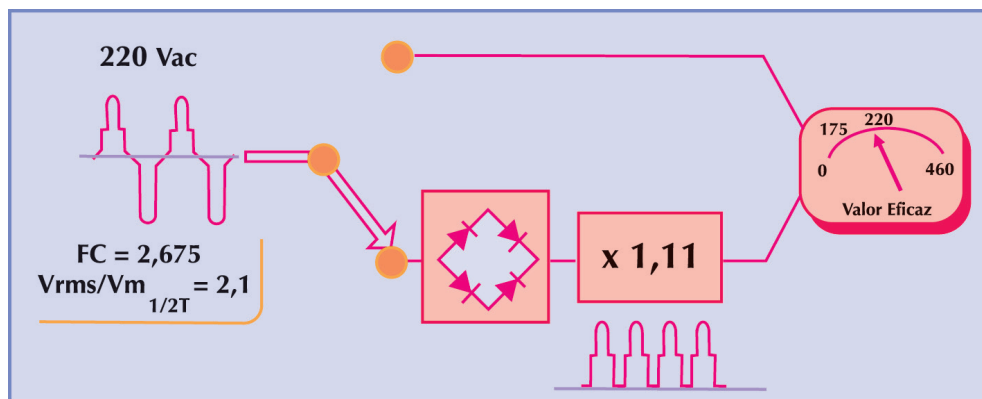


Figura 13 - Circuito típico de um instrumento de valor médio medindo um sinal com harmônicas

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.

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

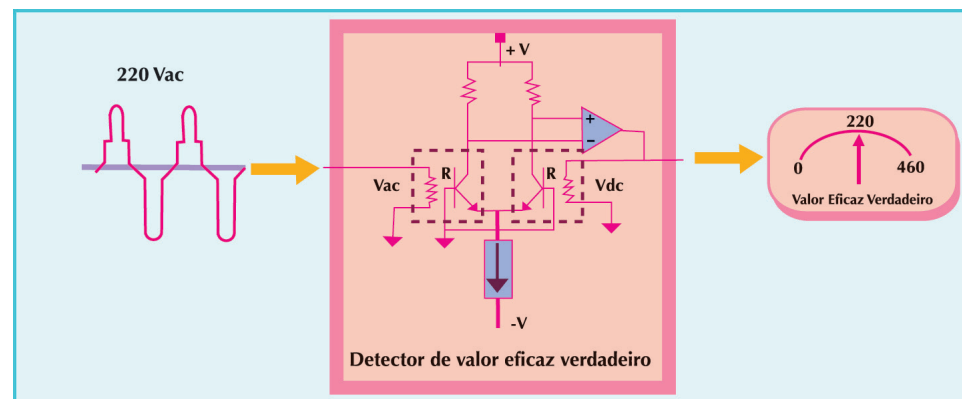


Figura 14 - Circuito de entrada típico de um instrumento de valor eficaz verdadeiro

de, pelo menos, 1 kHz (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 precisão de medida. Pode-se observar que à medida que o sinal se deforma, o erro de medida do instrumento de valor médio vai aumentando.

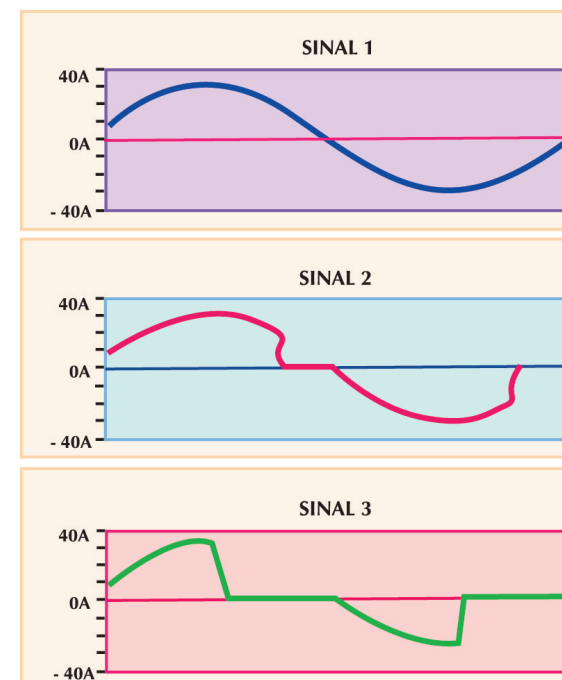


Figura 15 - Sinais com diferentes graus de distorção e valores medidos pelos instrumentos

A Tabela 6 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).

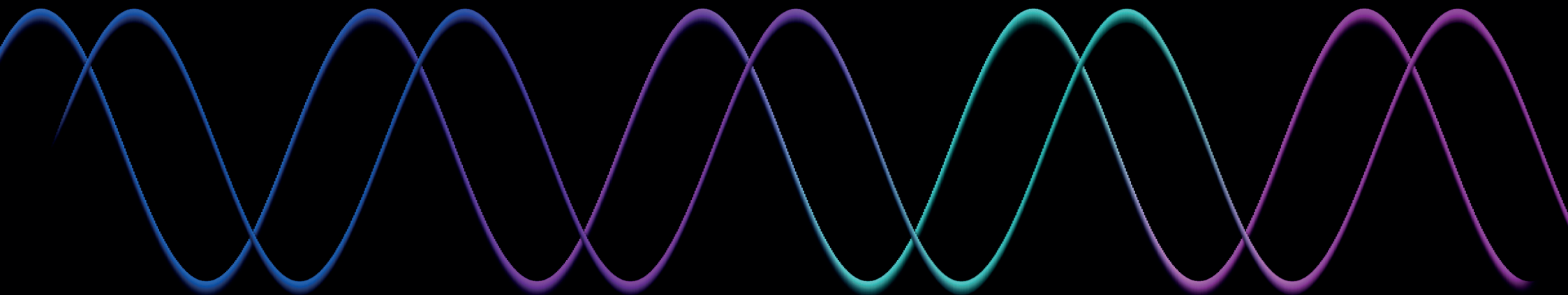
TABELA 6: COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES TIPOS DE SINAIS E DE INSTRUMENTOS

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

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



International Copper
Association Brazil
Copper Alliance

PRODUÇÃO: POTÊNCIA EDUCAÇÃO
AUTOR: HILTON MORENO

Cargas geradoras de harmônicas

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 cv, rendimento de 80 % e fator de potência 0,85, a tensão e corrente possuem a forma de onda indicada na Figura 17.

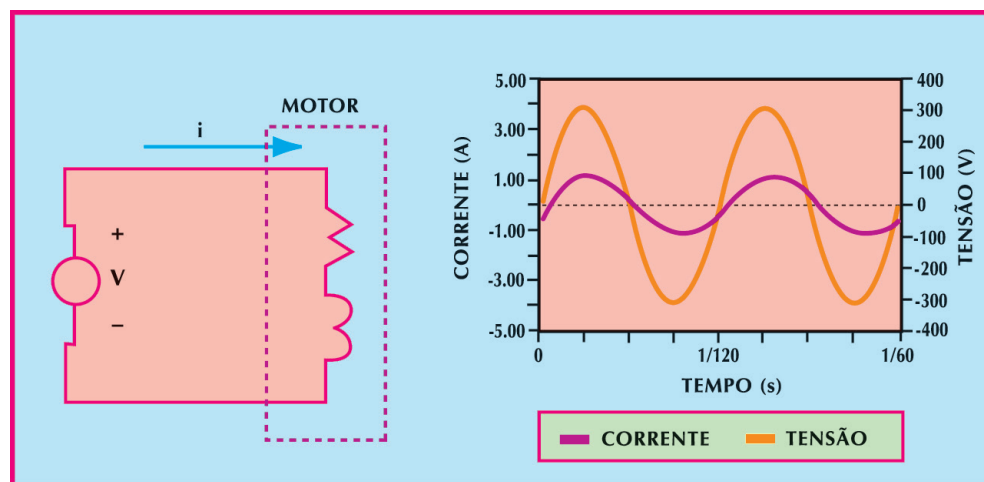


Figura 17 - Consumo de um motor monofásico de 1/6 cv

4.2 CARGAS NÃO LINEARES

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

Deste modo, aproximadamente 50 % da energia elétrica passa por um dispositivo de eletrônica de potência antes que seja finalmente utilizada. Esta eletrônica faz uso de diodos, transistores e tiristores, sendo que, praticamente, todos eles operam em modo de interrupção, o que significa que funcionam essencialmente em dois estados: condução e bloqueio.

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.

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 neste estado.

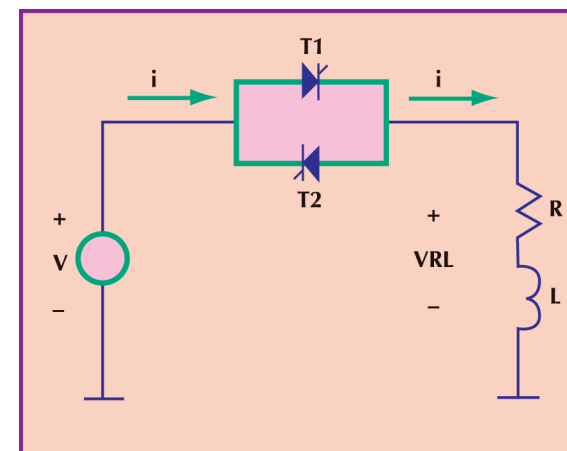


Figura 18 - Dispositivo de controle semicondutor da corrente e da tensão

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

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).

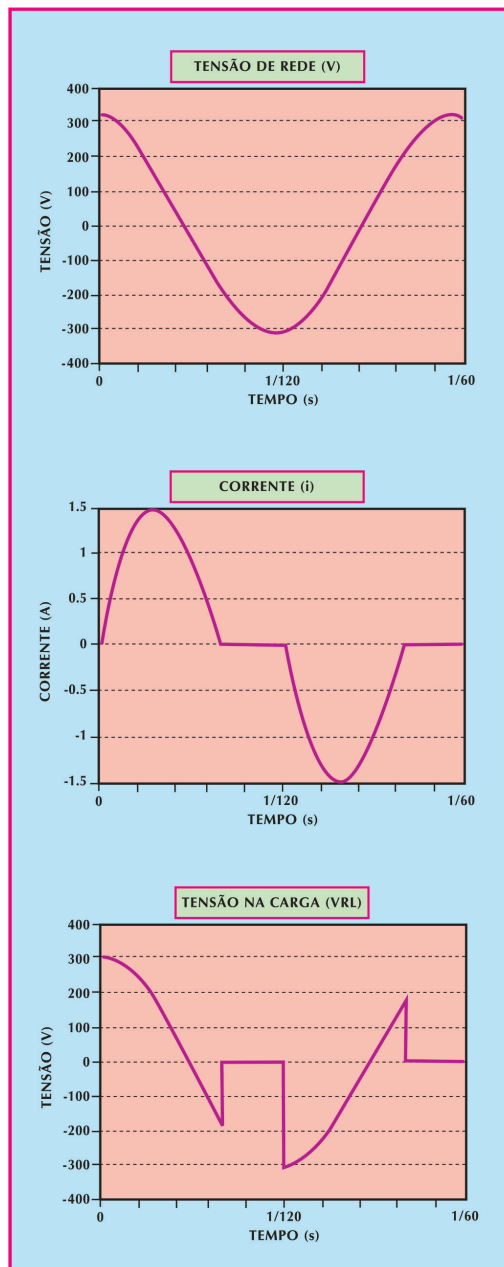


Figura 19 - Formas de onda no circuito com dispositivo de controle não linear

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.

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.

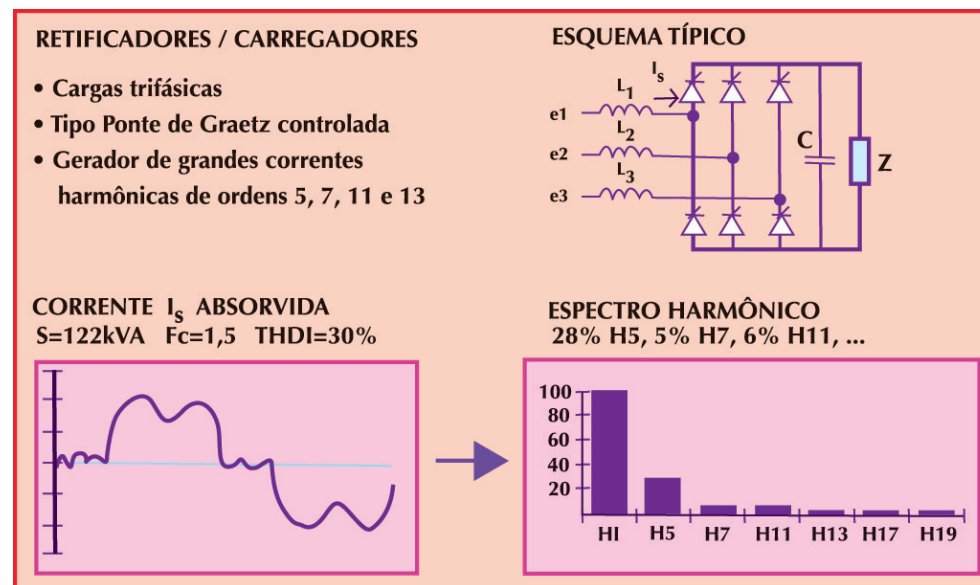


Figura 20 - Circuito retificador carregador totalmente controlado, com indutância série

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 superam 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.

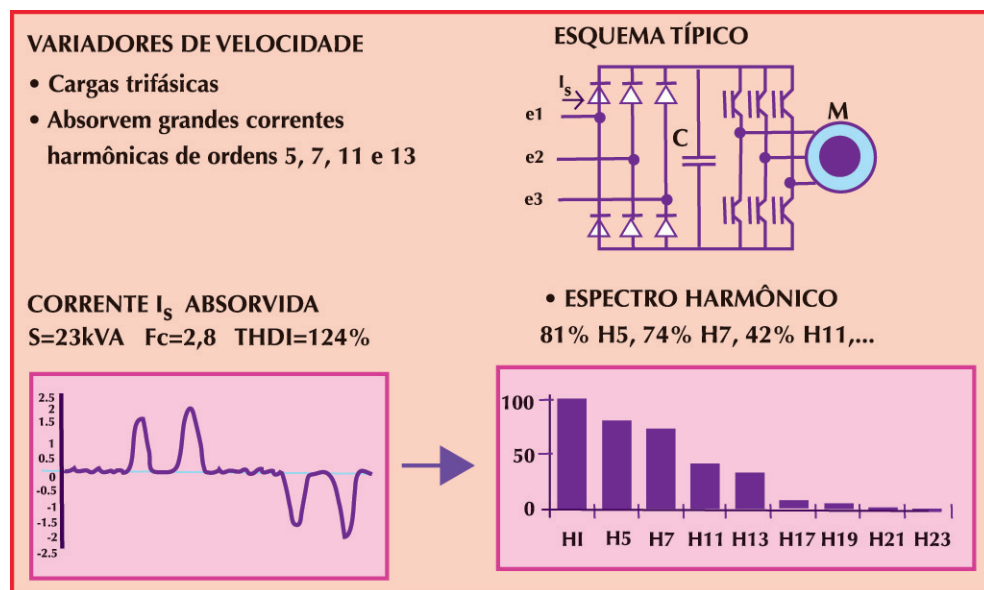


Figura 21 - Circuito típico de um variador de velocidade

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 pode 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 trifásicos com neutro (3F + N).

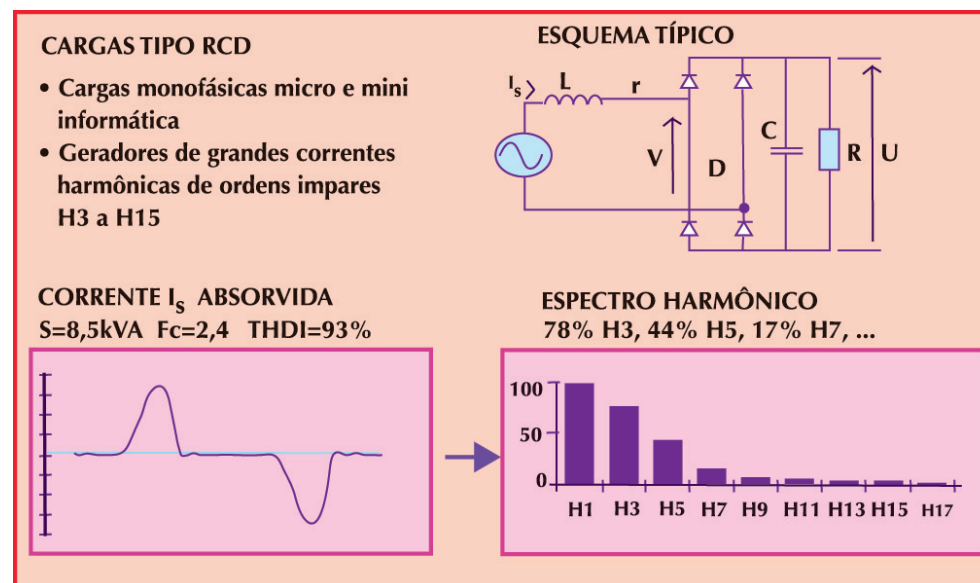


Figura 22 - Circuito típico de uma fonte de alimentação monofásica

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 5 e 7.

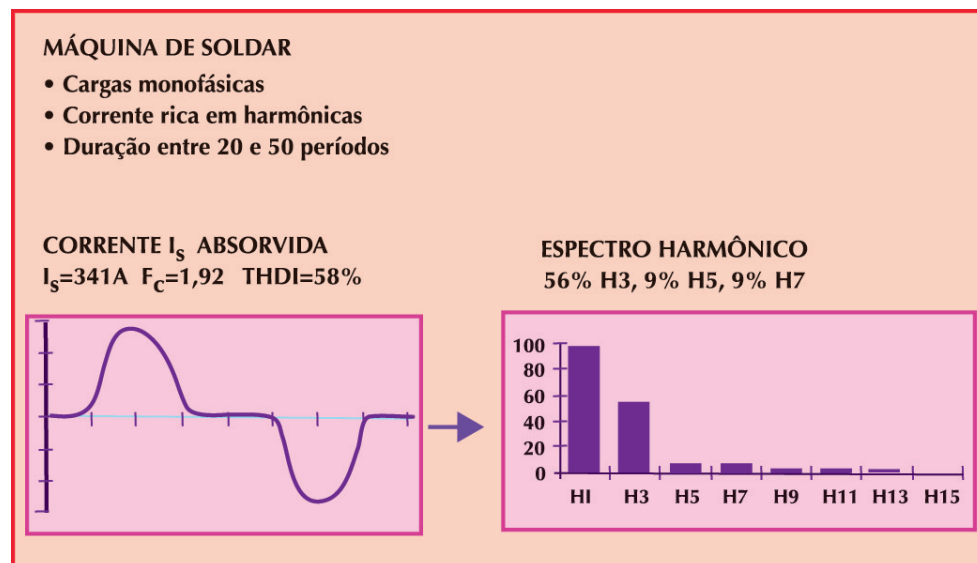
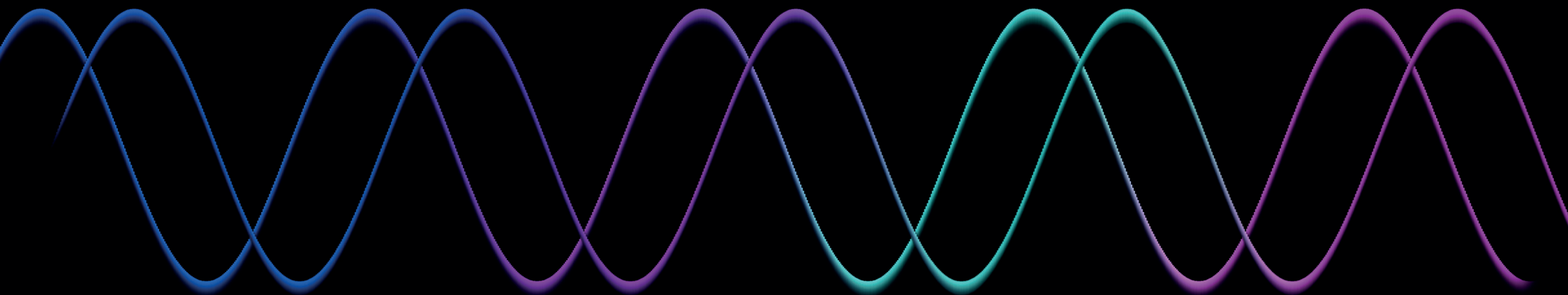


Figura 23 - Corrente absorvida e espectro harmônico para uma máquina de soldar típica



CAPÍTULO 5



International Copper
Association Brazil
Copper Alliance

PRODUÇÃO: POTÊNCIA EDUCAÇÃO
AUTOR: HILTON MORENO

Efeitos e consequências das harmônicas

EFEITOS E CONSEQUÊNCIAS 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, achatamento da forma de onda da tensão, tensão elevada entre neutro e terra, aumento da queda de tensão e do fator de potência da instalação.

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.

5.2 DISPAROS DE DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO

Os sinais harmônicos podem apresentar correntes com valores eficazes pequenos, porém, com elevados valores de pico (elevado fator de crista), o que pode

fazer com que alguns dispositivos de proteção termomagnéticos e diferenciais (como DR, por exemplo) disparem indevidamente. Isto 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, fotocopiadoras, impressoras e outros equipamentos eletroeletrônicos, são relativamente comuns os disparos imprevistos dos dispositivos de proteção. Isto pode significar, em alguns casos, a perda de grande quantidade de trabalho.

Para evitar tais transtornos, recomenda-se a previsão de circuitos separados para os computadores, fotocopiadoras e impressoras. Além disso, não devem ser instalados muitos equipamentos deste tipo no mesmo circuito, evitando assim a perda de operação simultânea de muitas máquinas no caso do desligamento ocasional da proteção.

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

5.3 RESSONÂNCIA

Uma capacitância em paralelo com uma indutância forma um circuito ressonante capaz de amplificar o sinal de uma dada frequência. Quando é utilizado um banco de capacitores, é formado um circuito ressonante entre o banco e a indutância natural da própria instalação elétrica. Com isto, certas harmônicas podem ser amplificadas, provocando danos principalmente nos próprios capacitores, levando-os à queima ou explosões.

Assim, antes de instalar um capacitor ou banco de capacitores, fixo ou variável, é fundamental que seja realizado um estudo para quantificar e qualificar

as harmônicas presentes, tomando-se providências necessárias para torná-las inofensivas para os 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, transformadores e/ou acoplamentos em redes de comunicação, prejudicando a qualidade da conversação ou da troca de dados e sinais.

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

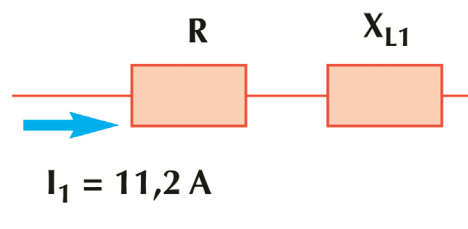
Dentre os diversos efeitos provocados pela presença de harmônicas nas instalações elétricas, dois serão detalhados a seguir, utilizando-se a representação do circuito físico pelo seu equivalente elétrico. Como estamos tratando de instalações elétricas de baixa tensão, consideraremos apenas as componentes 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 pele e proximidade), porém, a reatância indutiva (X_L) varia diretamente com a frequência: $X_L = 2 \pi f L$.

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 60 Hz e 180 Hz, respectivamente (fundamental e terceira harmônica). Observe que, para um mesmo valor de L , temos $X_{L3} = 3 X_{L1}$ uma vez que $180 \text{ Hz} = 3 \times 60 \text{ Hz}$.

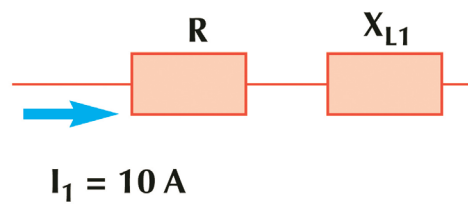
a) Redução do fator de potência

sem harmônicas



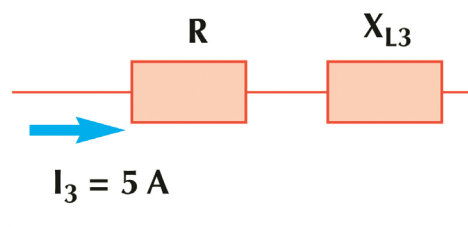
$$\begin{aligned} R &= 1 \, \Omega & X_{L1} &= 1 \, \Omega \\ P_1 &= R \cdot I_1^2 = 1 \cdot 11,2^2 = 125 \text{ W} \\ Q_1 &= X_{L1} \cdot I_1^2 = 1 \cdot 11,2^2 = 125 \text{ VAR} \\ \text{tg} \phi_1 &= Q / P = 125 / 125 = 1 \\ \rightarrow \cos \phi_1 &= 0,71 \end{aligned}$$

com 3ª harmônica



$$\begin{aligned} R &= 1 \, \Omega & X_{L1} &= 1 \, \Omega \\ P_1 &= R \cdot I_1^2 = 1 \cdot 10^2 = 100 \text{ W} \\ Q_1 &= X_{L1} \cdot I_1^2 = 1 \cdot 10^2 = 100 \text{ VAR} \\ \text{tg} \phi_1 &= Q / P = 100 / 100 = 1 \\ \rightarrow \cos \phi_1 &= 0,71 \end{aligned}$$

+



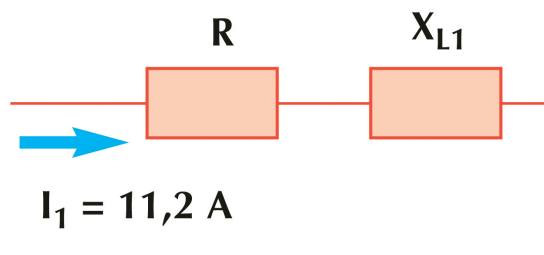
$$\begin{aligned} R &= 1 \, \Omega & X_{L3} &= 3 \, \Omega \\ P_3 &= R \cdot I_3^2 = 1 \cdot 5^2 = 25 \text{ W} \\ Q_3 &= X_{L3} \cdot I_3^2 = 3 \cdot 5^2 = 75 \text{ VAR} \\ \text{tg} \phi_3 &= Q / P = 75 / 25 = 3 \\ \rightarrow \cos \phi_3 &= 0,32 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{\text{TOTAL}} &= 100 + 25 = 125 \text{ W} \\ Q_{\text{TOTAL}} &= 100 + 75 = 175 \text{ VAR} \end{aligned}$$

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

b) Aumento da queda de tensão

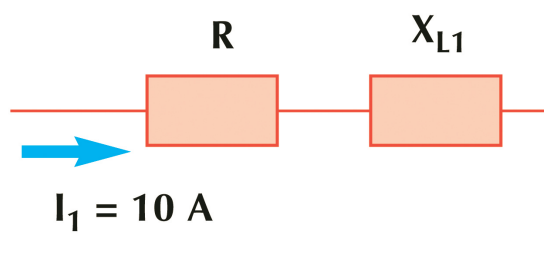
sem harmônicas



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

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

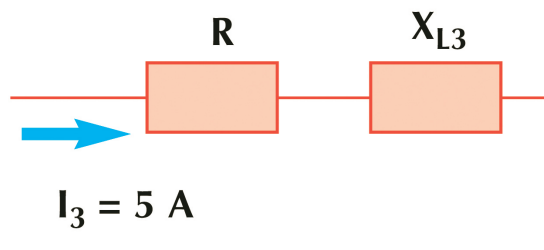
com 3ª harmônica



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

$$U_1 = 1,4 \cdot 10 = 14 \text{ V}$$

+



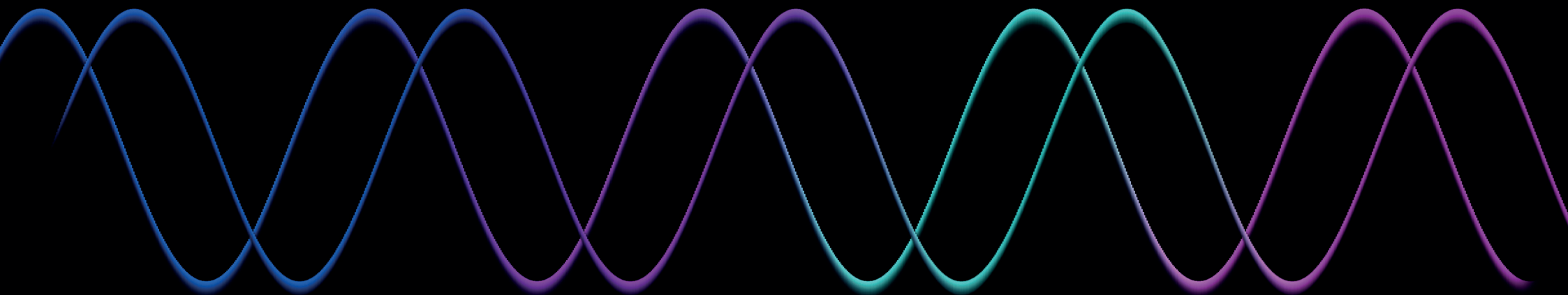
$$Z = \sqrt{1^2 + 3^2} = 3,2 \, \Omega$$

$$U_3 = 3,2 \cdot 5 = 16 \text{ V}$$

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

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 eletroeletrônicos, a presença de uma certa tensão entre neutro e terra pode prejudicar a sua correta operação.



CAPÍTULO 6



International Copper
Association Brazil
Copper Alliance

PRODUÇÃO: POTÊNCIA EDUCAÇÃO
AUTOR: HILTON MORENO

Como lidar com a presença das harmônicas

COMO LIDAR COM A PRESENÇA DAS HARMÔNICAS

6.1 DIMENSIONAMENTO DOS CONDUTORES 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, “*fator de medo*” (na realidade, o pessoal por aí dá um outro nome para esse fator, mas ele seria impublicável nessa seção), 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 dávamos um jeitinho de considerá-lo equilibrado, imaginávamos a corrente no neutro como sendo igual a zero, determinávamos a seção dos condutores fase e escolhíamos a seção do neutro como sendo metade da fase.

No entanto, quando existem 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:

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

Exemplos 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. 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, o valor da corrente de projeto I_B a considerar no cálculo da seção dos condutores é calculada por:

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

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.

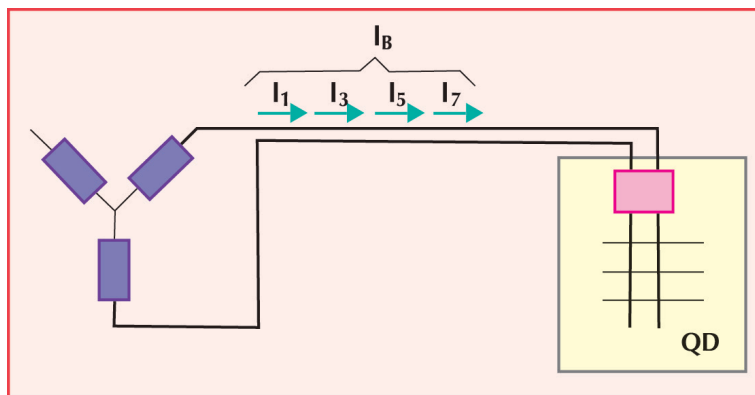


Figura 24

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 5410:2004 (ver tabela 7), 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 $S_F = 35 \text{ mm}^2$.

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

TABELA 7: TABELA 31 DA NBR 5410:2004

SEÇÃO NOMINAL (mm ²)	MÉTODOS 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
(1)	(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

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

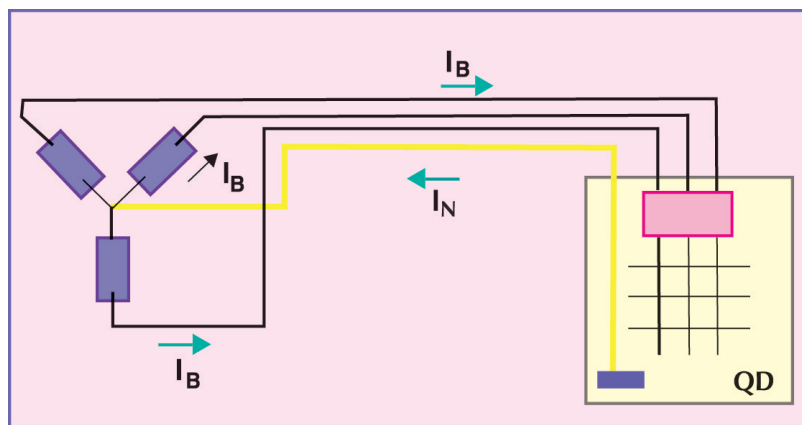


Figura 25

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 3 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 5410:2004 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 (Tabela 35 da NBR 5410) e a corrente fictícia de projeto $I_B = 127 / 0,8 = 153 \text{ A}$. Entrando com esse valor na Tabela 31 da norma, 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 $I_N = 171 \text{ A}$, o que resulta em uma corrente fictícia de projeto de $171 / 0,8 = 214 \text{ A}$, a qual nos leva a uma seção do condutor neutro de $S_N = 95 \text{ mm}^2$.

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 $S_F = 35 \text{ mm}^2$. Neste caso ainda, se o dimensionamento fosse feito como “antigamente”, a tendência seria reduzir o neutro para 25 mm^2 , conforme a Tabela 44 da NBR 5410:2004.

Em resumo, A tabela 8 apresenta a grande diferença entre os dimensionamentos considerando ou não a presença de harmônicas.

TABELA 8

	Seção do Condutor de Fase (mm^2)	Seção do Condutor Neutro (mm^2)
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 5410:2004, 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 31, 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 5410:2004, como sendo $3 \times 95 \text{ mm}^2 + 1 \times 95 \text{ mm}^2$.

O texto a seguir reproduz as prescrições da NBR 5410:2004 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_g é a corrente de projeto do circuito
- p é a porcentagem da harmônica de 3ª ordem (Tabela 45)
- f é o fator de correção (Tabela 45)

6.2 DIMENSIONAMENTO DE TRANSFORMADORES

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, quando 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 o quanto se deve reduzir a potência máxima de saída quando existirem harmônicas.

A expressão matemática mais usual para o fator de desclassificação 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:

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

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 1.000 kVA vale 1,2, então a máxima potência que esse equipamento poderia fornecer sem que houvesse sobreaquecimento seria igual a $1.000 / 1,2 = 833$ 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.

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.

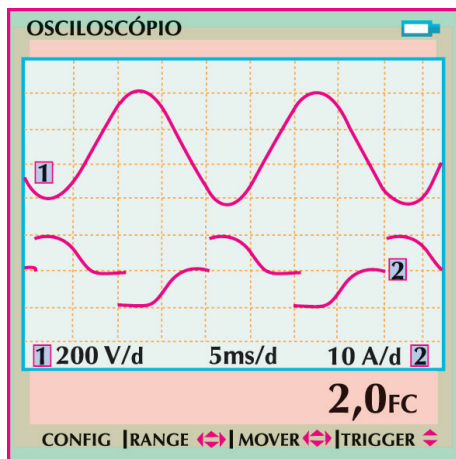


Figura 26 - Sinal com fator de crista (FC) = 2,0

Os instrumentos especializados em medição e análise de harmônicas facilitam a obtenção do fator K, dispensando 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 de K.

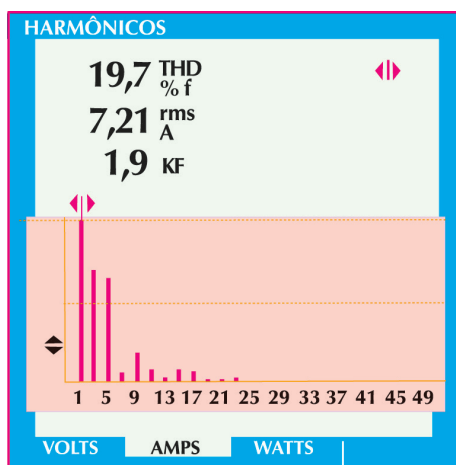


Figura 27 - Sinal medido no secundário de um transformador indicando o fator de desclassificação K = 1,9

6.3 NORMAS TÉCNICAS SOBRE HARMÔNICAS

Existem normas técnicas que tratam das harmônicas sob dois aspectos: a limitação da quantidade de harmônicas pelos equipamentos eletroeletrônicos e a limitação das harmônicas nas instalações elétricas.

Normas técnicas sobre equipamentos eletroeletrônicos:

- **IEC 61000-3-2** - Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-2: Limits - Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase)
- **IEC TS 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
- **IEC 61000-3-12** - Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-12: Limits - Limits for harmonic currents produced by equipment connected to public low-voltage systems with input current > 16 A and ≤ 75 A per phase

Como exemplo, a norma IEC 61000-3-2 estabelece as exigências sobre harmônicas que devem ser atendidas pelos equipamentos com menos de 16 A por fase, em redes de 220 V a 415 V, como computadores, televisores, etc.

A tabela 9, extraída da IEC 61000-3-2, indica os limites de emissão de harmônicas que equipamentos com mais de 50 W de potência devem atender. Os valores da tabela correspondem à corrente eficaz de cada componente harmônica.

TABELA 9

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	$3,85/n$	$0,15 \cdot 15/n$

Normas técnicas aplicadas às instalações elétricas:

- **IEC 61000-2-2** - Electromagnetic compatibility (EMC) – Environment - Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signaling in public low-voltage power supply systems
- **IEC 61000-2-4** - Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-4: Environment - Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances
- **IEC 61000-2-12** - Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-12: Environment - Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signaling in public medium-voltage power supply systems
- **IEC TR 61000-3-6** - Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-6: Limits - Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems
- **IEC TR 61000-3-14** - Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-14: Assessment of emission limits for harmonics, interharmonics, voltage fluctuations and unbalance for the connection of disturbing installations to LV power systems
- **IEC 61000-4-7** - Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-7: Testing and measurement techniques - General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto
- **IEC 61000-4-13** - Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-13: Testing and measurement techniques - Harmonics and interharmonics including mains signaling at a.c. power port, low frequency immunity tests
- **IEC 61000-4-30** - Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods
- **IEC TR 61000-1-4** - Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 1-4: General - Historical rationale for the limitation of power-frequency conducted harmonic current emissions from equipment, in the frequency range up to 2 kHz
- **IEEE 519** - IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems

A tabela 10 é uma reprodução da tabela 10.3 da IEEE 519.

TABELA 10: LIMITES DE DISTORÇÃO HARMÔNICA PARA SISTEMAS DE 120 V ATÉ 69 KV

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

6.4 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, como aqueles indicados em 6.3;
- 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. Para esta finalidade, existem soluções de atenuação e filtragem de harmônicas, que utilizam componentes passivos LC e também os filtros ativos, conforme descrito a seguir.

Filtro passivo com 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.

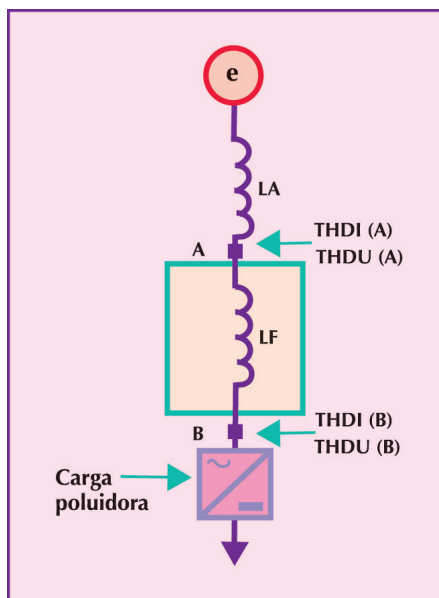


Figura 28 - Emprego de indutância para atenuação de todas as harmônicas

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

$$\text{Red} = \frac{LS}{(LS + LF)}$$

resultando em:

$$\text{THDU(A)} = \text{THDU(B)} \times \text{Red}$$

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.

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. Neste 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:

$$LP \times CP \times (2 \times \pi \times 5 \times 60)^2 = 1$$

$$LP \times CP = 0,281 \times 10^{-6}$$

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 $X_c = 1/2\pi fC$).

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.

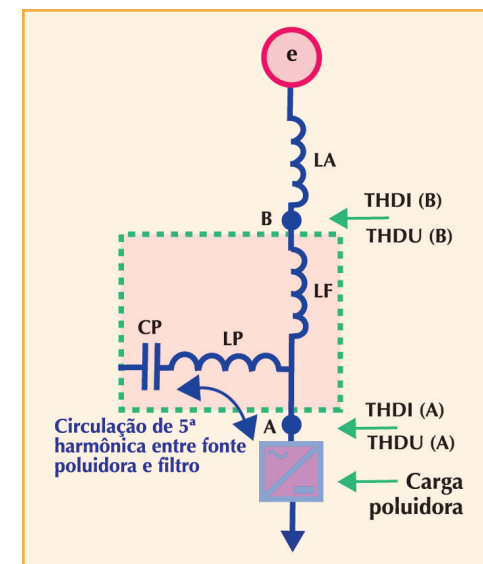


Figura 29 - Emprego de filtro de harmônicas ativo LC combinado com indutância para atenuação de uma harmônica específica (no exemplo, a 5ª harmônica)

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).

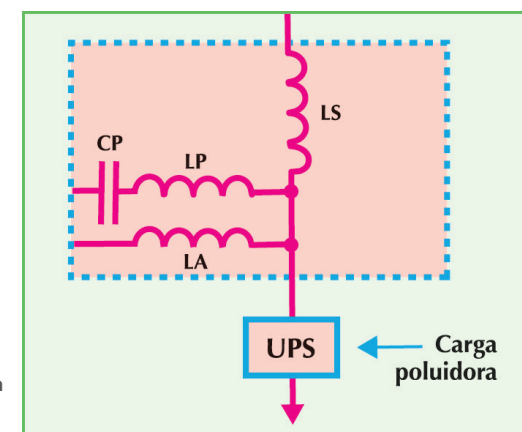


Figura 30 - Emprego de filtro de harmônicas ativo LC compensado, combinado com indutância para atenuação de uma harmônica específica

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.

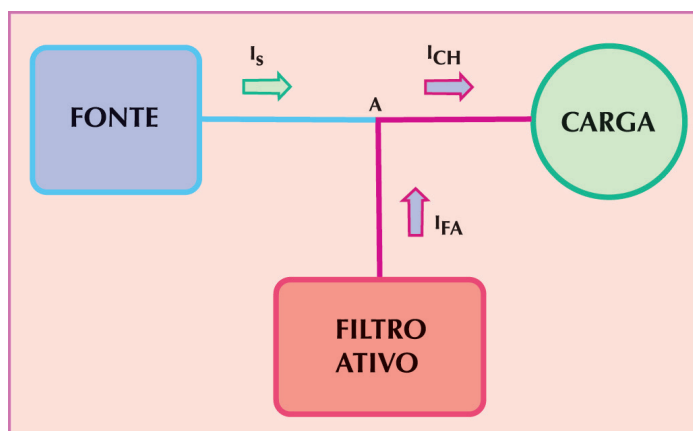


Figura 31 - Ligação típica de um filtro ativo de harmônicas

Filtro ativo

O filtro ativo é usualmente ligado em paralelo entre a fonte e a carga poluidora, conforme a Figura 31.

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 à 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 nominal 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.

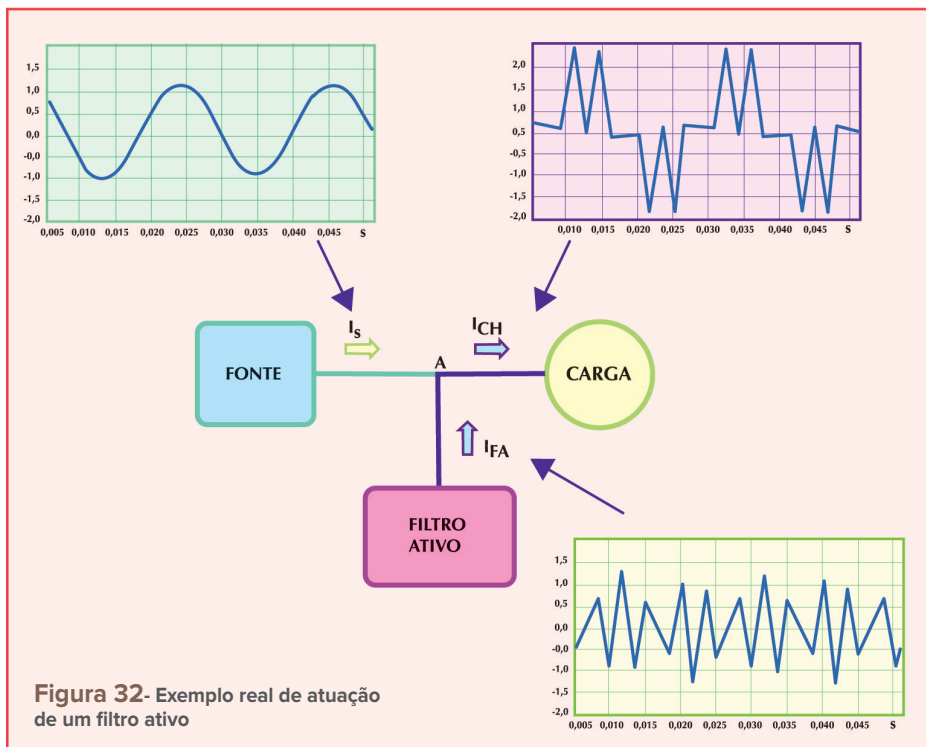


Figura 32- Exemplo real de atuação de um filtro ativo

6.5 TRANSFORMADOR 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 eles 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.

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)

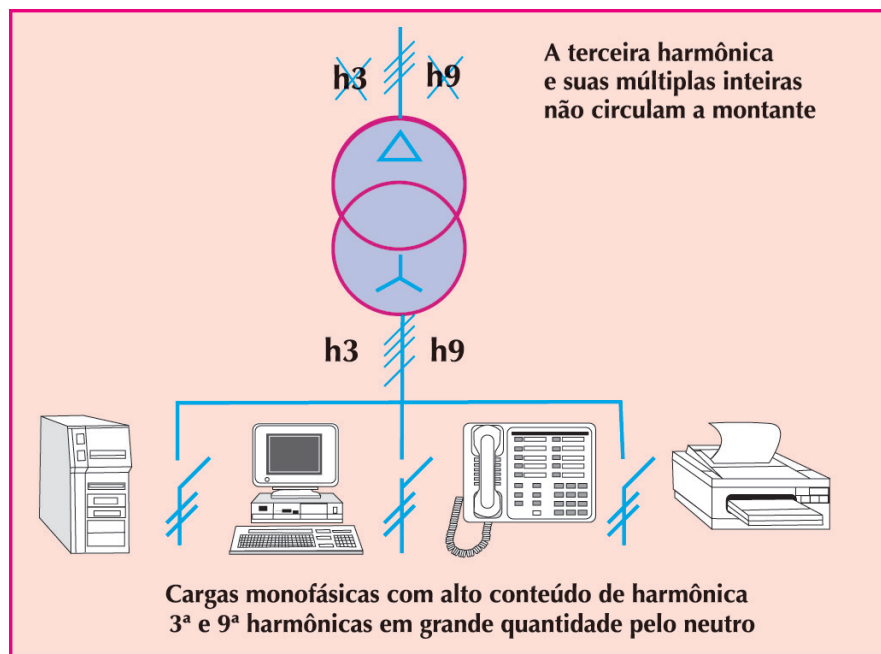


Figura 33- Transformador para confinamento de 3ª harmônica e suas múltiplas

Transformador de separação para 5ª e 7ª harmônicas e suas múltiplas

Se as cargas geradoras de harmônicas são trifásicas, predominam principalmente as harmônicas de ordem 5 e 7. 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 utiliza dois transformadores com diferentes ligações de forma a também 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 5ª e 7ª ordens. Isso porque, com essa defasagem angular, as harmônicas dessas ordens 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 ordens e, portanto, utilizando-se essa configuração, as primeiras harmônicas que podem aparecer são de 11ª e 13ª ordens.

Para que esta aplicação possa oferecer resultados satisfatórios, os transformadores devem alimentar apenas cargas trifásicas nos dois 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 deste arranjo é particularmente recomendado para a alimentação de quadros que atendem, principalmente, equipamentos como retificadores trifásicos, variadores de velocidade, etc.

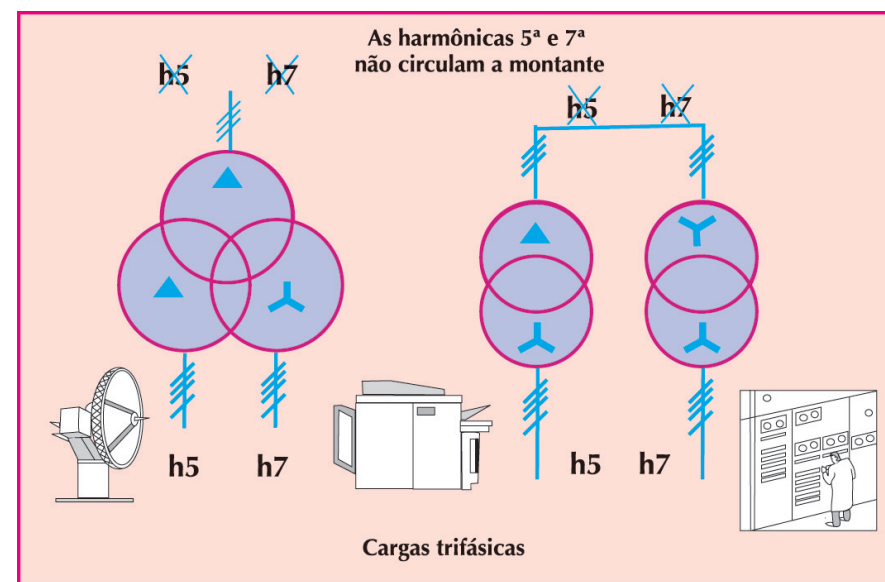


Figura 34 - Transformador para confinamento de 5ª e 7ª harmônicas

LEITURA COMPLEMENTAR

- Miguel, Angel Alberto Pérez e outros. La amenaza de los armónicos y sus soluciones. Centro Espanol de Informacion del cobre, Espanha (no Brasil, Procobre)
- Moreno, Hilton e Cotrim, Ademaro. Qualidade de energia – Harmônicas. Procobre Brasil
- Gonella, Giovanni. Um estudo comparativo dos harmônicos de torque gerados pelos inversores de tensão de frequência variável. Procobre Brasil
- Garcia, Flávio Resende. Harmônicos em sistemas industriais: uma cooperação entre concessionárias e consumidor. Procobre Brasil
- Desmet, Jan e Delaere, Gregory. Guia de Aplicação de Qualidade de Energia - Guia 3.5.2 – Seleção e dimensionamento de transformadores com harmônicas. Procobre Brasil
- Desmet, Jan. Guia de Aplicação de Qualidade de Energia - Guia 3.5.1 – Dimensionamento do neutro em instalações com harmônicas. Procobre Brasil
- Karve, Shri. Guia de Aplicação de Qualidade de Energia - Guia 3.3.3 – Filtros ativos de harmônicas. Procobre Brasil
- Fassbinder, Stefan. Guia de Aplicação de Qualidade de Energia - Guia 3.3.1 – filtros passivos de harmônicas. Procobre Brasil
- West, Ken. Guia de Aplicação de Qualidade de Energia - Guia 3.2.2 – True rms – A única medição verdadeira. Procobre Brasil
- Fassbinder, Stefan. Guia de Aplicação de Qualidade de Energia - Guia 3.1.2 – Capacitores em ambientes ricos em harmônicas. Procobre Brasil
- Styczynski, Zbigniew e Bien, Andrzej. Guia de Aplicação de Qualidade de Energia - Guia 3.1.1 – Inter-Harmônicas. Procobre Brasil
- Chapman, David. Guia de Aplicação de Qualidade de Energia - Guia 3.1 – Harmônicas: causas e efeitos. Procobre Brasil
- Sguaçabia, Robson R. e Carvalho, Marcelo M. e Lunardi, Thiago. Estudo de avaliação do impacto de distorções harmônicas sobre transformadores do tipo seco. Procobre Brasil

Autor da edição original de 2001:

Hilton Moreno - Engenheiro eletricista, professor, consultor do Procobre,
membro do Comitê Brasileiro de Eletricidade da ABNT.

Autor da revisão de 2019: Professor Engenheiro Hilton Moreno

O PROCOBRE - Instituto Brasileiro do Cobre promove campanhas de conscientização, gera pesquisas, produtos e tecnologia para novos usos do metal.

O cobre é elemento sustentável e essencial para os avanços da ciência, tecnologia e contribui para a formação e preservação da vida.

Atualize-se e conheça as novidades e benefícios do cobre no site:

www.procobre.org