

# **A MODERNA “EFICIENTIZAÇÃO” ENERGÉTICA E SEUS POSSÍVEIS EFEITOS SOBRE O DESEMPENHO OPERACIONAL DE EQUIPAMENTOS E INSTALAÇÕES ELÉTRICAS**

## ***Distorções Harmônicas – Uma Revisão de Conceitos Gerais***

**Eng. Marcos Isoni**

Diretor Técnico da CONeCT – Consultoria e Capacitação Técnica

### **1. INTRODUÇÃO**

Objetivando apresentar uma revisão geral de conceitos técnicos, este artigo procura abordar as influências e possíveis efeitos da aplicação das modernas técnicas de eficiência energética e “up-grades” tecnológicos sobre o comportamento de equipamentos e instalações elétricas, notadamente no que se refere ao surgimento e aos impactos das distorções harmônicas.

A abordagem desse tema, com foco nas instalações consumidoras de energia elétrica, é motivada por três importantes razões que, via de regra, têm contribuído para despertar grande interesse da comunidade técnica da área sobre o assunto. São elas :

-a crescente ênfase que se tem dado à *eficiência energética*, principalmente nos segmentos industrial e comercial, através da disseminação de informações e do estímulo à implementação de medidas calcadas na utilização de equipamentos e sistemas energeticamente mais atrativos, tais como os sistemas de controle de velocidade dos motores elétricos de indução e os reatores (ou balastros) eletrônicos para as cargas de iluminação; sabe-se que tais medidas, embora interessantes sob o ponto de vista eletro-energético em vários casos, podem promover a elevação dos níveis de distorções harmônicas nas instalações elétricas e gerar uma série de problemas técnicos, se adotadas indiscriminadamente.

-a elevação dos níveis de sensibilidade dos atuais equipamentos eletro-eletrônicos perante as variações da “Qualidade da Energia”, a maioria deles controlada através de sistemas microprocessados e outros componentes eletrônicos influenciáveis por muitos tipos de distúrbios que possam vir a ser gerados na rede elétrica onde encontram-se inseridos.

-a maior conscientização dos usuários finais de energia elétrica quanto à necessidade de manutenção do bom desempenho energético de suas instalações internas, buscando a minimização de paralizações e a redução de problemas ocasionados pelos efeitos negativos eventualmente gerados por equipamentos presentes em seus próprios sistemas.

O foco principal da abordagem aqui desenvolvida reside na correlação entre a moderna eficiência energética e seus possíveis efeitos sobre as características operacionais de equipamentos e das redes elétricas em si. O assunto é tratado basicamente em 2 etapas sistematizadas em 4 itens. Na primeira etapa (Itens 2 e 3) busca-se conceituar teoricamente, de maneira objetiva e didática, as “harmônicas” e caracterizar as distorções delas decorrentes. A segunda etapa (Itens 4 e 5) enfatiza, no Item 4, as fontes clássicas de distorções harmônicas e, de maneira genérica, seus possíveis efeitos sobre as instalações elétricas. No Item 5 são abordados, com enfoque qualitativo, os possíveis impactos dos modernos procedimentos de eficiência energética sobre a Qualidade da Energia nas instalações consumidoras,

sobretudo no que se refere aos efeitos mais específicos das distorções harmônicas sobre os principais componentes normalmente presentes (motores elétricos, transformadores, condutores, sistemas de iluminação, dispositivos de proteção, medidores de energia, etc).

As soluções geralmente adotadas para eliminar ou pelo menos minimizar os efeitos indesejáveis das distorções harmônicas (algumas delas apenas citadas no Item 6, Conclusões e Considerações Finais) não serão abordadas nesse artigo, pretendendo-se sistematizar o assunto em artigo técnico específico a ser possivelmente apresentando no futuro.

## 2. HISTÓRICO E CONCEITOS BÁSICOS

A partir do início do século XX, e há até algumas décadas atrás, as instalações elétricas em geral supriam, quase que exclusivamente, apenas cargas de natureza linear, ou seja, cargas constituídas essencialmente por elementos resistivos, indutivos e capacitivos, perfazendo-se impedâncias consideradas constantes. As “cargas lineares” são as que obedecem à *Lei de Ohm* e caracterizam-se por drenar da rede elétrica correntes proporcionais à tensão a elas aplicada, preservando-se formas de onda com comportamentos compatíveis entre si, ainda que possa haver defasamentos angulares entre elas (note-se que para um elemento reativo - capacitor ou indutor – haverá um defasamento entre a tensão e a corrente, mas o comportamento ainda será linear). Aquecedores resistivos, lâmpadas incandescentes e motores elétricos são exemplos de cargas que se comportam linearmente. As figuras 1a e 1b indicam o comportamento das ondas de tensão e corrente (em configuração monofásica) para um aquecedor resistivo e para um motor elétrico convencional, cargas tipicamente lineares.

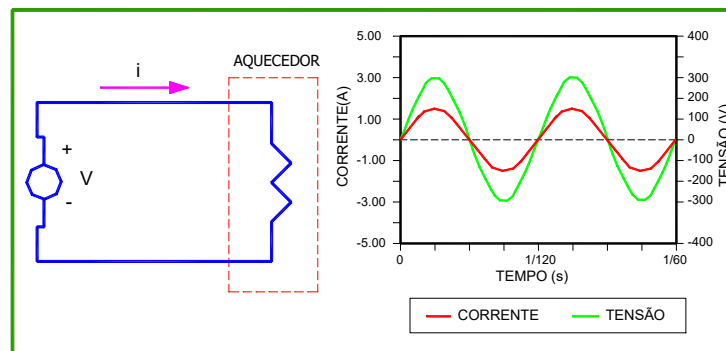


FIGURA 1a

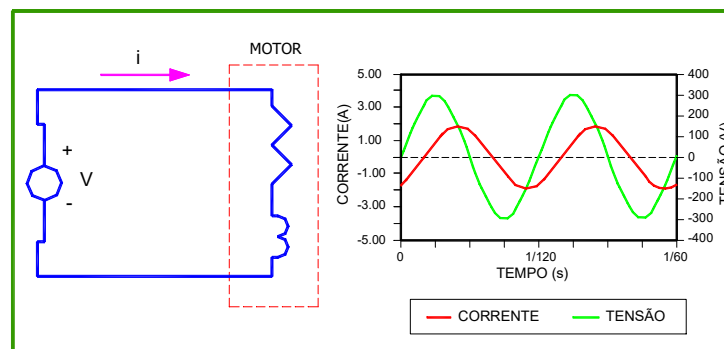


FIGURA 1b

Na primeira metade do século XX (período entre 1910 e 1960, aproximadamente) as cargas cuja corrente não se manifestava proporcionalmente à tensão aplicada, hoje denominadas “cargas não lineares”, eram pouco significativas, representando uma pequena porcentagem do total das cargas instaladas. Em geral, esse tipo de carga concentrava-se no setor industrial, em algumas instalações onde desenvolviam-se processos produtivos baseados em fenômenos eletroquímicos ou eletrometalúrgicos. Posteriormente também surgiram aparelhos de iluminação de descarga, utilizando reatores (balastos), que viriam a contribuir para com o aumento gradual do conjunto das cargas não lineares, principalmente nos segmentos industrial e comercial.

Entretanto, com o advento e desenvolvimento da eletrônica de potência e, fundamentalmente, com o surgimento dos dispositivos semi-condutores e o aperfeiçoamento da família dos transistores de potência e dos tiristores, foram disponibilizados recursos técnicos capazes de promover o controle do estado operacional de vários tipos de carga como, por exemplo, a dimerização de sistemas de iluminação, o controle de velocidade de motores elétricos e o controle de temperatura em equipamentos eletrotérmicos. Intensificou-se, também, o uso de diversos sistemas envolvendo retificações (conversões estáticas CA - CC) e inversões (conversões estáticas CC - CA). Acredita-se inclusive que, atualmente, cerca de 50% de toda a energia elétrica consumida nas instalações flua através de algum tipo de dispositivo baseado na eletrônica de potência antes de sua utilização efetiva.

Uma vez que os circuitos dos equipamentos baseados em tiristores operam geralmente segundo estados controlados de condução (tal como um interruptor fechado) e bloqueio (tal como um interruptor aberto) em função da polaridade da tensão da rede, diversas aplicações utilizam-se dessa possibilidade para controlar os instantes de condução (através dos ajustes de “gatilhamento” no circuito de disparo dos tiristores) e promover a variação da tensão nas cargas. Isso resulta em uma tensão com forma de onda não senoidal (na carga), gerando-se uma corrente elétrica também não senoidal (na carga e no sistema de alimentação elétrica). As Figuras 2a a 2d apresentam, respectivamente, um circuito típico incluindo um dispositivo de controle de tensão tiristorizado e possíveis formas de onda da tensão de rede, tensão na carga e corrente na carga e na rede.

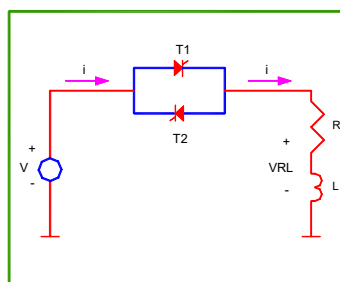


FIGURA 2a

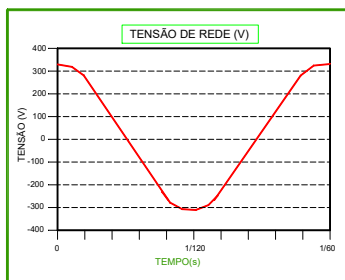


FIGURA 2b

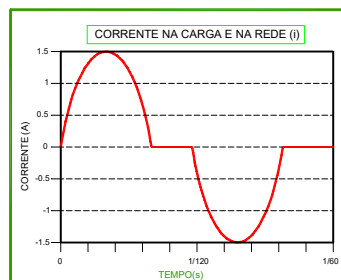


FIGURA 2c

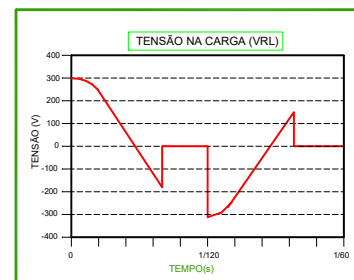


FIGURA 2d

Observando-se as Figuras 2c e 2d, verifica-se que as formas de onda de tensão (na carga) e de corrente (na carga e, conseqüentemente, também no circuito a montante) são “não-senoidais”, fato que imputa a essa carga a designação de “carga não linear” devido à presença do dispositivo de controle eletrônico. Ressalta-se também que, mantidos os instantes de “gatilhamento” dos tiristores a cada ciclo da onda de tensão da rede, as formas de onda resultantes serão periódicas (repetitivas) enquanto o circuito estiver em operação. Nessa situação, diz-se que há distorções nas formas de onda relativamente a uma senóide pura e tais desvios são usualmente denominados “Distorções Harmônicas”.

Para uma melhor definição do que vem a significar o termo “Distorções Harmônicas” é preciso, primeiramente, considerar a teoria desenvolvida no início do século XIX pelo matemático francês Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830). A teoria por ele proposta e aceita mundialmente, denominada “Série de Fourier”, é uma ferramenta matemática poderosa que permite que uma função não-senoidal periódica (repetitiva) ou, em outras palavras, uma onda periódica “distorcida”, possa ser representada como a soma de uma componente contínua – CC (chamada também de valor médio da onda), e uma série (infinitamente longa, se necessário) de funções alternadas (CA) senoidais. Essa teoria permite que a análise de ondas distorcidas (e, portanto, “pouco amigáveis”) possa ser realizada de forma mais simples, utilizando-se o recurso matemático da decomposição em formas de onda conhecidas. Portanto, uma onda periódica qualquer, expressa, por exemplo, em função da variável *tempo* (  $f(t)$  ), pode ser decomposta conforme a expressão a seguir.

$$f(t) = \frac{1}{2} A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_1 t + b_n \sen n\omega_1 t) =$$

$$= \frac{1}{2} A_0 + a_1 \cos \omega_1 t + a_2 \cos 2\omega_1 t + a_3 \cos 3\omega_1 t + \dots + b_1 \sen \omega_1 t + b_2 \sen 2\omega_1 t + b_3 \sen 3\omega_1 t + \dots$$

O termo  $\frac{1}{2} A_0$  é chamado de “componente contínua” da onda, quando existente. Os termos com coeficientes  $a_1$  e  $b_1$  referem-se à componente com freqüência fundamental. Os termos com coeficientes  $a_2$  e  $b_2$  referem-se à componente que se desenvolve com freqüência equivalente ao dobro da freqüência da componente fundamental; os termos com coeficientes  $a_3$  e  $b_3$  referem-se à componente que se desenvolve com freqüência equivalente ao triplo da freqüência da componente fundamental, e assim por diante. A constante  $\omega_1$  corresponde à freqüência em radianos da componente fundamental e equivale a  $2\pi/T$ , sendo T o período (ou a duração de 1 ciclo completo) desta componente periódica. Os coeficientes  $a_1, a_2, a_3, \dots, b_1, b_2, b_3, \dots$ , etc, podem ser determinados matematicamente através do Cálculo Integral para cada tipo de onda decomposta e representam as amplitudes ou valores de pico de cada componente senoidal / cossenoidal (as amplitudes são decrescentes à medida em que elevam-se as freqüências das componentes).

Numa função trigonométrica senoidal (ou cossenoidal) representativa do comportamento de uma dada grandeza elétrica (corrente ou tensão, por exemplo), para a qual os semiciclos positivo e negativo apresentam a mesma forma e amplitude, a componente contínua (ou o valor médio da onda) é nula e o termo  $A_0$  não existe. Sendo assim, para esse caso a expressão da Série de Fourier pode ser reescrita como indicado a seguir.

$$f(t) = \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sen n\omega t) =$$

As componentes alternadas dessa série apresentam freqüências que são múltiplas da freqüência fundamental e são denominadas “harmônicas” (ver *Boxe 1*). No caso da energia elétrica no Brasil a freqüência fundamental é 60 Hz (usualmente denominada “freqüência industrial”) e suas harmônicas de 3ª, 5ª, 7ª e 9ª ordem por exemplo, correspondem, respectivamente, às freqüências de 180 Hz (3x60Hz), 300 Hz (5x60Hz), 420 Hz (7x60 Hz) e 540 Hz (9x60Hz).

### **Boxe 1 - O porquê da denominação “harmônicas”**

*O termo “harmônicas” vem da física, mais especificamente do estudo dos movimentos ondulatórios. Quando uma partícula ou uma onda se propagam oscilando periodicamente (repetitivamente) em torno de uma posição de equilíbrio, esse movimento pode ser traduzido matematicamente por funções senoidais ou co-senoidais, denominando-se “movimento harmônico”.*

Tecnicamente uma harmônica é a componente de onda periódica cuja freqüência é um múltiplo inteiro\* da freqüência fundamental. Isso pode ser facilmente visualizado através da Figura 3. Nela apresentam-se três formas de onda distintas. Uma onda senoidal considerada à freqüência industrial (60 Hz) e duas outras representando determinadas ondas harmônicas. Como para a segunda e a terceira ondas os ciclos se repetem, respectivamente, 3 e 5 vezes no mesmo período de tempo em que a onda fundamental descreve apenas 1 ciclo, verifica-se que elas representam as harmônicas de 3ª e 5ª ordem (ou a 3ª e 5ª harmônicas) relativamente à onda fundamental. Conseqüentemente, oscilam com freqüências de 180Hz e 300Hz. Raciocínio análogo pode ser aplicado a outras ondas senoidais cujas freqüências sejam outros múltiplos da freqüência da onda fundamental.

\* Existem, também, harmônicas cujas freqüências não são múltiplos inteiros da freqüência fundamental e que são denominadas “*inter-harmônicas*”. Esse tipo de harmônicas é produzido, por exemplo, em circuitos de alimentação de fornos elétricos a arco devido, dentre alguns outros fatores, à característica aleatória e imprevisível dos arcos elétricos gerados entre os eletrodos.

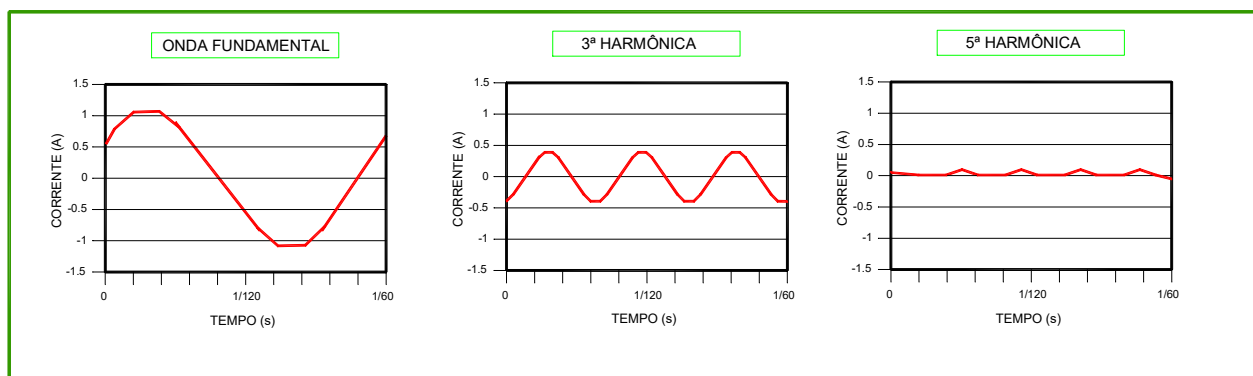


FIGURA 3

Na Figura 4 pode-se visualizar qual seria a forma de onda resultante da soma ponto a ponto das 3 formas de onda apresentadas na figura 3. O resultado é uma onda distorcida, que deixa de ser perfeitamente senoidal e que reflete uma “Distorção Harmônica”. Nesse caso específico, diz-se que a forma de onda resultante apresenta conteúdo de 3ª e 5ª harmônicas. Entretanto, os conteúdos harmônicos podem variar em uma ampla gama de frequências dependendo do tipo de carga em questão e da forma de controle da tensão e frequência aplicadas.

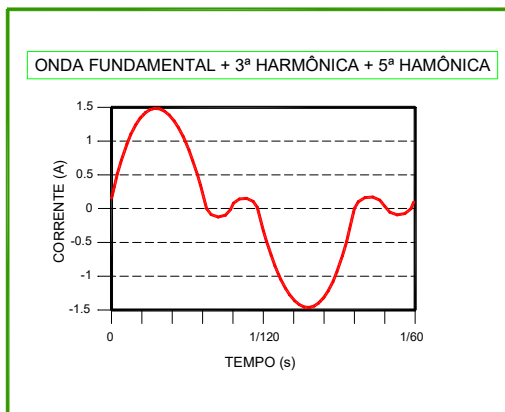


FIGURA 4

Esse fenômeno, causado nas instalações elétricas pelas cargas que apresentam-se como não-lineares (por características próprias ou quando submetidas ao controle operacional por meios eletrônicos), não se trata de um assunto do qual se tenha conhecimento apenas recentemente. Tais distorções são conhecidas há várias décadas. Entretanto, somente a partir dos últimos 20 anos os engenheiros da área elétrica têm estudado tais efeitos de forma mais abrangente e sistêmica, uma vez que tratam-se de distúrbios que podem vir a causar uma série de problemas nas instalações elétricas. Na realidade esse é um tema que vem adquirindo importância crescente nos últimos anos e que proliferou no meio técnico de maneira mais efetiva a partir da década de 1980, principalmente nos Estados Unidos, no âmbito do que se convencionou denominar “Power Quality” (termo adotado, na língua portuguesa, como “Qualidade da Energia”).

A expressão “Qualidade da Energia” traduz um conceito bastante abrangente sob o qual abrigam-se a identificação, a avaliação e a busca da minimização de vários tipos de distúrbios que podem se manifestar nas formas de onda de tensão e de corrente resultando em insuficiência, operação indevida, falha ou defeito permanente em um sistema ou rede elétrica. A gama de problemas que fazem parte do escopo de abrangência da “Qualidade da Energia” é extensa : variações de tensão - *transitórias*, *momentâneas* (“*sags*” e “*swells*”) e *sustentadas*, variações momentâneas de frequência, flutuações de tensão, “*flicker*”, desequilíbrios de tensão e distorções harmônicas, dentre outros.

Ainda não existe uma norma brasileira devidamente consolidada sobre esse assunto e, como fontes de diretrizes, referências e limites, têm sido adotadas documentações de fabricantes de equipamentos e normas internacionais. Nos últimos anos, diversas normas internacionais sobre o assunto foram publicadas, em particular a IEC 61800-3, IEC 61000-3-2, IEC 61000-3-4 e IEEE 519-92.

Na abordagem aqui desenvolvida serão tratadas apenas as questões relativas especificamente às distorções harmônicas geradas internamente às instalações consumidoras e que podem ser consideradas como “subprodutos” da eletrônica de potência. Juntamente com as variações instantâneas ou transitórias de tensão e os “Voltage Sags” (depressões, afundamentos ou mergulhos de tensão), tais distorções podem ser consideradas os distúrbios que mais afetam os sistemas elétricos industriais, inclusive com influências desfavoráveis sobre o comportamento energético de equipamentos e instalações, como será visto mais adiante.

### 3. DISTORÇÕES HARMÔNICAS – ALGUNS CONCEITOS TÉCNICOS

As ondas resultantes da distorção harmônica são ondas não-senoidais, desenvolvendo-se na mesma frequência e com o mesmo período da onda fundamental do sistema (observar novamente a Figura 4). Tais distorções são um fenômeno contínuo e estacionário, ou seja, estarão presentes sempre que sua fonte causadora encontrar-se em operação e desde que não se implementem meios para sua minimização ou eliminação.

A forma mais usual de expressão de uma distorção harmônica é a Distorção Harmônica Total ou DHT (muitas vezes utiliza-se a sigla THD, equivalente à expressão “Total Harmonic Distortion”, na língua inglesa). Esse índice, expresso geralmente sob a forma percentual, representa a distorção devida a todas as harmônicas presentes em uma onda resultante e é calculado através das equações apresentadas a seguir.

Equação básica :

Obs. : Valores eficazes (RMS).

$$DHT(\%) = \frac{\sqrt{\text{Somatório dos quadrados de todas as amplitudes das harmônicas presentes}}}{\text{Amplitude da onda fundamental}} \cdot 100$$

.Distorção Harmônica de Tensão (Total) :

$$DHT_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^n V_n^2}}{V_1} \cdot 100 [\%]$$

.Distorção Harmônica de Corrente (Total) :

$$DHT_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^n I_n^2}}{I_1} \cdot 100 [\%]$$

onde :

$n$  = ordem da harmônica ( $3^a$ ,  $5^a$ ,  $7^a$ , etc, devendo também ser consideradas as ordens pares, se existentes)

$V_n$  = tensão harmônica de ordem “ $n$ ” em Volts, valor eficaz (RMS)

$V_1$  = tensão fundamental em Volts, valor eficaz (RMS)

$I_n$  = corrente harmônica de ordem “ $n$ ”, valor eficaz (RMS)

$I_1$  = corrente fundamental em Volts, valor eficaz (RMS)

Caso seja necessário determinar a distorção individual provocada por uma componente harmônica específica, ou seja, o índice de distorção harmônica individual, utilizam-se as expressões a seguir, indicadas para a tensão e a corrente, respectivamente.

$$DH_{v(n)} \% = (V_{(n)} / V_1) \cdot 100$$

$$DH_{i(n)} \% = (I_{(n)} / I_1) \cdot 100$$

onde :

$n$  = ordem da harmônica ( $3^a$ ,  $5^a$ ,  $7^a$ , etc, ou uma harmônica de ordem par, se for o caso)

$V_{(n)}$  = tensão harmônica de ordem “ $n$ ” em Volts, valor eficaz (RMS)

$V_{(1)}$  = tensão fundamental em Volts, valor eficaz (RMS)

$I_{(n)}$  = corrente harmônica de ordem “ $n$ ” em Amperes, valor eficaz (RMS)

$I_{(1)}$  = corrente fundamental em Amperes, valor eficaz (RMS)

Observando-se todas essas expressões verifica-se que, para a determinação dos valores das distorções harmônicas totais e/ou individuais presentes em uma determinada instalação elétrica, é preciso que sejam determinados os valores de cada componente harmônica individualmente, ou seja, torna-se necessária a realização de medições específicas.

Medições de tensão e corrente à frequência fundamental não apresentam desafios para os instrumentos de campo normalmente utilizados (em geral, volt-amperímetros portáteis do tipo “alicate”). Entretanto, quando se deseja medir tais grandezas elétricas para analisar suas composições harmônicas, ou seja, à frequência fundamental e seus múltiplos, é importante que a instrumentação utilizada seja capaz de reproduzir com fidelidade as tensões e correntes em toda a faixa de frequência de interesse. Em geral essas medições são realizadas por meio de Analisadores de Harmônicas (ou Analisadores de Espectro de Frequências) – ver Figura 5, equipamentos portáteis específicos para esse fim, ou por registradores digitais de grandezas elétricas que incorporem esse tipo de função. Diferentemente dos equipamentos convencionais, tais instrumentos são capazes de “enxergar” o valor eficaz verdadeiro (“True RMS” – ver *Boxe 2*) da tensão e da corrente em uma determinada largura de banda, isto é, em uma faixa de frequências pré-especificada pelo fabricante dentro da qual torna-se possível realizar medições confiáveis. Em ambientes industriais por exemplo, é recomendável a utilização de aparelhos de medição cuja largura de banda tenha um limite superior de, no mínimo, 1020 Hz , frequência correspondente à  $17^a$  harmônica.





FIGURA 5 – ANALISADOR PORTÁTIL DE HARMÔNICAS

### **Boxe 2 – Instrumentos para medições “True-RMS”**

*Os instrumentos para medição de valores eficazes verdadeiros (True RMS) foram desenvolvidos devido à necessidade de se medirem valores eficazes de ondas não senoidais, ou seja, ondas possuidoras de conteúdo harmônico. O princípio de operação desse tipo de equipamento varia de fabricante para fabricante sendo que alguns deles realizam cálculos matemáticos internos e outros calculam o aquecimento efetivo produzido por um sinal alternado, que teoricamente equivale ao aquecimento gerado por um sinal contínuo. Uma possível definição para o valor eficaz de uma onda alternada pode ser escrito como sendo “o valor equivalente a um sinal contínuo que produza, sobre um mesmo meio condutor, a mesma dissipação de potência (ou o mesmo aquecimento)”*

A título de exemplo, na Figura 6 pode-se visualizar os resultados de uma medição real através de uma das telas disponibilizadas por um software específico para análise de harmônicas em caráter preliminar (é importante observar que a onda resultante apresenta algumas distorções relativamente a uma senóide pura). Os registros em campo foram obtidos por meio de um registrador digital de grandezas elétricas que incorpora funções de análise de harmônicas. Nessa tela vê-se a forma de onda da corrente na fase B de um circuito trifásico monitorado, a tabela contendo os percentuais (já calculados) de cada harmônica individual relativamente à onda fundamental, o valor eficaz (RMS) de cada componente harmônica presente e o espectro (sob a forma de gráfico em barras) relativo à representatividade percentual de cada harmônica. Na parte superior encontram-se indicados a data e o horário referentes a esses registros específicos, o valor eficaz resultante para a corrente na fase B e o resultado do cálculo da distorção harmônica total (DHT) para esse instante de medição (referência no ponto inicial da onda, à esquerda).

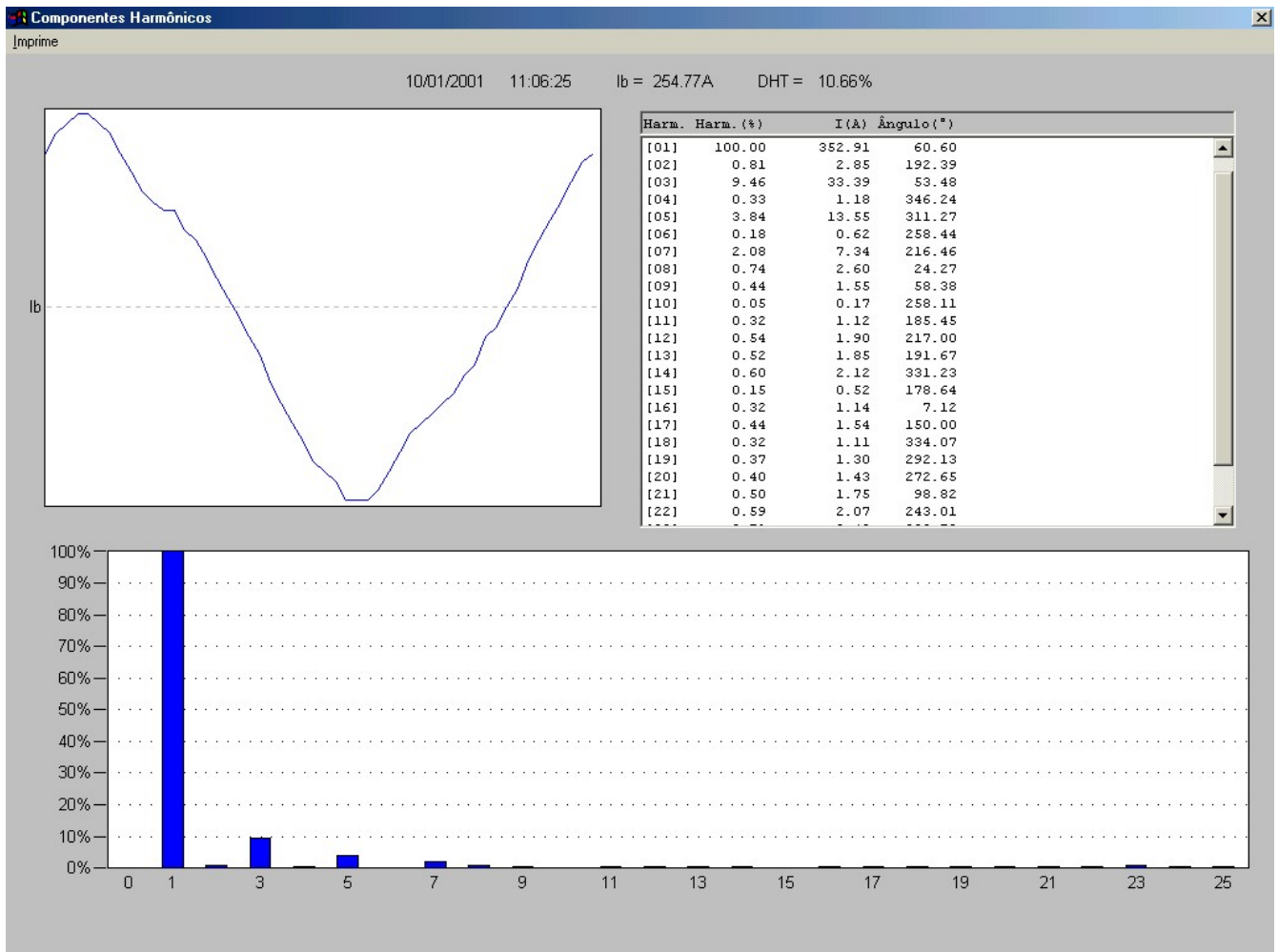


Figura 6- Exemplo de tela de software específico para decomposição (no caso, até a 25ª harmônica) e análise preliminar de uma onda distorcida

Percebe-se pela figura 5 que, nesse caso, a 3ª harmônica, com representatividade individual de 9,46%, praticamente define o nível da  $DHT_i$  (quantificada em 10,66%). A 5ª e a 7ª harmônicas, embora também contribuam para a distorção total, são bem menos representativas. As demais harmônicas presentes são praticamente desprezíveis.

Alguns outros aspectos interessantes relacionados às harmônicas são citados a seguir.

**-Harmônicas pares :** De maneira geral, as harmônicas de ordem par (2ª, 4ª, 6ª, etc) são raras nas redes elétricas industriais. Isso ocorre uma vez que os dispositivos eletrônicos que incorporam funções de retificação / inversão (os grandes geradores de harmônicas), sejam eles trifásicos ou monofásicos, normalmente operam com retificações de onda completa e geram, na linha de alimentação, sinais distorcidos, porém, simétricos e periódicos. Pela teoria de Fourier, é possível demonstrar matematicamente que para todo sinal que possua simetria de meia onda seus componentes pares são anulados (os termos  $a_n$  e  $b_n$  da Série de Fourier são nulos para  $n=2, 4, 6$ , etc (verificar a equação básica de Fourier no Item 2). Sendo assim, pode-se julgar que, a priori, a eventual presença de harmônicas pares é sinal

de que o controle dos semi-condutores nos dispositivos de retificação / inversão encontra-se desajustado.

**-Harmônicas de ordem mais elevada** : As harmônicas de ordem mais elevada e, portanto, com frequências superiores, apresentam amplitudes reduzidas fundamentalmente porque são suavizadas pelas próprias indutâncias presentes nas redes elétricas. Note-se que a reatância indutiva presente nas redes (e que configura-se como um dos tipos de oposição à circulação das correntes elétricas alternadas) é diretamente proporcional à frequência ( $X_L=2\pi fL$ ).

**-Dispersões, interferências e cancelamentos entre harmônicas** : Em vários casos a incidência das harmônicas se dá de forma mais pronunciada em determinados trechos de uma rede elétrica, circulando apenas em parte da instalação e não atingindo o(s) circuito(s) de alimentação geral. Isso se deve à possibilidade de ocorrência de cancelamentos em função dos ângulos de fase das harmônicas eventualmente presentes, o que pode incorrer na minimização substancial de suas magnitudes nos principais alimentadores. Essa situação induz ao raciocínio de que uma medição de harmônicas não deve ser realizada apenas no circuito de entrada de uma dada instalação. Na realidade é importante que o rastreamento seja realizado nos circuitos onde localizam-se as cargas não lineares e onde as harmônicas possam, teoricamente, vir a gerar problemas.

#### 4. PRINCIPAIS FONTES DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS

De maneira geral, as harmônicas podem ser classificadas como “harmônicas características” e “harmônicas não-características”. Uma “harmônica característica” trata-se de uma harmônica teoricamente previsível, ou seja, com amplitude e frequência esperadas, valores que, inclusive, podem ser determinados com boa aproximação durante a fase de projeto de uma instalação com base nas características do(s) equipamento(s) responsável(veis) pelo seu surgimento. As “harmônicas não características” são ondas imprevisíveis por surgirem em decorrência de efeitos aleatórios ou de modelamento prévio extremamente difícil. Comumente, as harmônicas características são as geradas por conversores de potência. As não características são geradas, via de regra, por lâmpadas de descarga e por equipamentos industriais com princípio de operação baseado no surgimento de arcos elétricos.

Na atualidade as fontes de harmônicas mais significativas são os conversores estáticos de potência representados, de modo genérico, pelos retificadores e inversores. São equipamentos que têm sido largamente disseminados a partir das últimas duas décadas (maior difusão no Brasil a partir dos anos 80) e cuja utilização se intensificou principalmente no segmento industrial, tendendo a se acentuar nos próximos anos. Há conversores de diversos níveis de potência e dos mais variados portes, destinados a aplicações diversas e com ampla utilização em instalações residenciais, comerciais e industriais.

A seguir serão citadas e comentadas as principais fontes de distorções harmônicas encontradas nas instalações elétricas.

## • **Sistemas de Retificação e Acionamentos CC**

No processo de retificação de uma onda alternada, um retificador “corta” a onda de corrente CA e permite que ela flua em apenas uma porção do ciclo da tensão de alimentação. O resultado à entrada do retificador (no lado da alimentação elétrica) é uma onda de corrente distorcida, normalmente rica em conteúdo harmônico. Os níveis de distorção e a configuração final da onda de corrente em cada fase da alimentação dependerão do número de pulsos utilizados para retificação (número de diodos ou de tiristores utilizados na(s) ponte(s) retificadora(s)) e do ajuste do ângulo de disparo no caso dos tiristores.

Em um retificador as correntes harmônicas presentes são dadas pela fórmula:  $nK \pm 1$  onde  $K$  é o número de pulsos do retificador e  $n$  é um número inteiro. Assim, para um retificador trifásico de 6 pulsos estarão presentes as harmônicas 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup>, 11<sup>a</sup>, 13<sup>a</sup>, 17<sup>a</sup>, 19<sup>a</sup>, etc. Industrialmente é bastante usual a utilização de retificadores (em ponte) de 6 pulsos para, por exemplo, a alimentação do enrolamento da armadura (rotor) dos motores de corrente contínua. Acionamentos de maior porte podem empregar retificadores de 12 pulsos, o que reduz os regimes de condução de corrente de cada tiristor individualmente e minimiza algumas das mais significativas e danosas correntes harmônicas nesses casos, tais como a 5<sup>a</sup> e a 7<sup>a</sup> (estarão presentes apenas as harmônicas de ordem 11, 13, 23, 25, etc). Um sistema com 12 pulsos apresentará um conteúdo harmônico total da ordem de 10 a 15%. Para 18 pulsos, a distorção será provavelmente inferior a 10%. Entretanto, quanto maior for o número de pulsos adotado, maior será o custo do retificador dada a maior complexidade de seu circuito interno.

## • **Fontes de Alimentação Monofásicas (Fontes Chaveadas)**

Os modernos equipamentos eletrônicos monofásicos tais como microcomputadores, impressoras, televisores, copiadoras, scanners, aparelhos de fax, centrais telefônicas, secretárias eletrônicas e demais equipamentos baseados em microprocessadores, empregam, quase que universalmente, fontes de alimentação chaveadas. Uma fonte chaveada é uma sucessão de dispositivos situados à entrada desses equipamentos, sendo ligada diretamente à linha CA sem a necessidade de transformador e compondo-se, basicamente, por uma ponte retificadora monofásica a diodo com retificação de onda completa, capacitor, circuito chaveador (transformação do sinal retificado em sinal CA novamente, porém, com alta frequência) e novo circuito retificador. As principais vantagens são peso e dimensões reduzidos, inexistência de transformador à entrada, operação eficiente e boa tolerância no que se refere a possíveis variações na tensão de alimentação.

Entretanto, devido ao efeito do primeiro bloco funcional da fonte chaveada (ponte retificadora e capacitor), a corrente à entrada (no lado da alimentação elétrica) flue em pulsos de curta duração, caracterizando uma onda periódica não-senoidal e, portanto, possuidora de conteúdo harmônico. Uma característica própria de uma fonte chaveada é a de provocar um significativo conteúdo de 3<sup>a</sup> harmônica na corrente drenada da rede elétrica. Considerando-se que as correntes de 3<sup>a</sup> harmônica de cada fase são somadas nos neutros dos sistemas trifásicos (o que será abordado mais adiante neste artigo), verifica-se ser preocupante a crescente aplicação de equipamentos monofásicos (fase-neutro) dotados de fontes chaveadas principalmente em edificações comerciais mais antigas, para as quais os condutores neutro (geral e secundários) não tenham sido dimensionados levando-se em conta os possíveis efeitos das harmônicas.

### • **Reatores eletrônicos para iluminação**

Reatores eletrônicos para iluminação também são equipamentos que utilizam-se das fontes chaveadas e que geram correntes harmônicas similares às geradas a partir dos microcomputadores e demais equipamentos eletrônicos modernos. A tensão de saída para as lâmpadas é controlada e aplicada a altas frequências, o que se torna possível por meio do emprego de inversores tiristorizados. O resultado é uma maior eficiência do sistema de iluminação (lumens/watt), ausência de efeito estroboscópico nas lâmpadas, menor dissipação de calor do que nos reatores eletromagnéticos (o que se reflete na redução da carga térmica a ser suprida pelos sistemas de condicionamento de ar) e a possibilidade de controle mais sofisticado como, por exemplo, a dimerização em alguns casos.

Com a crescente aplicação dos reatores eletrônicos aos sistemas de iluminação fluorescente a partir da última década, e considerando-se que, principalmente no segmento comercial e de serviços, tais sistemas podem vir a representar algo como 60% (ou até mais) da carga total instalada, verifica-se que existem possibilidades efetivas de ocorrência de sérios problemas em função do surgimento de distorções harmônicas. O mercado disponibiliza reatores eletrônicos com taxas de distorção harmônica consideravelmente variáveis dependendo do fabricante e do estágio tecnológico no qual o mesmo se encontra. Os principais fabricantes têm buscado a melhoria dos projetos objetivando a obtenção de ondas de corrente com menores conteúdos harmônicos. Em princípio, é prudente que sejam adotadas unidades com DHT<sub>i</sub> não superior a 10%.

É importante salientar que os reatores eletromagnéticos também produzem distorções harmônicas, o que será abordado no texto referente às lâmpadas de descarga, mais adiante.

### • **Controladores de Tensão (controles de iluminação e de aquecimento)**

Controladores de tensão podem ser utilizados para a regulagem do fluxo luminoso emitido por uma lâmpada (dimerização) ou do nível de aquecimento gerado em um elemento resistivo (controle da temperatura interna em um forno ou estufa, por exemplo). Em geral são dispositivos monofásicos ou trifásicos (dependendo das características da carga) dotados de semicondutores (tiristores) conectados em configuração anti-paralela (simples ou em ponte) de forma que o valor eficaz da onda de tensão em ambos os semi-ciclos possa ser variado por meio do ajuste dos instantes de gatilhamento dos tiristores. Para a redução do fluxo luminoso das lâmpadas ou a diminuição do calor gerado em resistências elétricas, faz-se com que os semicondutores operem por um tempo mais curto a cada semi-ciclo da tensão da rede, o que, em última análise, reduz a potência entregue à carga. Nessa situação, a corrente elétrica que flui do lado da rede (corrente de alimentação) apresenta uma forma de onda descontínua, não-senoidal e dotada de conteúdo harmônico, sendo tanto mais distorcida quanto menor for o tempo de condução dos tiristores dentro de 1 semi-ciclo da onda de tensão da rede.

### • **Conversores Trifásicos e Acionamentos CA**

Dentre os conversores estáticos de potência, equipamentos bastante significativos sob a ótica da geração de distorções harmônicas fundamentalmente nos segmentos industrial e comercial de maior porte, destacam-se aqueles cuja topologia elétrica inclui a *Ponte de Graetz*, tais como

os Inversores de Freqüência para controle de velocidade dos motores elétricos de indução e os UPS – *Uninterruptible Power Systems* (popularmente conhecidos como “No-breaks”).

Em um acionamento CA (um inversor de freqüência, por exemplo – ver Figura 7) a tensão de alimentação em 60 Hz é retificada e posteriormente invertida, produzindo-se uma tensão alternada de freqüência variável a ser aplicada ao motor elétrico com o objetivo de se controlar a velocidade de giro do rotor e manter a configuração da curva de torque (com a variação do binômio tensão-freqüência de forma a se preservar constante o quociente V/f). Usualmente esse tipo de acionamento utiliza-se de uma ponte inversora que emprega técnicas PWM (“pulse width modulation” ou modulação por largura de pulso – ver Figura 8), que permitem transformar a tensão CC gerada no módulo retificador em seqüências de grupos de pulsos CC positivos e negativos com a mesma amplitude da tensão CC original e com larguras (ou tempos de ocorrência) variáveis. O valor eficaz resultante simula o efeito de uma senóide. Via de regra, a corrente à entrada do acionamento (do lado da rede elétrica) será não-senoidal, possuirá conteúdo harmônico e a distorção gerada dependerá das características instantâneas de operação do motor, alterando-se para diferentes valores de torque e velocidade.

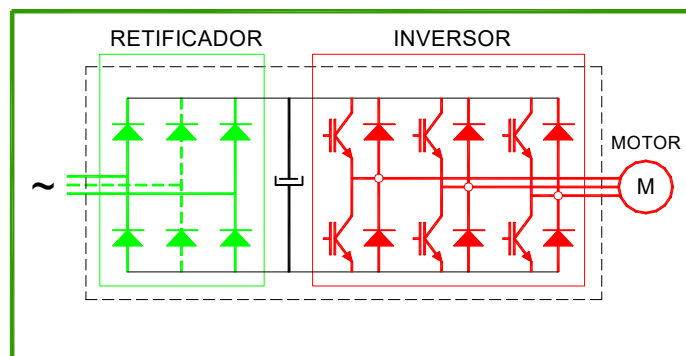


FIGURA 7 - ESQUEMA DE UM INVERSOR DE FREQUÊNCIA

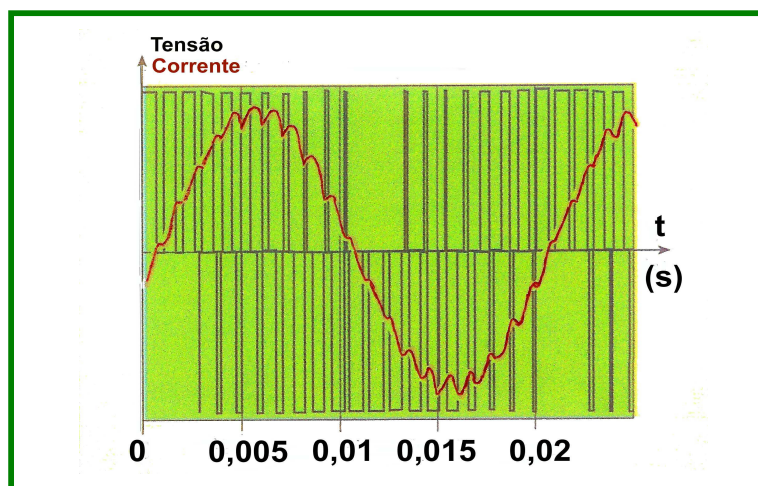


FIGURA 8 – TENSÃO COM PWM E CORRENTE EM UM ENROLAMENTO DO MOTOR ELÉTRICO ACIONADO

- **Dispositivos com princípio de funcionamento baseado em arco elétrico (Fornos a Arco, Soldas a Arco e Lâmpadas de Descarga)**

Lâmpadas de descarga operando com reatores eletromagnéticos ou eletrônicos (lâmpadas fluorescentes, a vapor de mercúrio, a vapor de sódio e a vapores metálicos), fornos a arco e equipamentos de solda a arco são cargas elétricas geradoras de distorções harmônicas uma vez que a tensão e a corrente dos arcos elétricos apresentam características não lineares. A partir do instante da ignição (início do surgimento do arco), a tensão (de arco) decresce à medida que a corrente (do arco) aumenta, situação que tende a um curto-circuito. Em algumas aplicações o comportamento do arco chega a ser aleatório e imprevisível, como no caso dos fornos e soldas a arco.

No caso das lâmpadas de descarga, os reatores operam como impedâncias externas limitadoras de corrente de forma que haja a estabilização do arco (e do fluxo luminoso) de acordo com as capacidades termo-mecânicas dos bulbos. Tanto os reatores eletromagnéticos quanto os eletrônicos produzem distorções harmônicas. Os eletromagnéticos as produzem em função do próprio comportamento do arco (uma vez que a corrente elétrica distorcida circula através deles, fato que provoca o surgimento tensões distorcidas) e os eletrônicos, que utilizam-se de fontes chaveadas, geram distorções em função de suas próprias características eletro-eletrônicas (citadas no texto relativo a “Reatores Eletrônicos para Iluminação”, anteriormente).

No caso dos fornos industriais a arco, a impedância que limita a tendência de elevação contínua dos níveis de corrente do arco elétrico é composta, principalmente, pela impedância própria do sistema supridor, pela impedância de cablagens de média tensão, pela impedância do transformador destinado à alimentação do forno e pela impedância de condutores secundários, barramentos e terminais de conexão. Correntes da ordem de 50.000 Amperes (nos eletrodos de um forno) são relativamente comuns. O conteúdo harmônico gerado é aleatório e amplamente variável em função de uma série de fatores tais como as características da carga a ser fundida e as condições de fusão, a posição dos eletrodos e, fundamentalmente, as variações imprevisíveis no comportamento do arco elétrico entre tais eletrodos. A corrente é não-periódica com conteúdos harmônicos inteiros e fracionários (esses últimos, denominados “inter-harmônicos”. Medições e estudos citados em documentações técnicas específicas revelam que, nos circuitos de alimentação de alguns tipos de equipamentos dessa natureza, as harmônicas inteiras entre a 2ª e a 7ª predominam sobre as demais. Tais estudos mencionam também que no estágio de fusão as componentes harmônicas apresentam amplitudes típicas da ordem de 8 a 10% da onda fundamental. Durante o refino do material fundido (estando o mesmo já em fase pastosa ou líquida), a forma de onda se torna simétrica, desaparecendo as harmônicas pares, e a amplitude chega a cerca de 2 a 3% da fundamental. Entretanto, é importante salientar que esses valores podem alterar-se e atingir patamares bem mais significativos dependendo das características construtivas do forno, de sua rotina operacional e de outras peculiaridades eventualmente existentes.

- **Dispositivos com Núcleos Magnéticos Saturáveis**

Equipamentos e dispositivos dotados de núcleos laminados (em geral confeccionados com pacotes de chapas de aço-silício) tais como os transformadores e motores elétricos, também podem induzir o surgimento de correntes harmônicas quando sobre-excitados (submetidos a

tensões mais elevadas que as tensões nominais). Isso ocorre em função do comportamento não linear do aço, uma vez que, a partir de um determinado nível de tensão aplicada, o fluxo magnético gerado não varia na mesma proporção. Esse fenômeno é conhecido como “saturação magnética” e traduz a incapacidade físico-química do aço em manter a proporcionalidade entre a tensão aplicada e o campo magnético gerado pela corrente circulante. Em outras palavras, isso significa que há um limite a partir do qual uma elevação da tensão primária não mais incorre na elevação da magnetização do núcleo na mesma proporção, gerando-se correntes de magnetização desproporcionais à tensão e, portanto, não-lineares. Essa distorção incorre no surgimento de tensões secundárias também distorcidas.

Com algumas exceções bastante específicas, os transformadores de força para utilização geral são, via de regra, projetados para operar satisfatoriamente abaixo do ponto de saturação, com uma densidade de fluxo adequada à manutenção das proporcionalidades das grandezas elétricas envolvidas. A operação desse tipo de equipamento pode ser ajustada a eventuais sobretensões permanentes na rede de alimentação por meio da utilização de comutadores de “taps” (derivações para ajuste de conexões elétricas), evitando-se o sacrifício das isolações, buscando-se manter um comportamento desejável entre as grandezas elétricas no primário e no secundário e, além disso, minimizando a possibilidade de surgimento de distorções harmônicas.

Motores elétricos, em função de características construtivas próprias e principalmente quando submetidos a tensões mais elevadas que as de projeto, também podem absorver da rede correntes elétricas distorcidas. Tais distorções apresentam conteúdos harmônicos cujas frequências são dependentes do número de ranhuras (saliências e sulcos ao longo dos quais acomodam-se os condutores) presentes no estator e no rotor.

## **5. PRINCIPAIS EFEITOS DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS SOBRE EQUIPAMENTOS E INSTALAÇÕES**

A adoção maciça de equipamentos baseados na eletrônica de potência como meios para a efficientização energética de uma instalação elétrica pode incorrer no surgimento de distorções harmônicas que, por sua vez, podem vir a causar efeitos instantâneos e gerar, com o decorrer do tempo, problemas cumulativos indesejáveis.

Efeitos instantâneos podem se manifestar por meio da ocorrência de perturbações em sistemas de telecomunicações, operação inadequada de equipamentos de comando e controle, falhas ou operação indevida de relés e/ou elementos de proteção em função de alterações nos valores das correntes circulantes, erros em medições elétricas, problemas no acionamento de cargas mecânicas (redução de conjugado ou torque nos motores elétricos), etc.

Efeitos cumulativos manifestam-se, via de regra, sob a forma de sobreelevações de temperatura podendo gerar a redução de vida útil ou a queima prematura de equipamentos (inclusive transformadores de potência e motores elétricos) e a diminuição do tempo médio entre falhas (MTBF ou “Medium Time Between Failures”) de componentes eletrônicos. Além disso, podem ocorrer totalizações incorretas de grandezas elétricas monitoradas continuamente por sistemas de gerenciamento energético em tempo real.



A seguir serão citados e comentados de forma mais específica os principais efeitos das distorções harmônicas em redes elétricas internas e nos equipamentos mais comumente empregados em instalações industriais e comerciais.

### • **Transformadores de Força**

As potências nominais dos transformadores de força baseiam-se em parâmetros de projeto que levam em consideração os limites permissíveis de aquecimento provocados por correntes alternadas senoidais à frequência fundamental (no Brasil, 60 Hz). Entretanto, perante o surgimento de ondas distorcidas possuidoras de conteúdos harmônicos consideráveis, verifica-se que a sobre-elevação térmica nesses equipamentos é mais pronunciada que o esperado para correntes senoidais puras de mesmo valor. A razão desse sobre-aquecimento reside no aumento das perdas no ferro e no cobre quando há a circulação de correntes harmônicas.

Quando um material ferromagnético, como o aço-silício usado nos transformadores, é submetido a um campo magnético gerado por correntes alternadas, as partículas elementares de sua estrutura molecular (dipolos magnéticos que se assemelham a minúsculos imãs contendo um pólo norte e um pólo sul magnéticos) invertem seu sentido a cada inversão de polaridade da corrente elétrica. Esse processo de magnetização e alternância na orientação dos dipolos provoca o surgimento de perdas causadas pelo atrito entre eles, gerando-se calor nas lâminas do núcleo dos transformadores. Tais perdas são conhecidas como *Perdas por Histerese* e elevam-se proporcionalmente com o aumento da frequência das correntes circulantes devido à maior velocidade com que ocorrem as alternâncias na orientação dos dipolos.

Concomitantemente com o aumento das Perdas por Histerese, a presença de harmônicas provoca também uma elevação das *Perdas por Correntes Parasitas de Foucault*, que tratam-se de perdas joulicas (aquecimento) decorrentes do efeito da variação do fluxo magnético que por sua vez gera a circulação de correntes elétricas nas lâminas do núcleo, em partes metálicas estruturais dos transformadores e em suas carcaças. Tais perdas são proporcionais ao quadrado da frequência das correntes circulantes.

Além de elevar as perdas por histerese e por correntes de Foucault, as harmônicas provocam ainda um aquecimento extra devido ao agravamento do Efeito Pelicular (“Skin-Effect”), assunto que será abordado de forma específica no texto referente aos condutores elétricos, mais adiante.

Outros aspectos importantes a considerar em se tratando da presença de distorções harmônicas referem-se à deformação da onda de tensão fornecida no secundário dos transformadores, à ressonância elétrica e ao Fator K.

**-Saturação magnética e deformação da onda de tensão secundária** - Na prática, estando um transformador sob tensão de placa (ou próxima a ela) no primário e submetido a condições de carga próximas ao valor nominal, o mesmo opera com um nível de indução magnética relativamente elevado, porém, abaixo do ponto de saturação do núcleo (ponto a partir do qual uma elevação da intensidade do campo magnético não mais incorre em variação da indução ou da densidade de fluxo magnético no núcleo, e tal fluxo permanece constante). A eventual

circulação de correntes harmônicas provoca o aparecimento de um fluxo adicional no circuito magnético, conduzindo-o à operação acima do ponto de saturação. Nessa situação, e levando-se em conta que a tensão induzida no secundário de um transformador é uma função da variação do fluxo e do número de espiras ( $e = N \cdot d\phi / dt$ ), essa “tentativa de se induzir mais tensão” torna-se ineficaz enquanto o núcleo estiver saturado (fluxo constante e  $d\phi / dt = 0$ ). Esse fato gera a deformação da onda de tensão fornecida e a amplificação dos efeitos indesejáveis das distorções harmônicas.

**-Ressonância elétrica (\*)** – No que se refere à ressonância elétrica, as correntes harmônicas podem estabelecer sobretensões na rede, sacrificando os transformadores (e também os capacitores) quando as reatâncias indutiva e capacitiva se igualam (atingindo o ponto de ressonância para uma dada frequência) e a corrente é limitada apenas pela resistência ôhmica dos circuitos envolvidos. Esse é um caso típico que pode ocorrer quando, por exemplo, um transformador é ressonante com um banco de capacitores no lado da carga para uma frequência harmônica presente na rede. Nesses casos, e considerando-se a baixa resistência ôhmica dos circuitos envolvidos (da ordem de miliohms) as correntes resultantes entre eles podem atingir valores elevadíssimos. Por essa razão, normas e estudos específicos costumam indicar regras práticas para a limitação da potência de bancos capacitivos no secundário dos transformadores como precaução em nível preliminar na tentativa de se minimizar a possibilidade da ocorrência de ressonância entre transformadores e capacitores principalmente para frequências harmônicas mais baixas, cujas ondas são de amplitude mais elevada.

(\*) *comentários adicionais sobre o fenômeno da ressonância encontram-se no texto referente aos Capacitores Estáticos, mais adiante.*

**-Fator K (“K-Factor”)** – Uma vez que a presença de harmônicas pode provocar o sobreaquecimento indesejável dos transformadores, é necessário adotar medidas que incorram em um funcionamento sob condições aceitáveis. É preciso reduzir a carga máxima admissível (considerada a presença de harmônicas) por meio do cálculo prévio do *Fator K (“K-Factor”)* global das cargas. O cálculo desse fator é um artifício através do qual pode-se definir a capacidade adicional requerida em um transformador para o atendimento adequado a uma carga geradora de correntes harmônicas. O Fator K, superior a 1 e normalmente variável até 50 (cargas com altíssimo conteúdo de harmônicas), é dado pela seguinte expressão :

$$K = \sum_{h=2}^{\infty} \left[ (I_h / I_1)^2 \cdot h^2 \right]$$

onde :  $I_h$  = corrente harmônica de ordem h  
 $I_1$  = corrente à frequência fundamental  
h = ordem da harmônica presente

Verifica-se que a parcela ( $I_h / I_1$ ) utilizada no somatório para cálculo do Fator K corresponde à relação (valor decimal) entre cada corrente harmônica presente e a corrente fundamental (60Hz) da carga máxima e, obviamente, é um dado obtido por meio de medições específicas no secundário do transformador (observar Figura 5) ou estimado ainda na fase de projeto.

De posse do Fator K, torna-se possível a determinação do máximo valor eficaz admissível para a corrente de carga (valor da componente fundamental a 60 Hz) de forma a se manter a operação do transformador sem que sejam excedidos os limites de temperatura operacional, considerados os efeitos das harmônicas presentes. Embora existam expressões matemáticas mais elaboradas e precisas para a determinação da corrente máxima admissível (que deverão ser consultadas na bibliografia técnica específica e utilizadas sempre que possível), a fórmula apresentada a seguir permite a obtenção de resultados com boa aproximação para transformadores trifásicos com conexão triângulo-estrela.

$$I_{\text{máx.}} = I_n \cdot \sqrt{1,15 / 1 + (0,15 \cdot K)}$$

Sendo assim, a corrente máxima admissível será dada em função de  $I_n$  (corrente nominal do transformador – equipamento existente no caso das instalações já em operação, ou pré-dimensionado ainda na fase de projeto com base apenas na corrente fundamental para a carga ou demanda máxima da instalação). No caso de cálculo de um Fator  $K=5$ , por exemplo, tem-se que o transformador existente (ou pré-dimensionado apenas pelos métodos clássicos) só poderá ser carregado com uma corrente fundamental equivalente a 81% de sua corrente nominal de forma que não haja sobreaquecimentos indesejáveis em decorrência dos efeitos das harmônicas presentes. Para um conjunto de cargas com Fator  $K=35$  (alto nível de conteúdo harmônico), sua corrente máxima à frequência fundamental deverá corresponder ao limite de cerca de apenas 43% da corrente nominal do transformador. A título de exemplo adicional, para um transformador com condição de carregamento contínua de 90%, um Fator  $K$  superior a 2,7 já poderá trazer problemas de sobreaquecimentos indesejáveis.

Alguns fabricantes projetam seus transformadores para aplicações especiais sob a presença de harmônicas informando, dentre vários outros dados, a potência nominal (geralmente em kVA) e o Fator  $K$ . Isso significa que o equipamento produzido estará apto a fornecer a potência nominal alimentando cargas cujo fator  $K$  global não exceda ao fator  $K$  de projeto do transformador. Obviamente que, nesses casos, o cálculo e a construção do transformador já consideram os efeitos térmicos e magnéticos das harmônicas até um determinado limite (definido pelo fator  $K$  de projeto).

A título de informação, o gráfico da Figura 9 indica relação média entre a expectativa de vida útil de um transformador (em horas de utilização) e a distorção harmônica percentual da corrente circulante ( $DHT_i\%$ ), considerando-se sua operação a plena carga.

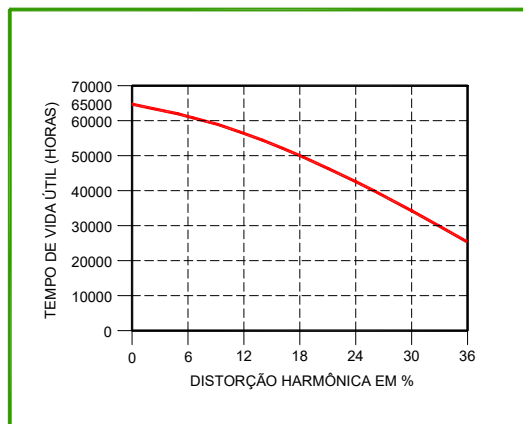


FIGURA 9 - VIDA ÚTIL DE UM TRANSFORMADOR SUBMETIDO A DISTORÇÃO HARMÔNICA

Um outro efeito a ser considerado quando os transformadores estão submetidos à presença de harmônicas reside na variação do ruído audível decorrente das vibrações das lâminas da chaparia do núcleo magnético. Sob altas frequências, as alternâncias de polaridade dos grãos magnéticos do aço-silício ocorrem com maior velocidade gerando ruídos mais intensos e, muitas vezes, variáveis.

#### • **Motores Elétricos de Indução (Motores Assíncronos)**

A presença de conteúdo harmônico na tensão de alimentação dos motores de indução, gerando-se a absorção de correntes harmônicas, provoca a elevação das perdas no cobre e no ferro.

As perdas no ferro, similarmente ao que ocorre nos transformadores, subdividem-se em perdas por correntes de Foucault e perdas por histerese. A elevação de tais perdas decorre da circulação de maiores níveis de correntes parasitas nas chaparias do rotor e do estator (perdas variáveis com o quadrado da frequência) e da geração de calor adicional no ferro da máquina em decorrência da elevação da velocidade de alternância magnética e do aumento do atrito entre os dipolos magnéticos da chaparia (perdas variáveis proporcionalmente à variação da frequência).

A elevação das perdas no cobre devido às correntes harmônicas que circulam nos enrolamentos (tanto nas bobinas do estator quanto na gaiola e/ou enrolamentos do rotor) podem ser consideráveis. Essa elevação de perdas assume maior significância em motores do tipo “barras profundas” e “gaiola dupla” nos quais a impedância global do rotor aumenta com o aumento da frequência do campo magnético “enxergado” pelo próprio rotor (*ver considerações técnicas no Boxe 3*).

#### **Boxe 3 – Revisão de Conceitos – Motores de Indução de Gaiola Dupla ou de Barras Profundas e Efeitos das Harmônicas**

##### **Princípio Básico de Funcionamento**

Apenas a título de revisão de conceitos, os motores de indução do tipo “Gaiola Dupla” ou “Barras Profundas” foram criados aproveitando-se um modo inteligente e simples que a engenharia de máquinas elétricas desenvolveu para se obter uma resistência de rotor que varie automaticamente com sua velocidade de giro. Tira-se proveito de que, com o rotor parado, a frequência por ele “enxergada” é igual à frequência do campo magnético girante no estator. À medida em que o rotor acelera, a frequência do campo “enxergada” pelo rotor decresce para valores bastante baixos, da ordem de 1 a 2 Hz à plena carga para um motor de 60 Hz, devido à pequena diferença entre a velocidade do campo magnético produzido no estator e a velocidade de giro do rotor (ambas as velocidades de giro se aproximam, fazendo com que o movimento relativo do campo em relação ao rotor seja mais lento). No caso do motor de gaiola dupla, por exemplo, como a máquina é projetada para que as linhas de fluxo magnético envolvam com mais intensidade os condutores da gaiola mais interna, esta fica sujeita a uma maior indutância e, conseqüentemente, a uma maior reatância indutiva quando a frequência do campo “enxergada” pelo rotor é elevada (momento da partida do motor, por exemplo). Sendo assim, as correntes induzidas no rotor para a geração do torque da máquina são quase que “expulsas” da gaiola mais interna (devido ao efeito de sua reatância indutiva nesse instante), vindo a circular com maior intensidade na gaiola mais externa cujos condutores possuem menor seção nominal e são confeccionados com uma liga de maior resistência ôhmica (ao contrário desta, a gaiola mais interna é projetada e construída para oferecer baixa resistência à circulação de correntes). O resultado é uma maior resistência global do rotor nesse instante e maiores perdas

joulicas (dada a concentração de corrente quase que exclusivamente em uma única gaiola). Porém, em contrapartida, como o torque de um motor de indução é diretamente proporcional à resistência do rotor, obtém-se um elevado torque de partida.

À medida em que o rotor acelera, a frequência do campo magnético “enxergada” por ele decresce e a indutância na gaiola mais interna se reduz fazendo com que a reatância indutiva nessa região da máquina assumam valores bem inferiores. Nessa situação, permite-se que as correntes induzidas no rotor redistribuam-se de maneira mais equalizada entre ambas as gaiolas, o que possibilita, também, um menor aquecimento do rotor e menores perdas de energia no cobre.

A mesma situação (desde rotor parado até rotor próximo da rotação nominal) ocorre no caso de um motor de gaiola profunda (ou de barras profundas), projetada e construída de forma que, ao longo da extensão de cada barra (no sentido da profundidade), a combinação de ligas possua características físico-químicas que incorram em resistência ôhmica variável (maior resistência nas adjacências do entreferro e menor resistência na direção do eixo).

Esses efeitos que, em última análise, ocorrem tal como o Efeito Pelicular (“Skin Effect”) abordado no item relativo aos Condutores Elétricos, são aproveitados no caso dos motores de gaiola com as categorias normalizadas H e D, normalmente aplicáveis no caso de acionamento de cargas que requeiram conjugados de partida mais elevados e para os quais não seja imperativa a utilização de motores de indução de anéis, também conhecidos como motores de rotor bobinado.

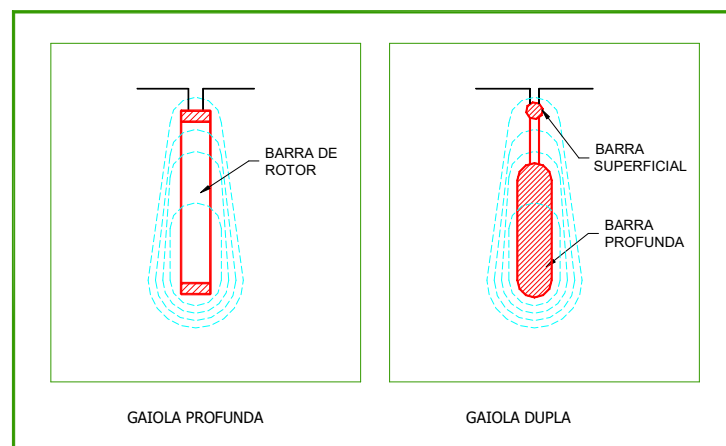


FIGURA 10

### Efeitos na presença das Harmônicas

Perante a presença das harmônicas os efeitos da elevação de frequência no rotor fazem-se sentir praticamente da mesma forma. Frequência elevadas induzidas no rotor provocam o surgimento de reatâncias indutivas mais acentuadas nas gaiolas internas (ou na parte mais interna da gaiola profunda), fazendo com que a corrente rotórica venha a circular mais intensamente nas regiões concentradas na periferia dos condutores que compõem o rotor, o que aumenta sensivelmente o seu aquecimento. Como tal situação perdura enquanto perdurar a presença das harmônicas, dependendo da condição de carregamento podem surgir pontos localizados de sobreaquecimento inadmissível que conduzem à danificação da máquina.

Outra consequência da presença das harmônicas nos motores elétricos trata-se do Efeito Pelicular (abordado mais adiante no item relativo aos Condutores Elétricos) que ocorre nos condutores dos enrolamentos do estator fazendo com que as correntes de frequência mais elevada circulem quase que totalmente na periferia da seção de cobre, o que aumenta a resistência efetiva de tais condutores e eleva as perdas de energia.

Além disso, um importante efeito indesejável e prejudicial à operação dos motores reside no fato de que as harmônicas de seqüência negativa, fundamentalmente a de ordem 5 (mas também a 11<sup>a</sup>, a 17<sup>a</sup>, etc), geram torques em sentido oposto ao gerado pela onda fundamental, tendendo a reduzir a capacidade para acionamento da carga mecânica acoplada ao eixo girante. Esse efeito é interpretado pelo motor como um acréscimo de carga no eixo (torque resistente), o que provoca a absorção de parcela adicional de corrente no estator. Numa situação limite, caso a condição de carga seja elevada e as proteções de sobrecorrente estejam mal dimensionadas ou não “enxerguem” adequadamente a presença das harmônicas, pode ocorrer a queima do motor.

Relativamente às alterações na eficiência operacional ou rendimento dos motores elétricos perante a presença das harmônicas, bibliografias específicas e estudos de caso reais detectaram elevações de perdas de cerca de 13% perante uma  $DHT_v$  de 16%, relativamente aos valores de perdas obtidos com uma alimentação senoidal pura. O gráfico da Figura 11 mostra a variação típica das perdas nos motores de indução em função da distorção total da tensão de alimentação.

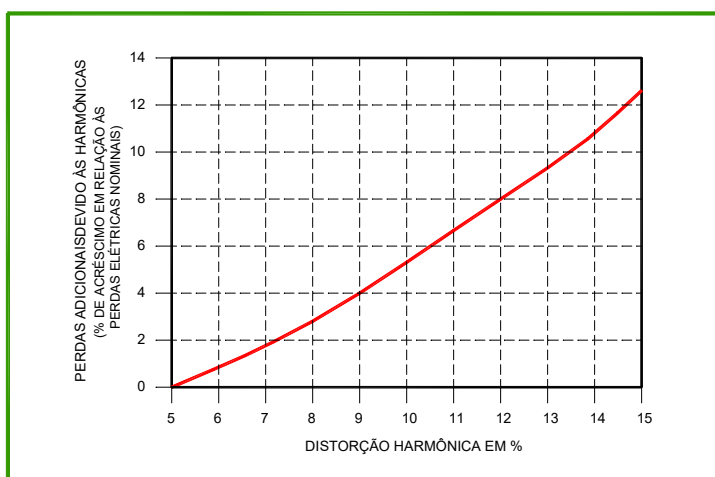


FIGURA 11 - PERDAS ELÉTRICAS ADICIONAIS DOS MOTORES DE INDUÇÃO

Um outro efeito também detectável quando da presença de harmônicas consiste no aumento do ruído audível (devido a vibrações adicionais) quando comparado com o ruído percebido perante a aplicação de tensão não distorcida.

#### • **Motores Elétricos Síncronos**

Os efeitos causados pelas harmônicas de tensão nos motores síncronos são similares aos verificados em motores assíncronos de indução. De maneira geral, há uma elevação das perdas no cobre e no ferro.

## • **Condutores Elétricos e Isolações**

Os condutores elétricos (tanto os de utilização geral em uma dada instalação quanto os condutores internos a transformadores, motores elétricos, etc) são afetados pelas correntes harmônicas devido ao agravamento do Efeito pelicular (“Skin-Effect”) e também ao Efeito de Proximidade.

O Efeito Pelicular, fenômeno físico que surge exclusivamente em circuitos de corrente alternada, é caracterizado pela circulação de uma maior parcela da corrente elétrica na periferia do condutor à medida em que se eleva a frequência (Hz). Em outras palavras, a profundidade de penetração da corrente alternada em um condutor é tanto menor quanto maior for a frequência desta. Esse fenômeno decorre de uma maior concentração de linhas de força magnética na parte mais interna do condutor perante frequência mais elevadas. Havendo mais linhas de força (ou fluxo magnético) no centro do condutor, essa região apresentará maior indutância e, conseqüentemente, reatância indutiva mais elevada. Dessa forma, a corrente desvia-se para as regiões de menor impedância, buscando a periferia da seção transversal. Em última análise, o Efeito Pelicular faz com que a seção transversal de um dado condutor, quando “enxergada” pela corrente elétrica, pareça inferior à sua seção nominal e o resultado é uma maior resistência elétrica à circulação dessa corrente. Nessa situação há um maior aquecimento, o que se traduz em maiores perdas de energia elétrica por Efeito Joule ( $RI^2$ ). O Efeito Pelicular se eleva com o aumento da frequência e com o diâmetro do condutor. De maneira geral tal fenômeno começa a se manifestar de forma mais pronunciada a partir de 350 Hz, ou seja, perante a presença das harmônicas de ordem 7 e superiores, o que deve ser avaliado por projetistas e equipes de manutenção. A bibliografia técnica específica sobre o assunto disponibiliza tabelas orientativas que indicam a variação média da resistência dos condutores em função do aumento da frequência das correntes circulantes.

O Efeito de Proximidade deve-se às distorções que campos magnéticos gerados em um dado condutor podem causar sobre a corrente elétrica circulante em um condutor adjacente. Em geral, esse problema pode se agravar devido à elevação do valor eficaz da corrente total circulante em um condutor em virtude da presença das harmônicas, fato que contribui para a elevação da intensidade do campo magnético gerado e aumenta as chances da ocorrência de um acoplamento indutivo perturbador em um condutor adjacente.

Apenas a título de informação, as perdas adicionais em um condutor por efeito pelicular e por efeito de proximidade, ambos decorrentes da circulação de correntes harmônicas, podem ser expressas matematicamente conforme indicado a seguir :

$$P_h = \sum_{h=2}^{\infty} I_h^2 \cdot R_h$$

onde :

$I_h$  = correntes circulantes no condutor em questão em cada frequência harmônica presente  
 $R_h$  = resistências do condutor em questão (em CA) para cada frequência harmônica presente, a serem calculadas através de equações matemáticas específicas em função do fator de efeito pelicular (no condutor em questão) e fator de efeito de proximidade (considerados cabos bipolares / tripolares ou condutores / cabos unipolares adjacentes).

No que tange ao dimensionamento de condutores na presença de harmônicas é importante salientar os seguintes aspectos :

-Cada componente harmônica possui valor eficaz próprio que gera aquecimento no condutor e provoca uma queda de tensão. Há, portanto, um efeito cumulativo resultante da ação conjunta da onda fundamental e de todas as harmônicas presentes que deve ser considerado quando da aplicação dos critérios iniciais de dimensionamento de condutores (critério da capacidade de condução de corrente e critério da máxima queda de tensão admissível).

-Na fase de projeto (ou em procedimentos de diagnóstico e readequação de instalações), quando estiver prevista a ocorrência de harmônicas em um determinado circuito, a determinação da corrente de projeto para o correto dimensionamento dos condutores pelo critério da capacidade de condução de corrente (ou ampacidade) exige que as harmônicas sejam consideradas juntamente com a onda fundamental, conforme indicado a seguir :

$$I_{\text{projeto}} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + I_5^2 + \dots +}$$

**Nota :** Quando do desenvolvimento de projetos de novas instalações as correntes harmônicas deverão ser estimadas (com base em informações técnicas obtidas junto aos fabricantes das cargas não lineares previstas ou com base em dados clássicos obtidos em literaturas técnicas ou, ainda, considerando-se o comportamento de instalações similares conhecidas). No caso da realização de diagnósticos para adequação de instalações já existentes, as correntes com conteúdos harmônicos deverão ser medidas utilizando-se aparelhos capazes de medir o valor eficaz verdadeiro (“true-rms”).

-A norma NBR-5410/97 da ABNT (“Instalações Elétricas de Baixa Tensão – Procedimento”) indica duas formas básicas para a determinação da corrente de projeto de um circuito. A primeira delas toma como base a escolha dos cabos em função das correntes de linha (cabos-fase) e se aplica quando os percentuais previstos para a 3ª harmônica são de até 33% relativamente à corrente eficaz à frequência fundamental. A segunda baseia-se na escolha dos cabos em função da corrente de neutro e se aplica quando tais percentuais são superiores a 33% (nessa situação, o valor eficaz da corrente total circulante no condutor neutro será igual ou superior ao valor eficaz das correntes circulantes nas fases – **ver item seguinte : “Condutor Neutro”**). A Tabela 1 reproduz a Tabela 45 apresentada na NBR-5410.

**TABELA 1 – 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

A corrente de projeto a ser considerada para a determinação dos condutores a serem escolhidos pelo critério da capacidade de condução (critério inicial de análise, a ser



posteriormente refinado pelos demais critérios de dimensionamento indicados na norma) deverá ser definida pelas seguintes fórmulas :

-Para escolha dos cabos pela corrente de fase :  $I = \frac{I_B}{f}$

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

onde :  $I_B$  = corrente de projeto do circuito (carga máxima + sobrecargas admissíveis)

$p$  = valor decimal correspondente à porcentagem prevista para as harmônicas de 3ª ordem (1ª coluna da Tabela 1 desse artigo ou Tabela 45 da NBR-5410)

$f$  = fator de correção (2ª ou 3ª colunas da Tabela 1 desse artigo ou Tabela 45 da NBR-5410)

### • Condutor Neutro

Como é do conhecimento dos profissionais e estudantes da área elétrica, em um sistema trifásico as tensões de cada fase com relação ao neutro (e também as tensões entre fases) encontram-se defasadas entre si de 120° elétricos. Considerando-se uma rede em configuração estrela a 4 fios (3 fases + neutro), não há corrente no condutor neutro quando as cargas são perfeitamente equilibradas entre as 3 fases. Mesmo perante eventuais desequilíbrios de carga, situação necessária para que haja circulação de corrente no condutor neutro, tal corrente (de desequilíbrio) em geral não se torna preocupante quando são alimentadas apenas cargas lineares. Esse fato tem sido explorado pelos projetistas de instalações há décadas, uma vez que, considerando-se a presença apenas de cargas lineares e/ou cargas geradoras de baixíssimos conteúdos harmônicos, em princípio um condutor neutro com seção nominal inferior à seção dos condutores fase (ou, no máximo, com a mesma seção) torna-se suficiente para atender aos desequilíbrios de carga. As versões mais antigas da norma NBR-5410/97 da ABNT (“Instalações Elétricas de Baixa Tensão – Procedimento”) indicavam, inclusive, tabelamentos específicos permitindo a utilização de condutores neutro com bitola inferior à dos condutores fase.

Entretanto, perante a presença mais pronunciada de harmônicas o dimensionamento do condutor neutro requer maior atenção e rigor. Isso torna-se necessário uma vez que as correntes de 3ª harmônica e seus múltiplos ímpares (9ª, 15ª, 21ª, etc) eventualmente circulantes pelas fases dos circuitos 3F+N estão em fase e somam-se algebricamente no neutro – ver Figura 12. Sendo assim atingem, nesse condutor, um valor eficaz equivalente ao triplo de seu respectivo valor eficaz verificado em cada fase (no caso de circuitos trifásicos equilibrados). As demais harmônicas eventualmente presentes nas três fases (5ª, 7ª, 11ª, etc) não estão em fase e, quando somadas no neutro, resultam em valores superiores aos circulantes individualmente em cada fase, porém, inferiores ao triplo de cada valor individual. Correntes harmônicas pares eventualmente presentes, e quando equilibradas nas três fases, se cancelam no neutro já que serão iguais e defasadas de 120° elétricos, tal como a onda fundamental.

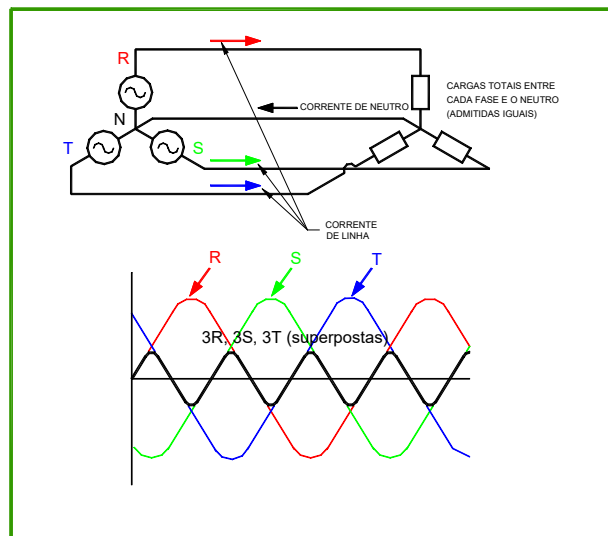


FIGURA 12 - CIRCUITO TRIFÁSICO A QUATRO CONDUTORES COM CARGAS NÃO-LINEARES EQUILIBRADAS NAS TRÊS FASES: CORRENTES FUNDAMENTAL E DE 3ª HARMÔNICA

Face ao aqui exposto, perante a presença de harmônicas (cujas ordens e valores eficazes deverão ser previamente conhecidos) é possível e absolutamente correto obter-se um dimensionamento para o condutor neutro que incorra em uma seção nominal superior (em alguns casos significativamente superior) à dos condutores fase.

O rigor no dimensionamento do condutor neutro é fundamental principalmente no caso de instalações destinadas à alimentação de blocos consideráveis de cargas monofásicas não lineares como é o caso de edificações comerciais e outras similares, com grande número de microcomputadores e demais equipamentos de tecnologia da informação (nos quais predominam as fontes monofásicas chaveadas, geradoras de altos conteúdos de 3ª harmônica), além da presença de circuitos com lâmpadas fluorescentes. A ocorrência de sobrecarga excessiva do condutor neutro é particularmente problemática no caso de edificações mais antigas cuja modernização interna contempla a introdução de cargas de informática e reatores eletrônicos sem que a infra-estrutura elétrica seja reavaliada com o devido critério.

Além das sobrecargas e sobreaquecimentos excessivos que podem surgir no condutor neutro perante a circulação de harmônicas (principalmente a 3ª e seus múltiplos ímpares), outro efeito prejudicial às instalações diz respeito à possibilidade de surgimento de uma excessiva diferença de potencial entre os condutores Neutro e Terra (condutor PE). A circulação de correntes harmônicas significativas no neutro pode provocar um diferencial de tensão entre esse condutor e o condutor terra (diretamente conectado ao sistema de aterramento), uma vez que a impedância do neutro não é nula. Alguns equipamentos eletrônicos necessitam, para uma operação adequada, que essa diferença de potencial seja quase nula (em geral, inferior a 1 Volt).

Uma boa medida para se evitar os efeitos indesejáveis decorrentes da circulação de elevados níveis de corrente no condutor neutro (fundamentalmente quando da presença de harmônicas)

consiste em se evitar, tanto quanto possível, a alimentação de equipamentos monofásicos não lineares em tensão fase-neutro. No caso de instalações atendidas por transformadores trifásicos com secundários em 220 / 127 Volts, deve-se estudar a possibilidade de alimentar os equipamentos monofásicos geradores de harmônicas em tensão fase-fase, descartando-se a utilização do condutor neutro para tais equipamentos. Não havendo condutor neutro para a alimentação de tais equipamentos não haverá circulação de harmônicas pelo neutro da instalação. Considerando-se que hoje em dia a quase totalidade das cargas de informática admitem alimentação bi-volt, que vários equipamentos eletrônicos podem ser alimentados em amplas faixas de tensão (alguns deles com regulagem automática sem a necessidade de seleção prévia) e que o mercado disponibiliza reatores eletrônicos e eletromagnéticos para a tensão de 220 V, essa medida pode viabilizar-se no todo ou em parte na grande maioria dos casos.

### • **Capacitores Estáticos**

Os capacitores estáticos são normalmente utilizados em instalações elétricas para a correção do fator de potência, absorvendo correntes com ângulo de fase adiantado com relação à tensão para contrabalançar as correntes atrasadas drenadas por cargas indutivas. Dessa forma, eliminam eventuais ônus nas contas de energia devido ao baixo FP e, quando instalados na baixa tensão, proporcionam a obtenção de benefícios adicionais tais como a redução das condições de carregamento de alimentadores e transformadores (com a conseqüente redução das perdas “joulicas”) e a melhoria dos níveis de tensão em pontos mais distantes da(s) subestação(ões).

Há um conceito errôneo de que os capacitores são causadores de distorções harmônicas. Na realidade eles não geram harmônicas; porém, podem agravar os problemas potenciais das harmônicas como será visto mais adiante. É relativamente comum, inclusive, que a presença das harmônicas (e suas conseqüências) em uma determinada instalação elétrica venha a ser conhecida apenas a partir do momento em que se utilizam capacitores para a correção do fator de potência.

Perante a presença de correntes harmônicas (de freqüência mais elevada) na rede, os capacitores podem ser submetidos a esforços térmicos inadmissíveis com a possibilidade real de queimas prematuras, uma vez que a reatância capacitiva diminui com o aumento da freqüência. Sendo assim, as correntes harmônicas encontrarão um caminho de menor impedância através dos capacitores, elevando suas perdas ôhmicas, gerando sobreaquecimentos que reduzirão sua vida útil e que poderão, inclusive, provocar explosões.

Além disso, a aplicação de capacitores estáticos em instalações onde encontram-se cargas não lineares (e, portanto, geradoras de harmônicas), requer a avaliação de potenciais problemas relativos à ocorrência de ressonância. Apenas a título de revisão da teoria de circuitos elétricos, “Ressonância Elétrica” é a situação que ocorre a uma dada freqüência particular para a qual os efeitos indutivo e capacitivo em um circuito se cancelam mutuamente, o que faz com que tal circuito “aparente ser” meramente resistivo. A ressonância pode ser do tipo “série” (quando o fluxo de corrente enxerga elementos indutivos e capacitivos em série) ou do tipo “paralela” (quando o fluxo de corrente enxerga elementos indutivos e capacitivos em paralelo), ou mesmo uma conjugação de ambas as situações. Em ambos os casos (considerando-se desprezível a

resistência ôhmica do circuito em relação às reatâncias indutiva e capacitiva) a frequência de ressonância pode ser calculada com boa precisão através da expressão a seguir :

$$f = 1/(2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C})$$

onde :

- .f = frequência (Hz) para a qual um sistema (composto por uma indutância L e uma capacitância C) entra em ressonância;
- .L = indutância (Henry), por exemplo, de um transformador (ou mesmo a indutância equivalente da instalação como um todo);
- .C = capacitância (Farad) de um banco de capacitores.

Na prática, os casos mais comuns ocorrem quando a indutância da fonte de alimentação (um transformador, por exemplo) entra em ressonância paralela com um banco de capacitores para a frequência (ou valor próximo a ela) correspondente a uma das harmônicas geradas por cargas não-lineares presentes na instalação ou para a frequência de uma harmônica eventualmente presente na tensão de alimentação, proveniente da rede externa. Em outras palavras, se o ponto de ressonância natural do sistema, ou seja, se a frequência de ressonância entre a indutância do transformador e a capacitância total do banco de capacitores coincide ou se aproxima bastante de uma das frequências harmônicas presentes, esta harmônica poderá ser consideravelmente amplificada. Nessa situação, a única oposição à circulação de tais correntes será a resistência ôhmica do circuito envolvido entre transformador e capacitores, geralmente de magnitude não significativa (da ordem de miliohms). O resultado será o surgimento de sobrecorrentes e/ou sobretensões excessivas.

A seguir será apresentado um exemplo hipotético simplificado na tentativa de se ilustrar como os capacitores, embora não sendo por si só geradores de harmônicas, podem contribuir para o agravamento de seus efeitos dependendo das condições do sistema onde encontram-se inseridos. O diagrama unifilar da Figura 13 indica a configuração do sistema a ser abordado.

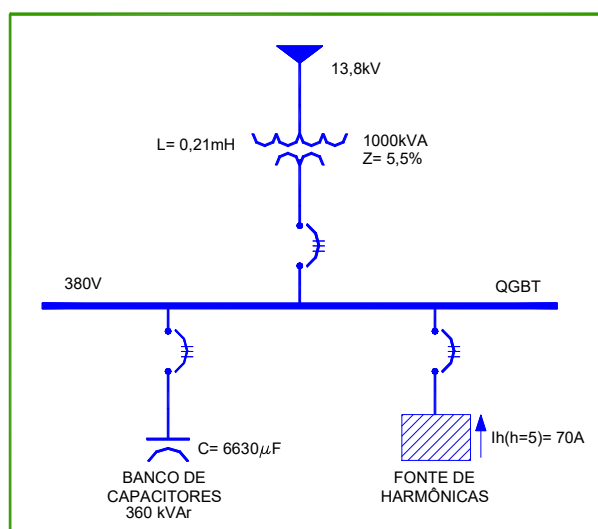


FIGURA 13 - DIAGRAMA UNIFILAR SIMPLIFICADO

**.Dados técnicos do sistema :**

Transformador : 1000 kVA  
Tensão nominal primária : 13,8 kV  
Tensão nominal secundária : 380 V  
Impedância percentual do transformador (Z%) : 5,5 %  
Perdas no cobre (transformador) = 10000W  
Potência base arbitrada (Sb) : 1000 kVA  
Tensão base arbitrada (Vb) : 0,38 kV  
Corrente base (Ib): 1519 A  
Reatância base (Xb) : 0,1444 Ohms

**.Determinação da reatância indutiva e da indutância do transformador em 60 Hz :**

R<sub>pu</sub> = Resistência do transformador em p.u. : 0,01pu - obtida com base nas perdas no cobre, da seguinte forma : R% = Perdas Watts<sub>Cu</sub> / (10 x Pot. Nominal do transformador)

Z<sub>pu</sub> = Impedância do transformador em p.u. : 0,055 pu

$$X_{pu} = \text{Reatância do transformador em p.u.} = \sqrt{Z_{pu}^2 - R_{pu}^2} = 0,54pu$$

$$X_L(\text{ohms}) = X_{pu} \times X_{base} = 0,054 \times 0,1444 = 0,008 \Omega$$

$$X_L = 2\pi fL \Rightarrow 0,008 = 2 \times 3,141592 \times 60 \times L \Rightarrow L = 0,000021 \text{ H} = 0,021 \text{ mH}$$

**.Determinação da reatância capacitiva e da capacitância do banco de capacitores ligado ao QGBT :**

Capacitores (hipotéticos) para correção do fator de potência da instalação (banco em triângulo ligado ao barramento do QGBT) = 360 kVAr / 380 V

Corrente nominal do banco : 547 A

Potência capacitiva monofásica = 360/3 = 120 kVAr ou 120000 Var

$$\text{Porém, a potência capacitiva monofásica} = I_{(fase)}^2 \times X_c \Rightarrow X_c = 120000 / (547 / \sqrt{3})^2 = 1,20 \Omega$$

$$X_c = 1 / (2\pi fC) \Rightarrow C \text{ (capacitância)} = 1 / (2 \times 3,141592 \times 60 \times 1,20) = 0,00221 \text{ F} = 2210 \mu\text{F} \text{ (monofásica)}$$

Capacitância total = 3 x 2210 μF = 6630 μF

**.Determinação da Frequência de Ressonância (paralela)**

$$f = 1 / (2\pi \sqrt{L.C}) = 1 / (2 \times 3,141592 \times \sqrt{0,021 \times 10^{-3} \times 6630 \times 10^{-6}}) = 426,5 \text{ Hz} \Rightarrow h = 7,1$$

**(frequência de ressonância situada próxima da frequência da 7º harmônica).**

Isto quer dizer que, caso haja harmônicas de 7ª ordem presentes nos trechos de circuito existentes entre banco de capacitores e o transformador, ocorrerá a ressonância entre ambos

com a amplificação considerável dessas harmônicas e a circulação de correntes muito elevadas entre eles. Essa situação conduz à possibilidade real de queima excessiva de fusíveis ou atuação de disjuntores de proteção dos capacitores, ou mesmo a queima de capacitores e a redução da vida útil (ou até mesmo a queima) do transformador.

Objetivando uma análise inicial, a estimativa da frequência de ressonância entre as indutâncias da instalação e um banco capacitivo também pode ser obtida pela seguinte expressão :

$$N_h = \sqrt{P_{cc} / P_{cap}}$$

onde :

$P_{cc}$  = potência de curto-circuito trifásico simétrico na barra de ligação dos capacitores, em kVA.  
 $P_{cap}$  = potência do banco de capacitores conectado à barra, em kVAr.

Caso a aplicássemos desconsiderando a impedância da rede da concessionária de energia, considerando a impedância do transformador e pressupondo a ligação dos capacitores em local próximo ao transformador, obteríamos  **$N_h = 7,1$** .

**Obs.** : Analisando a expressão anterior verifica-se que para os bancos capacitivos automáticos, largamente adotados atualmente, a frequência de ressonância se altera a cada inserção ou retirada de capacitores em função das variações de carga e das necessidades instantâneas de manutenção do fator de potência dentro de limites previamente programados nos controladores. Sendo assim, a ressonância no ponto de ligação de um dado banco capacitivo automático poderá ocorrer para várias frequências, o que agrava a situação e requer avaliações técnicas pormenorizadas e o desenvolvimento de projetos bastante criteriosos.

**.Cálculos da distorção com e sem capacitores para o sistema do exemplo (supondo uma carga não linear injetando 70 A de 5ª harmônica) :**

-Na ausência do banco capacitivo :  $V_h = X_L \times I_h = 5 \times 2 \times 3,141592 \times 60 \times 0,021 \times 10^{-3} \times 70 =$   
aprox. 2,8 V  $\Rightarrow$  (1,3% relativamente à tensão fase-neutro da rede)

-Com a introdução do banco de capacitores :  $V_h = 70 / Y_{eq} (h)$

$Y_{eq}$  (admitância equivalente) =  $2\pi f C - 1 / (2\pi f L) \Rightarrow$  condição para ressonância paralela

$Y_{eq} = ( 2 \times 3,141592 \times 5 \times 60 \times 6630 \times 10^{-6} ) - ( 1 / ( 2 \times 3,141592 \times 5 \times 60 \times 0,021 \times 10^{-3} ) )$

$Y_{eq} = 12,5 - 25,2 = - 12,7$

$V_h = 70 / 12,7 = 5,5 \text{ V}$  (2,5 % relativamente à tensão fase-neutro da rede)

**Conclusão** : Pode-se concluir que, nesse caso hipotético, a inserção de capacitores no sistema aumentou a distorção na tensão além de estabelecer, com o transformador, uma frequência de ressonância próxima da 7ª harmônica. Nesse caso, a eventual existência (e a não supressão)

de um conteúdo de 7ª harmônica no QGBT poderia conduzir a efeitos danosos conforme citado anteriormente.

• **Fator de Potência e  $\cos\varphi$**

O Fator de Potência em um sistema senoidal puro é expresso matematicamente pelo cosseno do ângulo formado entre os fasores que representam a potência ativa (W) e a potência aparente (VA), como pode ser observado pela Figura 14.

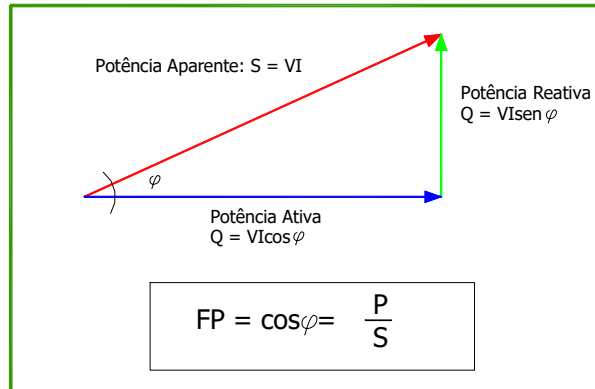


FIGURA 14 - TRIÂNGULO DE POTÊNCIA E FP PARA SENÓIDE PURA

Perante a presença de harmônicas, as grandezas elétricas passam a não mais ser expressas matematicamente por funções senoidais puras e lineares, o que incorre no surgimento de um desvio entre o Fator de Potência e o  $\cos\varphi$ . Nesse caso o Fator de Potência será expresso pela relação entre a potência ativa e a potência aparente relativas ao sinal distorcido (sinal periódico não senoidal). O  $\cos\varphi$  será expresso pela relação entre a potência ativa e a potência aparente relativas a cada uma das componentes harmônicas, que são ondas senoidais.

Quando há distorções geradas por harmônicas as reatâncias indutivas elevam-se proporcionalmente com a elevação da frequência e o triângulo de potências é alterado, introduzindo-se uma nova (terceira) dimensão decorrente dos VA's necessários para sustentar a distorção do sinal (Figura15).

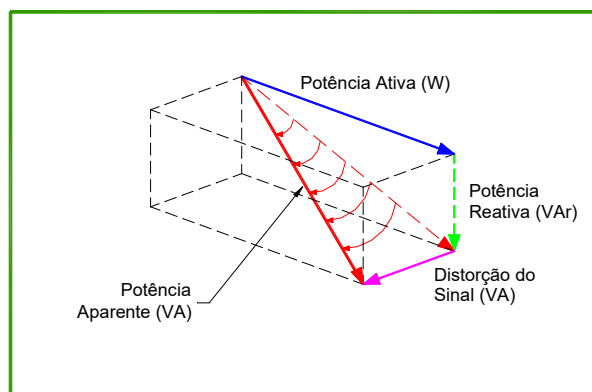


FIGURA 15 - VISUALIZAÇÃO ESPACIAL DAS POTÊNCIAS EM UM SISTEMA COM HARMÔNICAS

Pode-se concluir que o Fator de Potência equivale ao  $\text{Cos}\varphi$  somente para senóides puras (tensão e corrente). Na presença de ondas distorcidas o Fator de Potência pode ser expresso por duas grandezas distintas, a saber :

**-Fator de Potência Real :** Considera os ângulos de fase de cada harmônica e a potência reativa necessária para produzi-las; é o fator de potência que deve efetivamente ser corrigido. Para um sistema trifásico equilibrado esse índice pode ser expresso conforme indicado a seguir de forma genérica, considerando-se a presença de harmônicas de tensão e de corrente.

$$FP_{\text{real(sistema 3\phi equilibrado)}} = \text{Cos}\varphi = \frac{\sqrt{3}\cdot V_1\cdot I_1\cdot \text{cos}\varphi_1 + \sqrt{3}\cdot V_3\cdot I_3\cdot \text{cos}\varphi_3 + \sqrt{3}\cdot V_5\cdot I_5\cdot \text{cos}\varphi_5 \dots + \sqrt{3}\cdot V_n\cdot I_n\cdot \text{cos}\varphi_n}{\sqrt{3}\cdot V_{\text{total eficaz}}\cdot I_{\text{total eficaz}}}$$

**Obs. :** Na expressão acima pressupõe-se a ausência de harmônicas pares, situação mais comum na prática (tais harmônicas também serão consideradas, caso presentes). O índice 1 refere-se à frequência fundamental. Os índices 3,5,...,n referem-se a cada harmônica eventualmente presente. Os valores eficazes  $V_{\text{total}}$  e  $I_{\text{total}}$  referem-se às ondas resultantes distorcidas, decorrentes da composição das harmônicas presentes.

**-Fator de Potência de Deslocamento :** Considera apenas a defasagem entre tensão e corrente para a frequência fundamental. Havendo a presença de harmônicas, é sempre mais elevado que o fator de potência real. Não havendo harmônicas, o fator de potência de deslocamento equivale ao fator de potência real.

Para altos conteúdos harmônicos, ou seja, quanto mais significativa for a presença de harmônicas no sinal, mais difícil e complexa torna-se a tarefa de corrigir satisfatoriamente o fator de potência. A inserção de capacitores estáticos na rede pode tornar-se insuficiente uma vez que o baixo fator de potência passa não mais a ser atribuído apenas à presença de cargas indutivas, havendo a contribuição adicional da potência reativa necessária para sustentar a distorção do sinal.

É importante salientar que, em instalações sujeitas à presença de harmônicas (e caso tais harmônicas também fluam pela alimentação geral), as medições convencionais das concessionárias de energia que determinem o fator de potência levando em conta apenas a relação entre as potência ativa e aparente à frequência fundamental (seja o cálculo feito pelos parâmetros de consumo mensais ou horários) estarão registrando fatores de potência superiores aos reais, uma vez que o  $\text{Cos}\varphi$  (ou fator de potência real) não estará sendo medido.

Um exemplo simplificado de um circuito RL monofásico elementar (representando uma instalação elétrica genérica) ilustrando a variação do fator de potência na presença de harmônicas pode ser observado pelas Figuras 16 e 17 e pelos cálculos a elas associados.



- Sem a presença de harmônicas

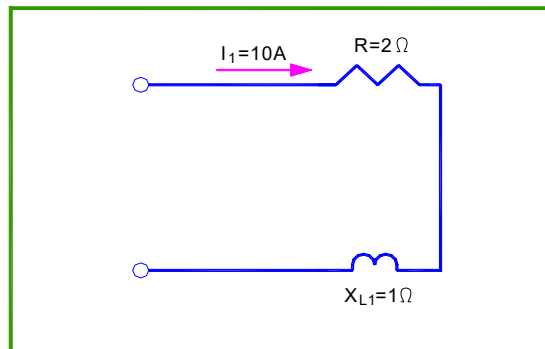


FIGURA 16

$$P_1 = R \cdot I_1^2 = 2 \cdot 10^2 = 200 \text{ W}$$

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

$$\cos\phi = \cos [ \arctg ( 100 / 200 ) ] \approx 0,89$$

- Com a presença da 3ª e 5ª harmônicas (DHT<sub>i</sub> arbitrada em 33,5%)

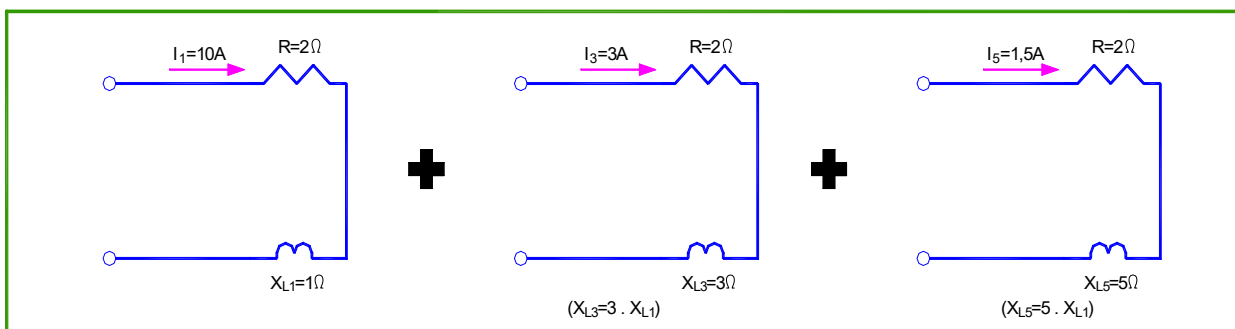


FIGURA 17

$$P_1 = 200 \text{ W}$$

$$Q_1 = 100 \text{ Var}$$

$$P_3 = R \cdot I_3^2 = 2 \cdot 3^2 = 18 \text{ W}$$

$$Q_3 = X_{L1} \cdot I_3^2 = 3 \cdot 3^2 = 27 \text{ Var}$$

$$P_5 = R \cdot I_5^2 = 2 \cdot 1,5^2 = 4,5 \text{ W}$$

$$Q_5 = X_{L1} \cdot I_5^2 = 5 \cdot 1,5^2 = 11,25 \text{ Var}$$

$$P_{\text{TOTAL}} = 200 + 18 + 4,5 = 222,5 \text{ W}$$

$$Q_{\text{TOTAL}} = 100 + 27 + 11,25 = 138,25 \text{ Var}$$

$$\cos\phi = \cos [ \arctg ( 138,25 / 222,5 ) ] \approx 0,85$$

### • **Sistemas de Iluminação**

As harmônicas podem afetar sensivelmente a vida útil das lâmpadas elétricas, gerando efeitos diferenciados em função do tipo de lâmpada em questão.

Lâmpadas incandescentes sofrem reduções sensíveis em sua vida útil média quando operam com tensões distorcidas e, fundamentalmente, quando o valor eficaz da tensão a elas aplicada encontra-se acima do valor nominal (o que pode decorrer da presença de harmônicas). Nessa situação, a elevação da temperatura do filamento incandescente será o fator determinante das queimas prematuras. Sabe-se que uma operação contínua com uma sobretensão da ordem de 5% incorre em uma redução de quase 50% na vida útil desse tipo de lâmpada. Bibliografias específicas indicam que a vida útil resultante para uma lâmpada incandescente pode ser expressa matematicamente em função da tensão aplicada à frequência fundamental (em p.u. relativamente à tensão nominal) e da distorção harmônica de tensão ( $DHT_v$ ).

No que se refere às lâmpadas de descarga, a suportabilidade às sobretensões é superior à das lâmpadas incandescentes. Grosso modo, embora já se verifique alguma influência assim que a tensão nominal é superada, os efeitos indesejáveis de redução da vida útil assumirão maior significado apenas a partir de cerca de 5% de sobretensão. Entretanto, como a operação desses tipos de lâmpada requer a aplicação de um reator (balastro) para a estabilização da corrente circulante (quer sejam de descarga à baixa pressão, como é o caso das lâmpadas fluorescentes, ou à alta pressão, como é o caso das lâmpadas a vapor de mercúrio, a vapor de sódio ou a multi-vapores metálicos), os efeitos indesejáveis das harmônicas de maior frequência podem se fazer sentir pela elevação da corrente devido à redução de reatâncias capacitivas em série que possam estar presentes nesses reatores (note-se que  $X_c = 1 / 2\pi fC$ , estando o parâmetro “frequência” no denominador).

### • **Dispositivos Fusíveis**

Ao circularem juntamente com a corrente à frequência fundamental, as correntes harmônicas, que também geram calor, provocam aquecimentos adicionais nos elementos destinados à proteção por fusão localizados no interior do corpo dos dispositivos fusíveis, alterando suas características operacionais e, conseqüentemente, suas curvas de atuação (que são plotadas com base em correntes à frequência fundamental).

### • **Relés de Proteção e Disjuntores**

Os relés de proteção podem vir a atuar de forma inadequada perante a presença de distorções harmônicas, apresentando variações nos tempos de operação previstos com a tendência de operar mais lentamente (ou com valores de corrente de “pick-up”, ou de partida, mais elevados), sofrendo a influência de conjugados reversos (no caso dos relés de indução eletromecânicos) e, em última análise, não se comportando segundo suas características de operação pré-determinadas. Por exemplo, a presença da 3ª harmônica (por corresponder a correntes e tensões de seqüência zero) pode causar a operação indevida das proteções de terra. As distorções das formas de onda também podem afetar a operação de relés (independentes ou inseridos em disjuntores eletrônicos) cuja operação dependa de valores de pico ou da passagem das ondas de tensão ou corrente por zero. Vários tipos de relés tais como os relés

estáticos de frequência e relés diferenciais também são susceptíveis de alterações em suas características operacionais perante a presença de harmônicas.

Entretanto, a bibliografia técnica especializada e catálogos mais detalhados de fabricantes desses tipo de equipamento citam que a operação de relés de proteção não chega a ser significativamente afetada para níveis de distorção harmônica inferiores a 15%, sendo recomendável manter tais distorções controladas em um máximo de 10%.

Disjuntores termomagnéticos, cujas curvas de atuação tempo-corrente são pré-definidas para a operação perante correntes à frequência fundamental, também podem ser afetados atuando “inesperadamente” uma vez que as correntes harmônicas também geram calor nos elementos térmicos destinados à atuação por sobrecargas e por sobrecorrentes de menor magnitude. Os elementos magnéticos desses disjuntores também poderão ser sensibilizados pela própria alteração do valor de pico da onda de corrente resultante (fundamental + harmônicas presentes). Na realidade, os disjuntores estarão protegendo adequadamente os circuitos contra as eventuais sobrecorrentes produzidas em decorrência das harmônicas. Entretanto, uma análise preliminar do problema por meio de medições realizadas através de instrumentos convencionais, tais como os amperímetros-licate, estará evidenciando a circulação de correntes inferiores aos valores de atuação prováveis dos disjuntores, caracterizando disparos “aparentemente” indevidos. Apenas aparelhos capazes de “enxergar” o valor eficaz verdadeiro (“True RMS”) indicarão o valor eficaz da onda resultante e não apenas o valor RMS da fundamental.

#### • **Medidores de Energia a Indução**

Medidores de energia do tipo a indução, tais como os ainda utilizados nos segmentos residencial, comercial e industrial de pequeno porte, podem apresentar erros dependendo do grau das distorções harmônicas presentes.

De modo geral, as distorções provocam a alteração da classe de precisão de tais medidores. A bibliografia técnica específica cita que erros mais significativos são gerados apenas nos casos de elevada distorção harmônica de tensão, da ordem de 20% ou superior. Entretanto, vários testes reais também citados na literatura técnica evidenciaram a ocorrência de uma ampla faixa de erros com variações entre, aproximadamente, -10% e +10% relativamente aos valores corretos quando medidores de energia a indução foram inseridos em circuitos de alimentação de cargas não-lineares (acionamentos de velocidade variável) com  $DHT_v$  da ordem de 5 a 6% e  $DHT_i$  de cerca de 28 a 32%.

#### • **Sistemas de Comunicação e Controle**

As harmônicas e inter-harmônicas presentes na rede elétrica podem gerar problemas em sistemas de comunicação sendo, um de seus efeitos mais frequentes, a interferência caracterizada por ruídos nos sistemas de telefonia e transmissão de dados, além da possibilidade de influências indesejáveis que podem ocasionar a operação errática de sistemas de controle e comando. Em geral, tais problemas surgem devido à elevação do valor eficaz da corrente total circulante nas redes elétricas em virtude da presença das harmônicas, fato que contribui para a elevação das intensidades de campos magnéticos gerados, aumentando as chances da ocorrência de acoplamentos indutivos perturbadores entre a rede elétrica e as

redes de comunicação e controle, notadamente quando não há qualquer artifício de blindagem entre elas. A presença de harmônicas de frequências coincidentes com as frequências de operação de sistemas dessa natureza pode incorrer na operação indevida de tais sistemas provocando, via acoplamento indutivo, situações inesperadas e, em princípio, “inexplicáveis” tais como o acionamento súbito de alarmes e o bloqueio / travamento de sistemas informatizados sem razão aparente.

A análise da influência efetiva dessas harmônicas sobre os sistemas de comunicação é um assunto relativamente complexo e específico, geralmente abordado em bibliografias técnicas relacionadas à Compatibilidade Eletromagnética (CEM). Avaliam-se fatores de ponderação que consideram, nos sistemas de transmissão de voz por exemplo, a resposta dos aparelhos telefônicos, o acoplamento entre circuitos, a sensibilidade do ouvido humano para várias frequências e outros parâmetros. A medida da intensidade dos acoplamentos entre linhas elétricas e de telefonia / dados é expressa, em função da frequência, pelo “fator de acoplamento” dado em dB (decibéis), indicando a relação dos campos magnéticos entre dois pontos (no caso de perturbações irradiadas – transmitidas entre circuitos sem interligação direta) ou a relação entre as tensões entre dois pontos (no caso das perturbações conduzidas – transmitidas por cabos de ligação ou circuito comum).

#### • ***Dispositivos Microprocessados, Computadores, Periféricos e Equipamentos de Comando Numérico***

Os fabricantes de equipamentos dessa natureza citam, em documentações técnicas, os limites de distorções harmônicas suportáveis para a não ocorrência de funcionamento inadequado. Entretanto, tais limites são bastante variáveis de fabricante para fabricante, situando-se, na maioria dos casos, entre 3 e 7%.

De maneira geral, as distorções acima de determinados limites podem gerar perdas de dados, danos em alguns componentes eletrônicos e problemas operacionais tais como o surgimento de torques pulsantes em micro-motores de acionamento de unidades de memória e armazenamento de dados.

A Tabela 2 apresenta percentuais orientativos extraídos da bibliografia técnica sobre o assunto que, de modo geral, podem ser adotados como referências em análises iniciais. Consideram-se tais percentuais como os níveis limite de distorções a partir dos quais espera-se o surgimento de efeitos danosos às instalações e equipamentos elétricos.

**TABELA 2** – Níveis Máximos de Distorções Harmônicas Suportadas por Componentes do Sistema Elétrico sem que Sejam Gerados Efeitos Indesejáveis Significativos

TIPO DE EQUIPAMENTO OU COMPONENTE DO SISTEMA	EFEITOS PRINCIPAIS	LIMITES RECOMENDADOS
Cabos	Maiores níveis de perdas ôhmicas e dielétricas	$\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} Vn^2} \leq 10\%$
Transformadores	Maior nível de perdas Degradação do material isolante Redução de vida útil	$\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} Vn^2} \leq \begin{matrix} 5\% (plenacarga) \\ 10\% (vazio) \end{matrix}$ cf.IEEE
Motores de indução	Sobreaquecimento devido às perdas por efeito Joule; Degradação do material isolante Torques oscilatórios e vibrações Redução da vida útil	$\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{Vn}{n}\right)^2} \leq 1,5a3,5\%$ De acordo com o tamanho e impedância inversa da máquina cf.IEC
Máquinas Sincronas	Maior nível de aquecimento particularmente nos enrolamentos amortecedores (rotor)	$\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{Vn}{n}\right)^2} \leq 1,3a2,4\%$ De acordo com o tamanho e impedância inversa da máquina cf.IEC
Capacitores	Maior nível de aquecimento Redução da vida útil Possibilidade de queimas / explosões	$\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (n.Vn)^2} \leq 83\%$
Relés	Atuação incorreta	$\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} Vn^2} \leq 10a20\%$

Computadores	Problemas operacionais ( torques pulsantes nos motores de acionamento das unidades de memória, perda de dados )	$\sum_{n=2}^{\infty} V_n \leq 7\%$ $\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (V_n)^2} \leq 5\%$
Pontes Retificadoras	Problemas ligados à forma de onda, à comutação e ao sincronismo	$\sum_{n=2}^{\infty} V_n \leq 7\%$ $\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (V_n)^2} \leq 5\%$
Medidores de Energia a Indução	Comprometimento da classe de precisão	$\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2} \leq 20\%$

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

As soluções geralmente adotadas para eliminar ou pelo menos minimizar os efeitos indesejáveis das distorções harmônicas consistem, geralmente, na instalação de reatores, filtros passivos e filtros / condicionadores ativos, na utilização de transformadores de separação, no reposicionamento e/ou alteração da potência de capacitores estáticos, na elevação da capacidade do sistema de alimentação, etc, assuntos a serem abordados em um possível artigo técnico no futuro. Apenas algumas possibilidades de se conviver de maneira “pacífica” com tais distorções foram aqui abordadas como, por exemplo, o dimensionamento adequado de condutores e, no caso de instalações administrativas / comerciais, a utilização da tensão de 220 Volts (fase-fase) para os equipamentos de informática.

De qualquer modo, nos itens anteriores objetivou-se principalmente apresentar conceitos básicos e aspectos gerais sobre o assunto sem, obviamente, a pretensão de tratá-lo de uma forma mais aprofundada. É importante salientar que o assunto “Harmônicas” é algo complexo, que deve ser convenientemente interpretado e cujo rastreamento, análise e definição de soluções devem ser confiados a profissionais experientes que sejam conhecedores de suas causas e implicações.

Além disso, e fundamentalmente, buscou-se alertar os profissionais da área elétrica, principalmente aqueles envolvidos em estudos e implantações de programas de eficiência energética que contemplem a introdução de equipamentos baseados na eletrônica de potência (inversores de frequência, reatores eletrônicos e outros), quanto à necessidade de se avaliar com maior critério os possíveis efeitos de tais procedimentos sobre a performance operacional de equipamentos e instalações já existentes.

## **Apoio bibliográfico :**

- .Informativo Técnico – Harmonics and Their Effects on the Electrical Environment – Michael Bjorkman
- .IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems – October 1991
- .Electrical Power Systems Harmonics – Design Guide – McGraw-Edson Power Systems
- .Artigo Técnico – Important Considerations for Capacitor Applications in the Pulp and Paper Industry – John E. Harder e Elton L. Parker - IEEE members
- .Artigo Técnico – Harmônicas e Fator K – Hilton Moreno – EM – Março 2000
- .Artigo Técnico – Perdas no Ferro em Alta Freqüência – Roberto Meza Cubilla – Unioeste - 2001
- .Artigo Técnico – Conservação de Energia e sua Relação com a Qualidade da Energia Elétrica – Paulo Henrique R. P. Gama (EFEI) e Adilson de Oliveira (UFRJ-IE) - 1999
- .Artigo Técnico – Degradação de Capacitores de Potência sob a Influência dos Componentes Harmônicos – Luiz Henrique S. Duarte (CEMIG) e Mário Fabiano Alves (PUC-Minas) - 2001
- .Livro – Harmônicas em Sistemas Industriais – Autor : Guilherme Alfredo Dentzien Dias – 1998
- .Livro – Proteção de Equipamentos Eletrônicos Sensíveis – Cap. 4 – Harmônicos - Autor : João Mamede Filho – 1997
- .Livro – Noções de Eletrotécnica – Autor : Miguel Magaldi
- .Livro – Circuitos elétricos – Autor : Joseph A. Edminister
- .Livro – Circuitos en Ingeniería Electrica – Autor : Skilling
- .Livro – A Compatibilidade Eletromagnética – Autores : Ara Kouyoumdjian, Roland Calvas e Jacques Delaballe – 1996 (Co-produção : Groupe Schneider)
- .Livro – Conservação de Energia – EFEI – 2001
- .Livro – Instalações Elétricas Industriais – Autor : João Mamede Filho
- .Livro – Elementos de Análise de Sistemas de Potência – Autor : William D. Stevenson Jr.
- .Livro – Máquinas Elétricas – Autor : A. E. Fitzgerald
- .Livro – Máquinas Elétricas e Transformadores – Volume 1 – Autor : Irving L. Kosow
- .Manual Técnico – Harmônicas nas Instalações Elétricas – Causas, Efeitos e Soluções / Procobre – Autor : Hilton Moreno - 2001
- .Apostila – Qualidade de Energia – Harmônicas / Procobre – Autores : Ademaro A. M. B. Cotrim e Hilton Moreno – 1998
- .Guia EM da NBR-5410 – Capítulo 10 – Harmônicas
- .Diversos links da WEB contendo trabalhos e estudos técnicos sobre Harmônicas e Qualidade da Energia Elétrica
- .Anotações e estudos desenvolvidos pelo autor