

Capítulo II

Harmônicos – conceitos

Por Gilson Paulilo e Mateus Duarte Teixeira*

Harmônicos

Os primeiros relatos relacionados a harmônicos em sistemas elétricos remontam à década de 1920, com a instalação de conversores em refinarias de cobre nos Estados Unidos, que provocaram a interrupção dos sistemas telefônicos. Este e outro similar, ocorrido em uma mineração no Canadá, são dois casos históricos registrados sobre este importante e atual fenômeno presente no sistema elétrico atual, principalmente em instalações industriais.

Conceitos gerais

Em se tratando de um sistema elétrico ideal, as tensões de suprimento devem ser, conforme o contrato de fornecimento, perfeitamente senoidais

e equilibradas. No entanto, verifica-se que, na prática, os sinais de tensão e corrente encontram-se distorcidos. Este desvio é usualmente expresso em termos das distorções harmônicas de tensão e corrente, e normalmente causadas pela operação de cargas com características não lineares, como ilustrado na Figura 1.

A magnitude da distorção de tensão depende, basicamente, da impedância equivalente vista pela carga não linear ou fonte de corrente harmônica e da corrente suprida por ela. Deve-se reconhecer que a carga não exerce controle sobre os níveis de distorção de tensão. Conseqüentemente, uma mesma carga poderá resultar em distorções de tensão diferentes, dependendo da sua localização no sistema elétrico.

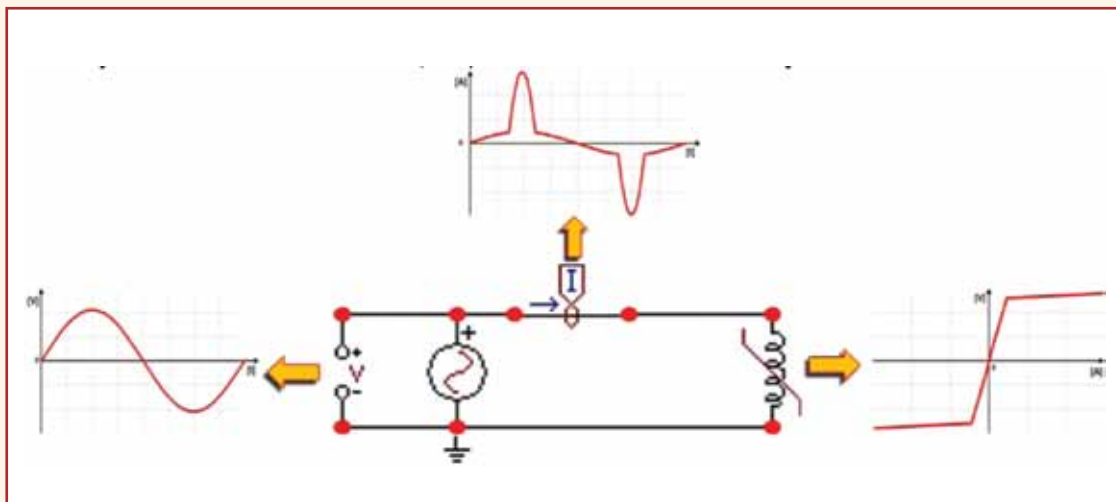


Figura 1 – Carga elétrica não linear e sua consequência na corrente do sistema.

Tecnicamente, um harmônico é um componente de uma onda periódica cuja frequência é um múltiplo inteiro da frequência fundamental (no caso da energia elétrica brasileira, de 60 Hz).

Harmônicos são fenômenos contínuos e não devem ser confundidos com fenômenos de curta duração, os quais duram apenas alguns ciclos. Distorção harmônica é um tipo específico de energia suja, que é normalmente associada à crescente quantidade de acionamentos estáticos, fontes chaveadas e outros dispositivos eletrônicos nas plantas industriais, isto é, associado com cargas não lineares. Estas perturbações no sistema podem normalmente ser eliminadas com a aplicação de filtros de linha (supressores de transitórios). Um filtro de harmônicos é essencialmente um capacitor para correção do fator de potência, combinado em série com um reator (indutor).

A distorção harmônica vem contra os objetivos da qualidade do suprimento promovido por uma concessionária de energia elétrica, a qual deve fornecer aos seus consumidores uma tensão puramente senoidal, com amplitude e frequência constantes. Entretanto, o fornecimento de energia a determinados consumidores que causam deformações no sistema supridor prejudica não apenas o consumidor responsável pelo distúrbio, mas também outros conectados à mesma rede elétrica.

A natureza e a magnitude das distorções harmônicas geradas por cargas não lineares dependem de cada carga em específico, mas duas generalizações podem ser assumidas:

- 1) Os harmônicos que causam problemas geralmente são os componentes de números ímpares;
- 2) A magnitude da corrente harmônica diminui com o aumento da frequência.

Como comentado, altos níveis de distorções harmônicas em uma instalação elétrica podem causar problemas para as redes de distribuição das concessionárias, para a própria instalação e para os equipamentos ali instalados. As consequências podem chegar até a parada total de importantes equipamentos na linha de produção, acarretando prejuízos econômicos. Dentre eles, de maior importância estão a perda de produtividade e de vendas devido a paradas de produção, causadas por inesperadas falhas em motores, acionamentos, fontes ou simplesmente pelo "repicar" de disjuntores.

As componentes harmônicas geradas por estas cargas não lineares propagam-se pela rede elétrica, resultando em sérios danos aos equipamentos elétricos e/ou eletrônicos. Dentre os principais efeitos causados, em termos gerais, podem ser citados:

- Má operação de equipamentos eletrônicos, de controle, de proteção, de medição e outros;
- Sobretensões gerando comprometimento da isolação e da vida útil do equipamento;
- Sobrecorrentes ocasionando efeitos térmicos nocivos aos

equipamentos;

- Interferências em sistemas de comunicação (principalmente sinais de rádio);
- Efeitos sobre a resistência dos condutores elétricos.

Série de Fourier

Para a quantificação do grau de distorção presente na tensão e/ou corrente, lança-se mão da ferramenta matemática conhecida por série de Fourier. As vantagens de se usar a série de Fourier para representar formas de onda distorcidas é que cada componente harmônica pode ser analisada separadamente e a distorção final é determinada pela superposição das várias componentes constituintes do sinal distorcido. A série de Fourier é calculada pela seguinte expressão:

$$f(\omega t) = \underbrace{A_0}_{\text{valor médio ou CC}} + \underbrace{A_1 \times \text{sen}(\omega t) + A_2 \times \text{sen}(2\omega t) + A_3 \times \text{sen}(3\omega t) + \dots + A_n \times \text{sen}(n\omega t)}_{\text{termos em seno}} + \underbrace{B_1 \times \text{cos}(\omega t) + B_2 \times \text{cos}(2\omega t) + B_3 \times \text{cos}(3\omega t) + \dots + B_n \times \text{cos}(n\omega t)}_{\text{termos em co-seno}} \quad (1)$$

ou

$$f(\omega t) = \underbrace{A_0}_{\text{valor médio ou CC}} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\underbrace{A_n \times \text{cos}(n \times \omega t)}_{\text{termos em seno}} + \underbrace{B_n \times \text{cos}(n \times \omega t)}_{\text{termos em co-seno}} \right] \quad (2)$$

Assim, os sinais distorcidos podem ser decompostos por meio da série de Fourier em sinais distintos que possuem frequência múltipla da frequência fundamental, conforme mostrado na Figura 2. Esta apresenta a decomposição de um sinal distorcido nas várias componentes harmônicas que compõem esse sinal. Nessa ilustração, a frequência fundamental é 60 Hz e n significa a ordem harmônica.

Outra forma de visualizar o conteúdo harmônico do sinal distorcido é por meio do seu espectro harmônico, conforme mostra a Figura 3, em que se pode identificar a componente fundamental e as componentes harmônicas de ordem 3, 5 e 7 do sinal de tensão.

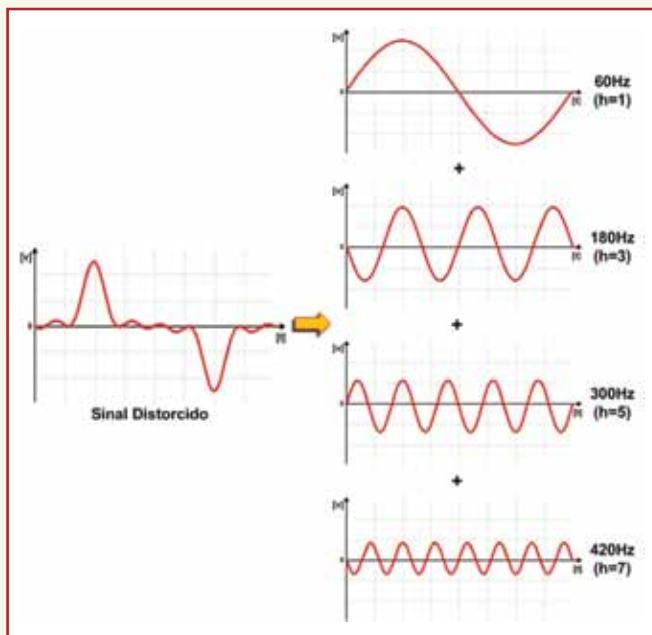


Figura 2 – Composição harmônica de um sinal distorcido.

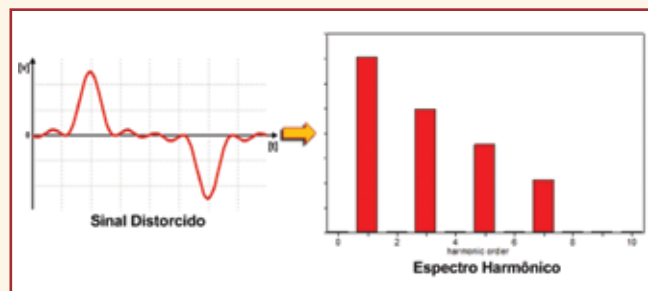


Figura 3 – Sinal distorcido e seu espectro harmônico.

Distorções harmônicas

A distorção harmônica de tensão é o resultado da corrente harmônica circulando através da impedância série (linear) do sistema elétrico. Para cada frequência harmônica, há uma queda de tensão de mesma frequência, resultando, desta forma, na distorção da tensão na barra, conforme a Figura 4.

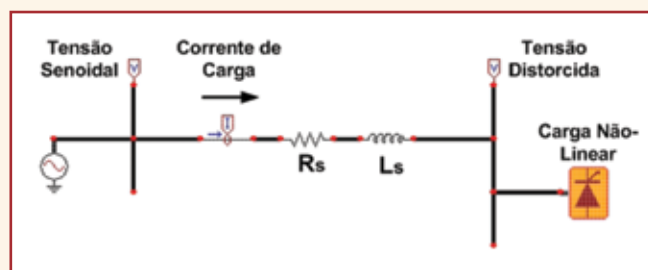


Figura 4 – Sistema elétrico submetido a uma distorção harmônica.

A magnitude da distorção de tensão depende, basicamente, da impedância equivalente vista pela carga não linear ou fonte de corrente harmônica e da corrente suprida por ela. Deve-se reconhecer que a carga não exerce controle sobre os níveis de distorção de tensão. Consequentemente, uma mesma carga poderá resultar em distorções de tensão diferentes, dependendo da sua localização no sistema elétrico.

Um dispositivo não linear é equipamento que não produz uma corrente senoidal quando lhe é aplicada uma tensão senoidal. Esses equipamentos são classificados em três importantes categorias, a saber:

- Dispositivos a arco: fornos a arco, máquinas de solda, etc.;
- Dispositivos saturados: transformadores, reatores, etc.;
- Equipamentos de eletrônica de potência: conversores, retificadores, etc.

Distorção harmônica total e individual

Matematicamente, um sinal distorcido pode ser adequadamente representado em termos de sua frequência fundamental e suas harmônicas. A frequência fundamental é usualmente assumida como sendo igual à frequência de suprimento do sistema e seus múltiplos inteiros são chamados de harmônicas. Comumente, as componentes harmônicas são medidas na forma de “distorções” e quantificadas como Distorção Harmônica Total (DHT) ou Total Harmonic Distortion (THD), que pode ser usada para as formas de onda de tensão e de corrente, com a seguinte expressão:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} M_h^2}}{M_1} \quad (3)$$

Em que:

M_h e M_1 são, respectivamente, os valores eficazes da componente harmônica e da componente fundamental nominal da grandeza.

Reescrevendo a expressão anterior, em percentual e português temos que a distorção harmônica total de tensão e de corrente serão:

$$DHT_v\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} V_h^2}}{V_1} \times 100! \quad (4)$$

$$DHT_i\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} I_h^2}}{I_1} \times 100! \quad (5)$$

Em que:

$DHT_v\%$ - Distorção harmônica total de tensão em percentagem;

$DHT_i\%$ - Distorção harmônica total de corrente em percentagem;

h - Número de ordem harmônica;

V_h - Tensão harmônica de ordem 'h', [V];

V_1 - Tensão fundamental, [V];

I_h - Corrente harmônica de ordem 'h', [V];

I_1 - Corrente fundamental, [V].

Para expressar a distorção individual provocada pelas componentes harmônicas, ou índices de Distorção Harmônica Individual, definidos pela relação do valor da componente harmônica pelo valor da componente fundamental, utilizam-se as seguintes expressões para a tensão e corrente:

$$DHI_v\% = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \quad (6)$$

$$DHI_i\% = \frac{I_h}{I_1} \times 100 \quad (7)$$

Em que:

$DHI_v\%$ - Distorção harmônica individual de tensão em percentagem;

$DHI_i\%$ - Distorção harmônica individual de corrente em percentagem;

O valor eficaz da onda total não é a soma das componentes individuais, mas sim a raiz quadrada da soma dos quadrados, conforme mostrado a seguir.

$$rms = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{max}} M_h^2} = M_1 \times \sqrt{1 + THD^2} \quad (8)$$

Como exemplo, considere um sinal distorcido com as características apresentadas na Tabela 1. Esta forma de onda desse sinal é mostrada na Figura 5 e seu respectivo conteúdo harmônico é mostrado na Figura 6. Para esse sinal tem-se a seguinte situação:

TABELA 1 – CARACTERÍSTICAS HARMÔNICAS DO SINAL ANALISADO

Tensão Harmônica	Valor rms	Tensão Harmônica	Valor rms
V_1	100	V_7	20
V_3	10	V_{11}	10
V_5	30	V_{13}	5

$$DHT_v\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} V_h^2}}{V_1} \times 100 = \frac{\sqrt{(10^2 + 30^2 + 20^2 + 10^2 + 5^2)}}{100} \times 100 = 39,05\% \quad (9)$$

$$rms = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{max}} M_h^2} = \sqrt{(100^2 + 10^2 + 30^2 + 20^2 + 10^2 + 5^2)} = 100 \times \sqrt{1 + 0,3905^2} = 107,35V \quad (10)$$

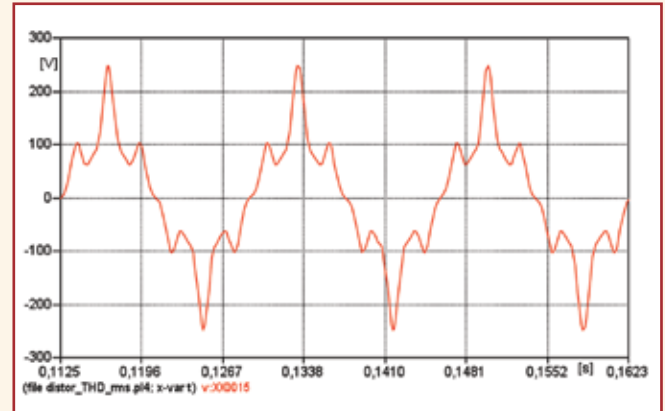


Figura 5 – Forma de onda do sinal analisado.

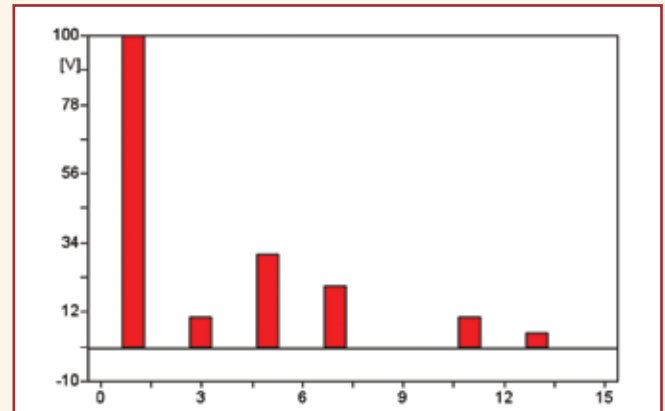


Figura 6 – Espectro harmônico do sinal analisado.

De uma forma geral, as concessionárias de energia elétrica fornecem uma tensão cuja forma de onda é muito próxima da senoidal. A conexão de uma carga não linear à rede elétrica, por exemplo, um forno de indução, ocasionará a circulação de uma corrente, que se apresentará sob uma forma de onda não senoidal e, por conseguinte, correntes harmônicas serão produzidas.

Dentre as cargas comumente encontradas e que produzem tais correntes, destacam-se os fornos de indução, acionamentos de velocidade variável, controladores estáticos, retificadores em geral, tipos de iluminação fluorescente e diversas cargas domésticas.

Para fins práticos, geralmente, os componentes harmônicos de ordens elevadas (acima da 50ª ordem, dependendo do sistema) são desprezíveis para análises de sistemas de potência. Apesar de poderem causar interferência em dispositivos eletrônicos de baixa potência, elas usualmente não representam perigo aos

sistemas de potência.

Quanto aos limites estabelecidos para tensões harmônicas, existem algumas normas internacionais (IEEE 519, IEC, NRS 048, NTCSE) que estabelecem limites tanto para tensão quanto para a emissão de correntes harmônicas. No Brasil, o ONS, por meio do submódulo 2.2 (padrões de desempenho da rede básica), oferece níveis tanto para as ordens ímpares como também para as componentes pares. Como podem ser visualizados na Tabela 2, estes são considerados para dois níveis distintos da tensão de operação. Todavia, vale mencionar que este documento nacional não tem caráter normativo, com estabelecimento de punições aos infratores, sendo apenas uma recomendação aos diversos agentes conectados à rede básica.

Efeitos das distorções harmônicas

As distorções harmônicas causam alguns efeitos indesejáveis ao sistema elétrico. Pode-se destacar:

- Variação da resistência com a frequência, acréscimo das perdas, aumento da temperatura e diminuição da vida útil em cabos elétricos.

Transformadores

- Aumento de perdas joulicas nos enrolamentos;
- Perdas devido a correntes parasitas nos enrolamentos. Essas perdas aumentam com o quadrado da frequência da corrente;
- Perdas no núcleo;
- Possíveis ressonâncias entre os enrolamentos do transformador e as

TABELA 2 – LIMITES GLOBAIS DA TENSÃO FUNDAMENTAL EXPRESSOS EM PORCENTAGEM

<i>V < 69 kV</i>				<i>V ≥ 69 kV</i>			
<i>Ímpares</i>		<i>Pares</i>		<i>Ímpares</i>		<i>Pares</i>	
<i>Ordem</i>	<i>Valor(%)</i>	<i>Ordem</i>	<i>Valor(%)</i>	<i>Ordem</i>	<i>Valor(%)</i>	<i>Ordem</i>	<i>Valor(%)</i>
3, 5, 7	5			3, 5, 7	2		
		2, 4, 6	2			2, 4, 6	1
9, 11,	3			9, 11,	1,5		
13		≥8	1	13		≥8	0,5
					1		
15 a 25				15 a 25			
≥ 27				≥ 27			

capacitâncias das linhas ou bancos de capacitores;

- Existência de componente contínua de corrente levará o transformador a se sobreaquecer e, também, a saturar o seu núcleo rapidamente;
- Em geral, um transformador que esteja submetido a uma distorção de corrente superior a 5% deverá ser operado abaixo da sua potência nominal, operação conhecida como derating.

Motores de indução

- Sobreaquecimento de seus enrolamentos e diminuição de vida útil.

Máquinas síncronas

- Sobreaquecimento das sapatas polares, causado pela circulação de correntes harmônicas nos enrolamentos amortecedores, torques pulsantes no eixo da máquina e indução de tensões harmônicas no circuito de campo, que comprometem a qualidade das tensões geradas.

Bancos de capacitores

- Fadiga ("stress") do isolamento, sobreaquecimento e redução da vida útil.

Mitigação de harmônicos

Diante de tantos problemas causados por harmônicos, torna-se necessário tomar medidas preventivas ou corretivas, no sentido de reduzir ou eliminar os níveis harmônicos presentes nos barramentos e linhas de um sistema elétrico.

Dentre as diversas técnicas utilizadas destacam-se:

- Filtros passivos: são constituídos basicamente de componentes R, L e C por meio dos quais se obtêm os filtros sintonizados e amortecidos. Estes filtros são instalados geralmente em paralelo com o sistema supridor, proporcionando um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas. Podem ser utilizados para a melhoria do fator de potência, fornecendo o reativo necessário ao sistema. Entretanto, existem alguns problemas relacionados à utilização destes filtros, dentre os quais se destacam o alto custo, a complexidade de sintonia e a possibilidade de ressonância paralela com a impedância do sistema elétrico.
- Filtros ativos: um circuito ativo gera e injeta correntes harmônicas com defasagem oposta àquelas produzidas pela carga não linear. Assim, há um cancelamento das ordens harmônicas que se deseja eliminar. Embora bastante eficiente, este dispositivo apresenta custos elevados (superiores aos filtros passivos), o que tem limitado sua utilização nos sistemas elétricos.
- Compensadores eletromagnéticos.
- Moduladores CC.

Técnicas tais como eliminação por injeção de um componente de corrente alternada ou pulsante, produzidas por um retificador e aumento do número de pulsos dos conversores estáticos também podem ser utilizados. Dentre estas, a última tem sido mais usada e se enquadra dentro do contexto de equipamentos designados por compensadores eletromagnéticos de harmônicos.

Estudo de caso

Um sistema elétrico industrial apresenta as seguintes características: uma linha de distribuição de 13,8 kV com 18 km de extensão desde a subestação até o PAC com o consumidor. As cargas do consumidor são distribuídas em nove cabines com transformadores abaixadores para as tensões de 380/220 V e 220/127 V, assim denominadas: Cabine 01 – Acabamento; Cabine 02 – Onduladeiras; Cabine 03 – Máquina de papel I; Cabine 04 – Desagregação; Cabine 05 – Caldeira; Cabine 06 – Máquina de Papel II; Cabine 07 – Picador; Cabine 08 – TAR; Cabine 09 – Administração/Portaria.

Uma grande parte das cargas existentes na instalação tem características não lineares e gera componentes harmônicos que estão causando problemas de queima dos bancos de capacitores instalados para a correção do fator de potência da instalação, bem como gerando níveis de distorção harmônica elevada na barra de 13,8 kV. Problemas na operação das cargas também foram relatados pelos técnicos da empresa em estudo.

A concessionária realizou medições no PAC junto ao seu alimentador (13,8 kV - Scc 21 MVA), com os seguintes resultados em termos de distorção harmônica total de tensão e distorção harmônica total de corrente, conforme as Figuras 7 e 8 a seguir.

As medições mostradas anteriormente demonstram níveis elevados de distorção harmônica total de tensão (Figura 7), acima dos limites recomendados pela IEEE-519/1992 e pela Aneel/ONS, apesar de injeção harmônica de corrente no 13,8 kV não apresentar valores elevados. Tal fato justificou a realização de estudos e medições de harmônicos visando à redução de tais níveis de distorção.

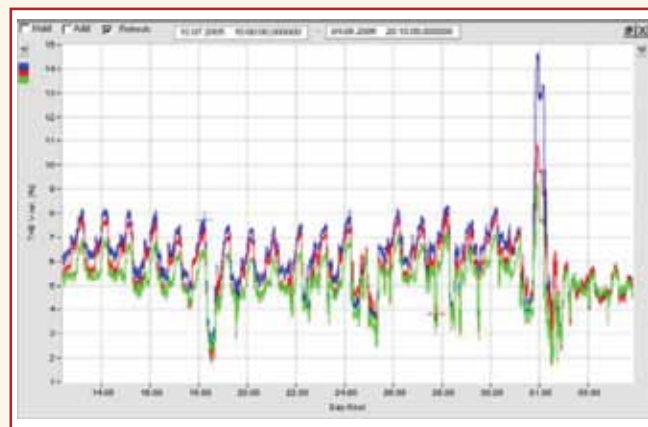


Figura 7 – Distorção harmônica total de tensão – 13,8 kV.

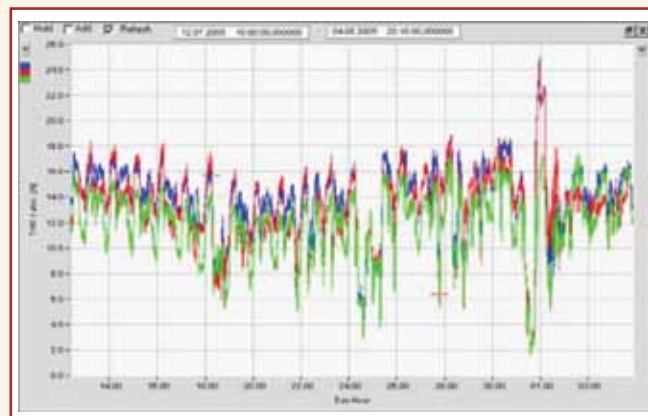


Figura 8 – Distorção harmônica total de corrente – 13,8 kV.

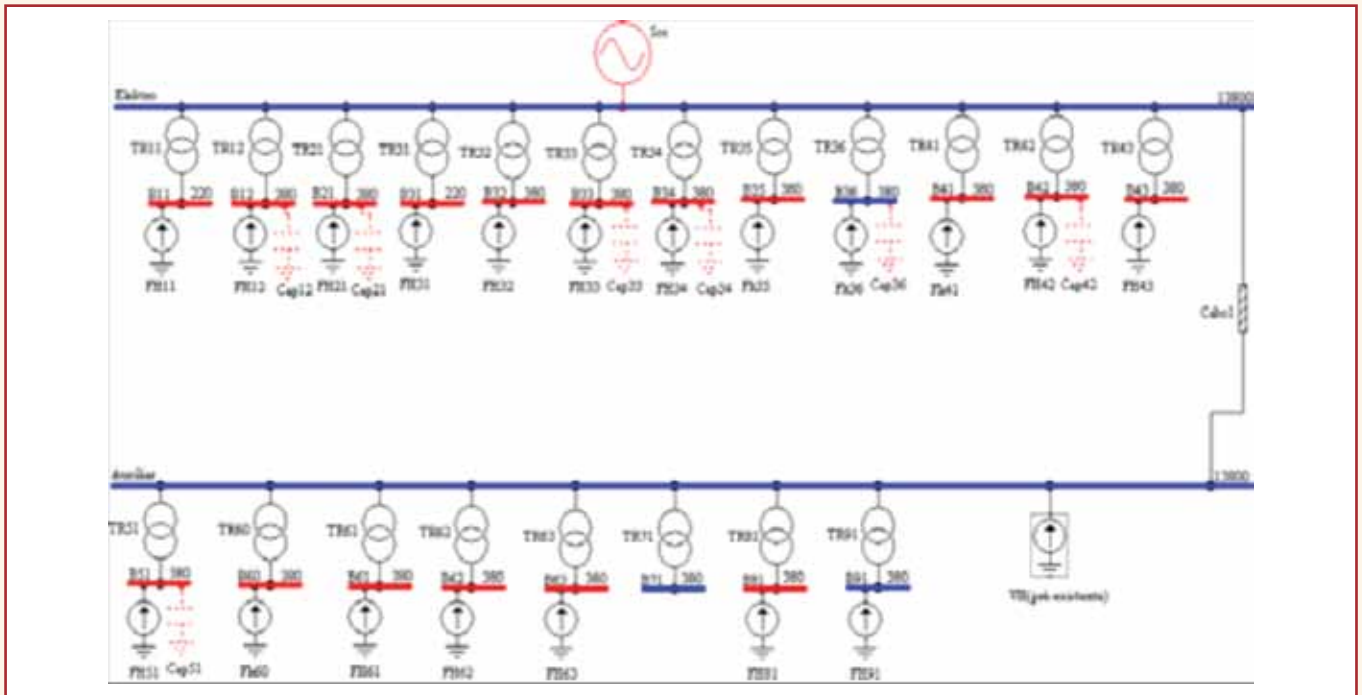


Figura 9 – Diagrama unifilar para os estudos de fluxo de carga e de distorção harmônica.



Figura 10 – Espectro harmônico dos estudos de fluxo de carga e distorção harmônica.

O estudo foi realizado com base na configuração do sistema elétrico da indústria mostrada na Figura 9, cujo espectro harmônico é mostrado na Figura 10.

Referências

DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; SANTOSO, S.; BEATY, H. W. *Electrical Power Systems Quality*. McGraw-Hill, Second Edition.
 BOLLEN, M. H. J. *Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions*, Wiley-IEEE Press, October 1999.
 ARRILAGA, J.; WATSON, N. R. *Power System Harmonics*. Wiley-IEEE Press, November 2004, Second Edition.
 OLIVEIRA, J. C.; DELAIBA, A. C.; CHAVES, M. L.; SAMESIMA, M. I.; RESENDE, J. W.; RODRIGUES, K. D. *Qualidade da Energia Elétrica – Apostilas*. NQREE – Núcleo de Qualidade e Racionalização da Energia, UFU – Universidade Federal de Uberlândia, 2007.

OLESKOVICZ, M. *Qualidade da Energia Elétrica LSEE – Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica*, USP – Universidade de São Paulo, 2007.

CANESIN, C. A. *Qualidade da Energia Elétrica nos Sistemas Elétricos*. Unesp – Ilha Solteira.

MARTINS, J.; COUTO, C.; AFONSO, J. L. *Qualidade da Energia Elétrica*. CLME 2003. 3º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia, Maputo, Moçambique, 2003.

ROBERT, A.; JAEGER, E.; HOFFELMAN, J. *Power Quality & EMC*, CIRED – 18th International Conference on Electricity Distribution, Turin, 2005.

VELASCO, J. M. *Computer Analysis of Voltage Variations in Power Systems: Application on Over voltages and Voltage Sags*. Universitat Politècnica DAE Catalunya, Barcelona, Espanha.

ORTMANN, P. *Understanding Power Quality*. University of Idaho.

* GILSON PAULILO é engenheiro eletricitista, com mestrado e doutorado em Qualidade de Energia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá. Atualmente, é consultor tecnológico em energia no Instituto de Pesquisas Eldorado, em Campinas (SP). Atuação voltada para áreas de qualidade de energia elétrica, geração distribuída, eficiência energética e distribuição.
 MATEUS DUARTE TEIXEIRA é engenheiro industrial e eletricitista, mestre em engenharia elétrica e doutorando na Universidade Federal do Paraná (UFPR). Atualmente, é pesquisador do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (Lactec), professor efetivo do curso de engenharia elétrica da UFPR e secretário executivo da Sociedade Brasileira de Qualidade da Energia Elétrica (SBQEE).

Continua na próxima edição

Confira todos os artigos deste fascículo em www.osetoreletrico.com.br
 Dúvidas, sugestões e comentários podem ser encaminhados para o e-mail redacao@atituedeeditorial.com.br