

Capítulo V

Ensaios e a solução para qualidade de energia elétrica na indústria

Distúrbios de qualidade de energia e seus impactos em equipamentos e processos industriais vêm sendo estudados nas últimas décadas, fato que se comprova através de inúmeras publicações acerca do assunto. Todavia, muito embora se conheçam os problemas de qualidade de energia e alguns dos seus efeitos para os processos industriais, cada situação deve ser encarada como fato desconhecido, uma vez que características intrínsecas a cada instalação industrial, bem como equipamentos e processos, perceberão de maneira distinta um determinado fenômeno de qualidade de energia. Tais aspectos levarão a diferentes formas de estudo, análise e solução.

Fato relevante é que alguns equipamentos industriais, como controladores de velocidade de motores, baseados em eletrônica de potência, podem se apresentar como “vítima” e “vilão” em uma instalação industrial. “Vítima”, pois esses equipamentos são sensíveis a distúrbios de variação momentânea de curta duração (VTCD), como os afundamentos de tensão, causando seu desligamento ou má operação. “Vilão”, pois, causam distorções na forma de onda da corrente elétrica que, por sua vez, pode distorcer a tensão de alimentação.

Outra constatação importante verificada por pesquisadores e engenheiros que estudam os problemas de qualidade de energia em indústrias é o fato de que, fora problemas de VTCDs, que causam prejuízos

diretos com paradas de produção e lucro cessante, fenômenos como desequilíbrio, flutuação de tensão e distorções harmônicas não são investigados até que causem queimadas severas de equipamentos.

Dessa maneira, é muito importante conhecer os fenômenos causas e efeitos dos diversos problemas de qualidade de energia elétrica para poder buscar soluções específicas que melhor se adequam a cada tipo de instalação elétrica.

DISTÚRBIOS DE QUALIDADE DA ENERGIA

O termo Qualidade da Energia Elétrica (QEE) refere-se a uma ampla variedade de fenômenos eletromagnéticos conduzidos que caracterizam a tensão e a corrente em um dado tempo e local do sistema elétrico. Os itens a seguir apresentam de forma sucinta os distúrbios, suas causas e efeitos

para sistemas elétricos industriais.

Transitórios

O termo transitório é aplicado à análise das variações do sistema de energia para denotar um evento que é indesejável, mas momentâneo, em sua natureza. Ou ainda, entende-se por transitórios eletromagnéticos as manifestações ou respostas elétricas locais ou nas adjacências, oriundas de alterações súbitas nas condições operacionais de um sistema de energia elétrica.

Geralmente, a duração de um transitório é muito pequena, com conteúdo de alta frequência, e grande importância, uma vez que os equipamentos presentes nos sistemas elétricos estarão submetidos a grandes solicitações de tensão e/ou corrente.

De forma geral, transitórios podem ser classificados em duas categorias: impulsivos e oscilatórios.

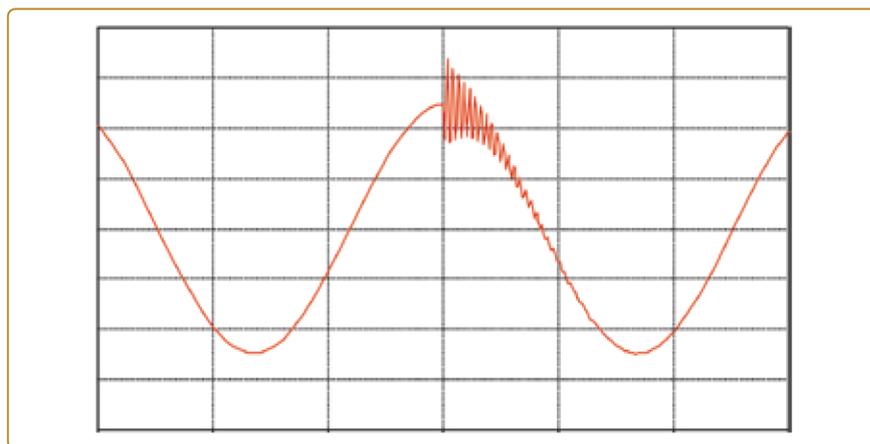


Figura 1 – Transitório oscilatório devido à energização de capacitores.

Um transitório impulsivo normalmente é causado por descargas atmosféricas contendo altas frequências. Geralmente, não são conduzidos para muito longe do ponto onde foram gerados. Todavia, podem provocar queimas de diversos equipamentos simultaneamente, elevar a tensão da malha de aterramento e gerar ressonâncias no sistema elétrico.

O transitório oscilatório é decorrente da energização de linhas e circuitos elétricos, corte de corrente indutiva, eliminação de faltas, chaveamento de bancos de capacitores e transformadores, etc. Por possuir frequências menores que os impulsivos, se perpetua com maior facilidade pelo sistema, causando os mesmos efeitos já citados para os transitórios impulsivos.

Variação de Tensão de Curta Duração (VTCDs)

Entende-se por variação de tensão de curta duração (VTCD) todo o desvio significativo na amplitude da tensão por um curto intervalo de tempo, geralmente

entre 0,5 a 180 ciclos. Em particular, os afundamentos de tensão destacam-se como as mais significativas formas com que tais alterações se manifestam nas redes elétricas industriais.

Variações de tensão de curta duração, mais especificamente, afundamentos de tensão são geralmente causados por faltas no sistema elétrico e por energização de cargas que absorvem grandes correntes iniciais, como motores elétricos. Dependendo da localização da falta e das características de aterramento do sistema, a falta poderá

causar afundamento de tensão, elevação de tensão, ou mesmo interrupção.

A preocupação para a indústria no estudo desse fenômeno reside principalmente nos problemas que podem causar em vários tipos de equipamentos, tais como: controladores de velocidade de motores, CLPs, computadores, etc., cargas bastante sensíveis a variações dos níveis de tensão, uma vez que componentes falham quando a tensão decresce para um valor abaixo de 85% por um ou dois ciclos, com eventual comprometimento do processo produtivo.

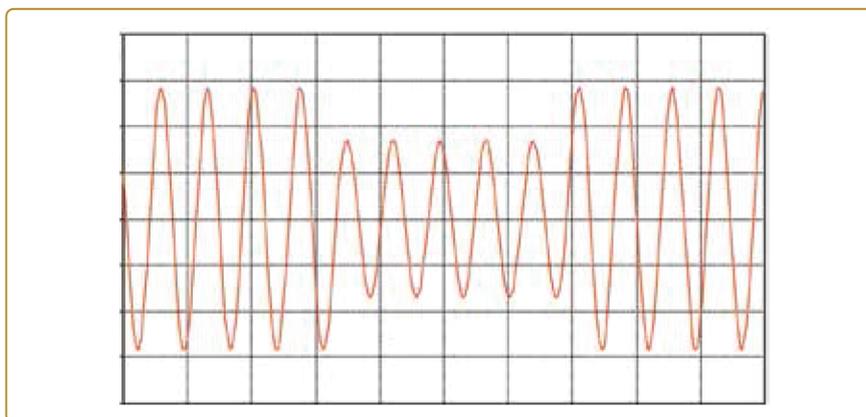


Figura 2 – Afundamento de tensão.

Desequilíbrio de tensão

Desequilíbrio de tensão é o desvio em sistemas trifásicos, dos módulos ou dos ângulos das tensões em relação à condição equilibrada, definida pela igualdade dos módulos e defasagem de 120° entre si.

A principal fonte de desequilíbrios de tensão em sistemas elétricos industriais é a combinação de cargas monofásicas e trifásicas desequilibradas, sendo as cargas monofásicas desigualmente distribuídas ao longo das três fases do sistema. Contudo, ainda são relatados transformadores conectados em delta aberto, abertura de fusíveis em bancos de capacitores, dentre outras causas.

Tensões desequilibradas provocam consequências danosas no funcionamento de alguns equipamentos elétricos, comprometendo, na maioria dos casos, o seu desempenho e a sua vida útil. Entretanto, por mais paradoxal que possa parecer, as cargas elétricas se constituem na principal fonte de desequilíbrio, como visto anteriormente.

Tensões desequilibradas em motores de indução trifásicos, seja em módulo ou em ângulo, causam alterações nas características térmicas, elétricas e mecânicas, afetando o seu desempenho e comprometendo a sua vida útil, além de alterações no torque, na velocidade nominal e na corrente de rotor bloqueado. Pode causar também ruídos e vibrações na máquina.

Em cargas não lineares, como nos sistemas multiconversores CA-CC, o desequilíbrio de tensão causa um agravamento das harmônicas geradas por esses tipos de cargas, além de gerar harmônicas de ordens diferentes daquelas verificadas sob condições equilibradas.

Distorções da forma de onda

Distorção de forma de onda é o desvio, em regime permanente, da forma de onda da corrente ou tensão em relação ao sinal senoidal puro. São basicamente cinco os principais tipos de distorção de forma de onda: DC offset, corte de tensão ("Notching"), ruídos, harmônicos e inter-

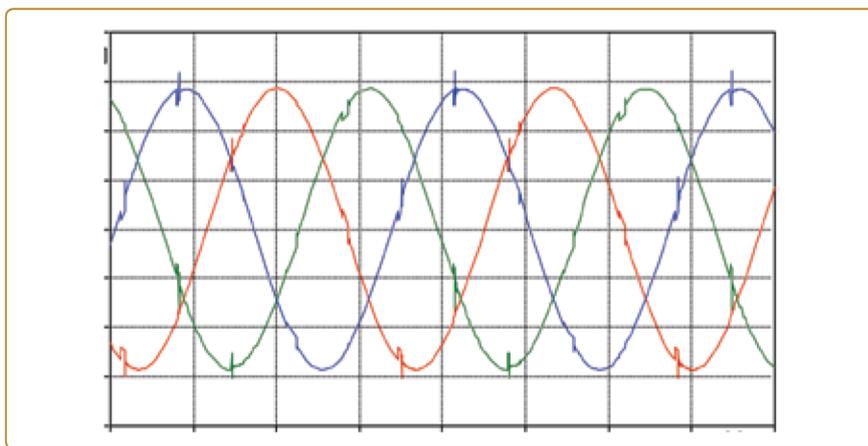


Figura 3 – Sinal contendo cortes de tensão devido ao processo de retificação.

harmônicos. Desses, os mais críticos para sistemas industriais são o corte de tensão e as distorções harmônicas.

O corte de tensão, também conhecido como "notching", é um distúrbio periódico na tensão, causado pela operação normal dos equipamentos que se utilizam da eletrônica de potência, quando a corrente comuta de uma fase para a outra. A operação de conversores estáticos é a causa mais comum para o surgimento do corte de tensão. Dentre seus principais efeitos, estão a interferência eletromagnética em circuitos lógicos, a má operação de circuitos eletrônicos de automação e o controle e queimas de placas eletrônicas.

Dentre os distúrbios de qualidade da energia, a subárea de distorções harmônicas encontra-se em uma posição de destaque. Trata-se de desvios na forma de onda da tensão ou corrente em regime permanente. Esse desvio é usualmente expresso em termos das distorções harmônicas e normalmente causadas pela

operação de cargas com características não lineares. A priori, essas correntes se propagam pelo sistema elétrico provocando distorções de tensão em diversos pontos e ocasionando aquecimentos anormais em transformadores, banco de capacitores, condutores neutros, motores de indução, interferências em equipamentos eletrônicos de controle, comunicação, microcomputadores, etc.

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.

Flutuação de tensão

As flutuações de tensão são variações sistemáticas ou aleatórias no valor eficaz da tensão, as quais normalmente não excedem o limite especificado de 0,95 a 1,05 pu.

Cargas industriais que exibem

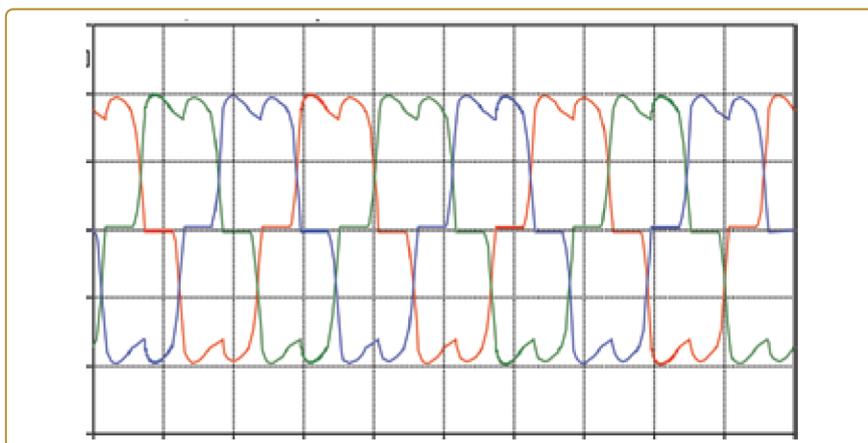


Figura 4 – Forma de onda contendo distorção harmônica.

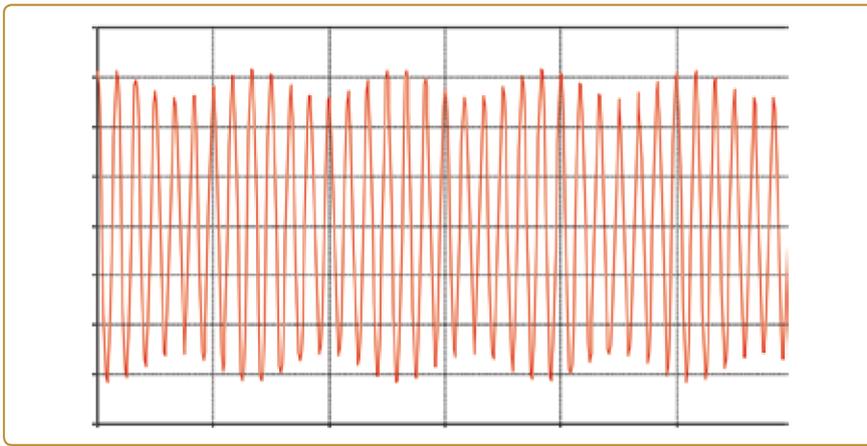


Figura 5 – Forma de onda contendo flutuação de tensão.

variações contínuas e rápidas na magnitude da corrente podem causar variações na tensão que são frequentemente referidas como flicker ou oscilação. A flutuação de tensão é um fenômeno eletromagnético, enquanto flicker é o resultado indesejável da flutuação de tensão em algumas cargas. A principal fonte dessas flutuações são os fornos a arco, em que as amplitudes das oscilações dependem do estado de fusão do material, bem como do nível de curto-circuito da instalação. Existem também as flutuações repetitivas que são geradas principalmente por máquinas de solda, laminadores, elevadores de minas e ferrovias. Existem também as oscilações esporádicas cuja principal causa é a partida de grandes motores.

Estudos mostram que, além da cintilação luminosa, as flutuações de tensão também podem causar oscilações de torque em motores e sobreaquecimento. Podem ainda contribuir para fenômenos de descargas parciais em equipamentos elétricos.

ENSAIOS E ESTUDOS

Uma vez verificados os distúrbios na qualidade da energia elétrica a que os equipamentos de uma instalação estão sujeitos, bem como suas principais consequências, demonstra-se então a importância de uma correta avaliação desses eventos dentro de qualquer instalação. Usualmente, essas investigações são realizadas somente quando equipamentos

começam a apresentar problemas de mau funcionamento, desligamentos frequentes e até mesmo queimas. Para um correto diagnóstico da qualidade da energia elétrica de uma instalação, faz-se necessário um conhecimento detalhado da instalação, com histórico dos eventos que vêm ocorrendo na mesma, a fim de determinar o escopo de avaliação da instalação.

A metodologia para avaliação da qualidade de energia de uma instalação difere quanto ao tipo de distúrbio que se busca investigar. Usualmente, em instalações industriais, os principais problemas reportados são desligamentos frequentes e queimas de equipamentos. Nesse tocante, deve-se avaliar a ocorrência de transitórios e VTCDs, que possam justificar os desligamentos frequentes e até mesmo a queima de equipamentos mais sensíveis, bem como conteúdo harmônico que prejudique o funcionamento desses equipamentos e possa levar a uma situação de ressonância indesejada.

Para avaliação de transitórios e VTCDs, usualmente, realizam-se campanhas de medição no ponto de entrada de energia das plantas industriais, ou nos principais barramentos. O período de monitoramento dessas campanhas pode variar. Recomenda-se que elas englobem pelo menos um ciclo completo de operação da instalação sob estudo. Uma vez verificada a ocorrência de transitórios e/ou VTCDs, deve-se tentar identificar se o principal responsável pelos eventos é um processo interno da planta ou os distúrbios são

oriundos da própria rede da concessionária.

Esse levantamento pode ser realizado correlacionando os instantes de operação desses eventos com paradas e partidas de equipamentos pesados da planta industrial, ou até mesmo com medições adicionais realizadas nos circuitos internos dessa planta. A solução para mitigação do problema identificado irá depender da origem do mesmo.

Ademais, pode-se solicitar à concessionária de energia elétrica o registro de atuação de relógios e relés do circuito elétrico alimentador da planta, a fim de corroborar na análise dos eventos medidos internamente.

Já no caso das distorções harmônicas, uma vez identificados indicadores desse distúrbio, a instalação deve passar por um estudo mais criterioso. Dentro desses estudos devem ser realizadas medições de distorções harmônicas nas principais cargas potencialmente perturbadoras, a fim de caracterizar o espectro harmônico gerado pelas mesmas. Adicionalmente, deve-se modelar a rede interna em software específico com o intuito de verificar as relações das impedâncias internas em função das frequências harmônicas. Com bases nesses resultados, é possível verificar os impactos das fontes geradoras de distorções harmônicas nas tensões da instalação, bem como realizar o correto projeto e dimensionamento das soluções mitigadoras.

Outra avaliação muito frequente em plantas industriais diz respeito à correção do fator de potência dessas instalações através do uso de bancos de capacitores. Essa correção é realizada quando se verifica um alto consumo de potência reativa por uma determinada instalação, consumo este que pode levar ao pagamento de excedentes na fatura de energia elétrica. A avaliação do fator de potência e o projeto das soluções dos bancos de capacitores usualmente são realizados através da simples avaliação do consumo de potência reativa da instalação sob estudo. Nesse tocante, é de suma importância avaliar também as distorções

harmônicas presentes no circuito, bem como o impacto da adição dos bancos de capacitores nessas distorções harmônicas. Ao adicionar novas capacitâncias ao circuito, a resposta em frequência da rede interna é alterada, podendo fazer com que altos conteúdos harmônicos circulem pelo referido banco de capacitores, reduzindo sua vida útil ou até mesmo danificando o equipamento permanentemente.

Durante as campanhas de monitoração da qualidade da energia elétrica é primordial utilizar equipamentos adequados para o escopo de distúrbios a serem avaliados. Nesse tocante, existe uma ampla gama de medidores de qualidade da energia elétrica, os chamados “qualímetros”, os quais monitoram os sinais de corrente e tensão trifásicas e automaticamente calculam os diversos indicadores de QEE, sempre

agregados em períodos fixos, usualmente, dez minutos.

Para escolha do equipamento adequado, recomenda-se a busca por equipamentos que estejam de acordo com a IEC 61000-4-30, a qual define os métodos de medição e a interpretação de resultados para parâmetros de qualidade de energia em corrente alternada. A IEC 61000-4-30 classifica os equipamentos em duas classes principais: Classes A e S. Os equipamentos da Classe A devem ser utilizados em casos em que são necessárias medições com alta precisão e repetibilidade como disputais com concessionárias e aplicações contratuais. Já os equipamentos de Classe S seguem também o protocolo de medição e interpretação dos dados apresentado pela IEC 61000-4-30, no entanto, devem ser aplicados para diagnósticos e avaliações de QEE pontuais, pois não possuem uma precisão e repetibilidade tão alta em comparação aos instrumentos da Classe A.

Adicionalmente, faz-se necessário

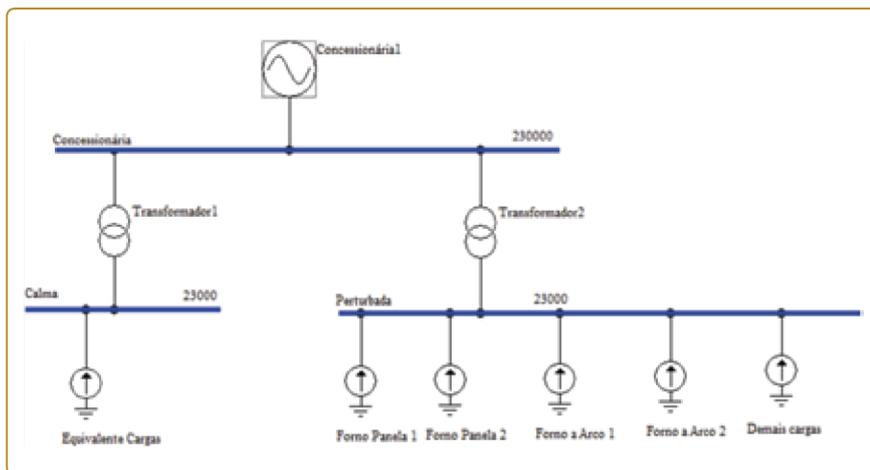


Figura 6 - Software PQF utilizado em estudos de distorção harmônica.

Fonte: Figura gentilmente cedida por Sérgio Ferreira de Paula (Uberlândia – 2017).

especificar corretamente os sensores de corrente e tensão a serem utilizados. Devem ser observados quesitos, como faixa de medição, ganho, linearidade e, principalmente, resposta em frequência. Este último parâmetro visa garantir que o sensor utilizado possui uma resposta em frequência linear dentro da faixa de frequência do distúrbio avaliado. Fato muito importante em análises de distorções harmônicas e transitórias.

No tocante da normatização vigente, a distorção deve ser avaliada em concordância com o ponto de conexão da referida instalação no sistema elétrico nacional. Para conexões do sistema de transmissão, devem ser observados os Procedimentos de Rede estabelecidos pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), mais especificamente, os submódulos 3.6 e 2.8. O submódulo 2.8 estabelece os indicadores de desempenho da Rede Básica em relação QEE e seus respectivos valores de referência. Os indicadores de tensão são compostos pelos seguintes parâmetros: tensão em regime permanente, flutuação de tensão, desequilíbrio de tensão, distorção harmônica de tensão, variação de tensão de curta duração (VTCD).

O ONS possui uma regulamentação definida especificamente para a conexão de instalações com características não lineares à Rede Básica, como, por exemplo, complexos de geração eólica e fotovoltaica, e grandes consumidores industriais. Essa normatização é definida através do submódulo 3.6 dos Procedimentos de Rede, e detalhada na nota técnica NT 009/2016, os quais definem a obrigatoriedade da realização de campanhas de medições do conteúdo harmônico nas instalações, bem como a realização de estudos de impacto harmônico através de simulações computacionais no software HarmZs do Cepel.

Já para consumidores conectados à rede de distribuição, devem ser observados os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (Prodinst) elaborados pela Agência Nacional

de Energia Elétrica (Aneel). O módulo 8 do Prodinst estabelece os procedimentos relativos à qualidade de energia elétrica. Esse módulo aborda tanto a qualidade do serviço, como a qualidade do produto, sendo que ambos são compostos por indicadores e valores de referência.

Na qualidade do produto, os seguintes fenômenos são analisados: tensão em regime permanente, fator de potência, harmônicos, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão, variação de frequência e variações de tensão de curta duração. Em relação à qualidade de serviço de distribuição de energia elétrica, são definidos os principais indicadores referentes à continuidade dos serviços (DEC, FEC, DIC, FIC e DMIC).

Ressalta-se que os valores de referência apresentados nas normatizações supracitadas se referem à qualidade da energia elétrica fornecida aos consumidores em seus referidos pontos de conexão. Dessa forma, tais valores podem ser utilizados como referenciais em avaliações técnicas, no entanto, não possuem validade normativa para redes internas as instalações dos consumidores e nem redes de baixa tensão.

SOLUÇÕES PARA QUALIDADE DE ENERGIA

Conforme se viu ao longo deste artigo, os distúrbios de qualidade de energia possuem diferentes causas e efeitos. Da mesma forma, a abordagem realizada para medição e estudos também seguem raciocínios diferentes. Consequentemente, cada tipo de distúrbio de qualidade de energia necessitará diferentes soluções.

No caso dos afundamentos momentâneos de tensão, os processos de mitigação podem ser realizados em várias partes do sistema elétrico, contudo, os custos envolvidos aumentam à medida que se elevam os níveis de tensão do sistema. Para se reduzir os efeitos de VTCDs, pode-se, em princípio, adotar uma das seguintes medidas básicas:

1 - Agir nas causas dos mesmos;

2 - Atuar na sensibilidade dos equipamentos.

No caso de atuações nas causas, se forem internas, podem-se tomar medidas de separação de circuitos, isolando cargas perturbadoras, como grandes motores elétricos, como adotar sistemas eletrônicos de partida suave (Soft starters).

No caso da redução da sensibilidade, alguns equipamentos eletrônicos permitem o ajuste das proteções de subtensão, como o caso de inversores de frequência utilizados para controle de velocidade dos motores. Da mesma forma, a adoção de sistemas de nobreaks e UPS poderiam contribuir para aumentar a suportabilidade de cargas sensíveis às VTCDs.

Outras ações de compensação dos afundamentos momentâneos de tensão, essas mais voltadas para afundamentos provenientes da concessionária de energia, estão baseadas no uso de equipamentos visando reduzir os impactos desses fenômenos sobre as cargas. Dessa forma, busca-se uma solução momentânea e localizada. Como exemplo de soluções, pode-se citar a instalação de alguns equipamentos, tais como:

- Transformadores ferorrresonantes (CVT)
- UPS
- Grupo motor-gerador
- Flywheel
- DVR

Outro tipo de ação seria mais abrangente, através do controle fino da tensão de alimentação de uma indústria evitando a propagação dos afundamentos pelo sistema, para que o mesmo não atinja as cargas, como o aproveitamento ou instalação de compensadores de tensão como STATCOM. No entanto, essas estratégias demandam grande montante financeiro.

No caso dos eventos transitórios, é importante a observância da necessidade das soluções sistêmicas como aterramento e sistemas PDA (ambos tratados em

fascículos dedicados), como a instalação e manutenção de supressores de surtos em painéis elétricos de baixa tensão e para-raios de óxido de zinco nas entradas de energia das indústrias. A adoção de transformadores para realização de desacoplamento magnético também auxilia na redução dos valores de pico dos eventos transitórios.

Com respeito às flutuações de tensão, algumas soluções utilizadas para mitigação dois afundamentos de tensão podem ser empregadas também para mitigar os efeitos das flutuações de tensão, como nobreaks e sistemas de armazenamento de energia. Também podem ser empregadas soluções, como reatores a núcleo saturado e sistemas de compensação estáticos de potência reativa.

Por fim, diante dos problemas causados por harmônicos, 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. Esses 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 desses filtros, dentre os quais se destacam: 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, esse dispositivo apresenta custos elevados (superiores aos filtros passivos), porém a queda no preço desses equipamentos nos últimos anos tem aumentado seu emprego pelas indústrias, em que não é possível conseguir um bom resultado com filtragem passiva.

Por fim, vale comentar que técnicas, tais como aumento do número de pulsos dos conversores estáticos também podem ser utilizadas, assim como compensadores eletromagnéticos para eliminação de harmônicas múltiplas triplas.

CONCLUSÃO

Este artigo demonstrou que, de uma maneira geral, as indústrias estão muito suscetíveis a problemas de qualidade de energia elétrica que podem, em algum momento, trazer grandes impactos econômicos para elas. Dessa forma, é vital a realização de ensaios e de testes nas instalações industriais para que se possa realizar análises e estudos que auxiliem na definição das melhores soluções aos problemas identificados.

REFERÊNCIAS

- [1] DUGAN, R. C.; McGRANAGHAN, M. F.; SANTOSO, S.; BEATY, H. W.; "Electrical Power Systems Quality", McGraw - Hill, 2ª Edição
- [2] BOLLEN, M. H. J.; "Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions", Wiley-IEEE Press, October 1999.
- [3] 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.
- [4] TEIXEIRA, M. D., PENICHE, R. A.; "Aspectos da Qualidade da Energia Elétrica - Harmônicos e VTCDs", LACTEC - Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, Curitiba - Paraná, 2005.
- [5] OLESKOVICZ, M.; "Qualidade da Energia Elétrica", LSEE - Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica, USP - Universidade de São Paulo, 2007.

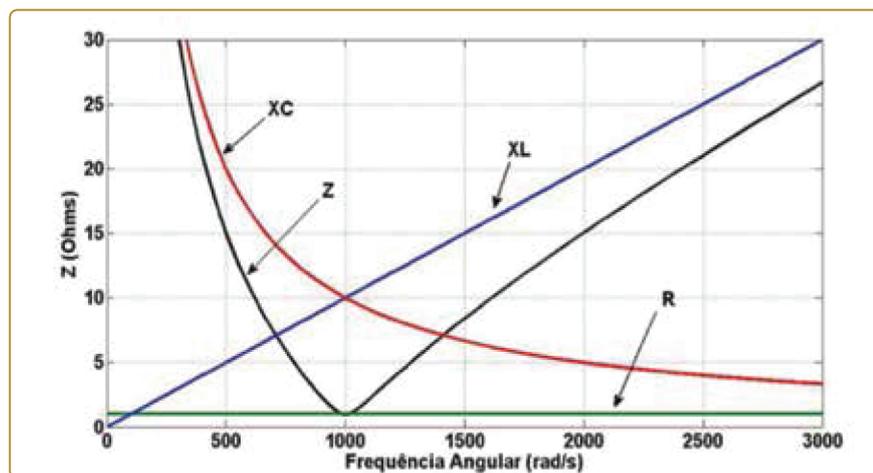


Figura 7 - Curva em preto indica a sintonia do filtro passivo em função da frequência.

Mateus Duarte Teixeira graduou-se em Engenharia Industrial Elétrica, possui mestrado em Qualidade de Energia Elétrica e doutorado. Atualmente, é pesquisador dos Institutos Lactec e professor da UFPR. Também ocupa a vice-presidência da SBQEE (Sociedade Brasileira de Qualidade de Energia Elétrica). Publicou cerca de 50 artigos em revistas e conferências na área de energia elétrica no Brasil e no exterior.

Pedro Augustho Biasuz Block é graduado em Engenharia Industrial Elétrica, com ênfase em Eletrotécnica. Atua como pesquisador dos Institutos Lactec e é aluno de mestrado na Universidade Federal do Paraná (UFPR) na área de estabilidade transitória de sistemas.

Fabio Sester Retorta é engenheiro eletricitista graduado pela UFPR e mestrando na UFPR na área de sistemas de energia. Trabalha como Pesquisador nos Institutos Lactec nas áreas de qualidade de energia elétrica. Possui trabalhos científicos publicados em eventos nacionais e internacionais (Cigré, IEEE).

CONTINUA NA PRÓXIMA EDIÇÃO
Acompanhe todos os artigos deste fascículo em www.osetoreletrico.com.br
Dúvidas, sugestões e outros comentários podem ser encaminhados para redacao@atitueditorial.com.br