

Problemas de Medições em Analisadores de Energia Elétrica Devidos a Supra-Harmônicas Produzidas por Conversores Eletrônicos de Potência

José A. Pomilio, João I. Y. Ota, Rafael K. Carneiro

*Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação,
Departamento de Sistemas e Energia, Laboratório de Redes Elétricas Inteligentes,
Campinas, SP, 13083-852, Brasil
(e-mail: antenor@unicamp.br, jiyota@unicamp.br, rafael.k.carneiro@gmail.com).*

Abstract: The article presents problems of harmonic identification in networks with the presence of power electronics converters with high switching frequency. It begins with a description of the standardized procedures for the operation of energy analyzers. The following shows how the presence of high frequency components can occur in currents and voltages signals. Finally, it is verified how such components can affect the correct spectral identification of the energy analyzers. Simulation results and field measurements are presented.

Resumo: O artigo apresenta problemas de identificação de harmônicos em redes com presença de conversores eletrônicos de potência com comutação em alta frequência. Faz-se uma descrição dos procedimentos normatizados para os analisadores de energia. A seguir demonstra-se como pode ocorrer a presença de elevadas componentes de alta frequência nas correntes e tensões. Finalmente verifica-se como a presença significativa desta alta frequência pode afetar a correta identificação espectral dos analisadores de energia. São apresentados resultados de simulação e medições em campo.

Keywords: Power quality; supra-harmonics; microgrids; power electronics.

Palavras-chaves: Qualidade de energia elétrica; supra-harmônicas; microrredes; eletrônica de potência.

1. INTRODUÇÃO

As normas de qualidade da energia elétrica (QEE) são pensadas e modernizadas para evitar, minimizar ou corrigir problemas, de modo que as informações dos aparelhos analisadores sejam confiáveis e reflitam os acontecimentos reais da rede elétrica.

No entanto, sempre há limitações. Em alguns casos, a evolução tecnológica das redes elétricas pode fazer emergir fenômenos novos, para os quais é possível que não existam previsão normativa, um método adequado de mensuração, ou mesmo um consenso sobre o impacto da perturbação na rede e nos equipamentos a ela conectados.

Um destes novos cenários refere-se às microrredes, com geração distribuída, acumuladores de energia e uma grande quantidade de conversores eletrônicos de potência (CEP) operando com comutação em alta frequência. Assim, fenômenos de QEE em redes com tais características, mesmo que ainda não normatizados, precisam ser identificados e entendidos para garantir a operação das microrredes de forma segura, estável, resiliente para todos os agentes, fontes ou cargas, a ela conectados.

Do ponto de vista dos equipamentos, é preciso conhecer características operacionais que possam interferir na qualidade das informações de saída dos analisadores. Como será apresentado, em algumas situações específicas, os analisadores podem não ser capazes de identificar as

grandezas efetivamente presentes na tensão ou na corrente ou, o que seria pior, podem indicar erradamente a presença de distúrbios. Será feita uma revisão de normas relacionadas a indicadores de QEE, com foco em fenômenos espectrais.

Procura-se apontar anacronismos dos textos normativos em função de uma evolução tecnológica mais rápida do que a atualização das normas, podendo gerar dificuldades de interpretação de resultados com vistas a eventuais atuações para melhoria da QEE.

1.1 A evolução das normas na direção da digitalização das medições

Os antigos medidores analógicos baseavam-se em comportamentos eletrodinâmicos, principalmente a partir das invenções de Edward Weston que em 1886 desenvolveu um medidor de tipo Galvanômetro de bobina móvel, com ímã permanente, o qual se tornou a base de funcionamento dos amperímetros, voltímetros e wattímetros nos 100 anos seguintes (Matsumoto, 2003).

Os medidores de energia do tipo *smart-meters* (Garcia et al. 2017) e analisadores de QEE viabilizaram-se a partir do uso de dispositivos e técnicas de processamento digital de sinais. O uso de medidores analógicos, fossem eletromecânicos ou eletrônicos, possibilitavam a verificação de apenas uma grandeza, como o valor da tensão ou corrente, por exemplo; ou ainda o registro ao longo do tempo por meio de oscilógrafos. Não existia um meio de, a partir apenas da

observação de tensões e correntes, extrair a grande quantidade de informações disponibilizadas pelos atuais medidores e analisadores de QEE. A constante evolução da capacidade dos equipamentos acompanha diretamente a evolução da eletrônica digital e dos sistemas computacionais embarcados, em especial os microprocessadores.

O uso de técnicas digitais aplicadas à medição de grandezas elétricas começa a se estabelecer no final dos anos 1970 (Abdul-Karim, 1980), ainda sem o uso de processamento digital e restrito a algumas grandezas específicas. O foco inicial das aplicações digitais foi para medidores de energia (Matouka, 1982), (Komatsu et. al. 1989). À medida que a tecnologia digital foi amadurecendo, aplicações para outras grandezas elétricas, como *flicker* e harmônicos foram sendo apresentadas (Montana et al. 1992) (Rocha, 1995).

Ao longo dos anos verifica-se tanto um aumento na capacidade de processamento, como na qualidade das informações, além de redução do volume dos aparelhos e expressiva redução de custo.

As normas que estabelecem os procedimentos de medições seguem a mesma trilha. Na sequência serão vistas algumas normas relativas à avaliação da QEE, considerando a evolução histórica e o emergir de novos fenômenos associados às mudanças tecnológicas das redes elétricas. Outro aspecto importante, mas que não será aprofundado neste artigo é a obsolescência de padrões de qualidade e mesmo de figuras de mérito. Um exemplo evidente é a regulamentação de *flicker*, cujos limites são baseados no uso de lâmpadas incandescentes, já fora de uso. Embora o fenômeno ainda possa ser relevante, certamente os limites das normas não são os adequados à atual tecnologia de iluminação. Outro exemplo é o uso do Fator de Potência de unidades consumidoras com geração própria (Pomilio et al. 2015), obrigando a adaptações de regulamentações que contemplam a questão tarifária, mas sem enfrentar a discussão técnica (ANEEL, 2013).

No que se refere à estrutura interna dos analisadores de QEE, é importante considerar a EN 62586-1 (European Norm, 2017) que trata das especificações dos aparelhos para verificação da qualidade da energia elétrica e considera exclusivamente sistemas digitais. De acordo com a norma, esses instrumentos podem ser usados:

- Na geração, transmissão e distribuição de eletricidade, por exemplo, dentro de uma central elétrica, subestação ou *conexão geradora distribuída*;
- No ponto de interface entre a instalação e a rede, a fim de verificar a conformidade do Contrato de Conexão entre um operador de rede e o cliente.

No que se refere aos procedimentos para análise do conteúdo espectral de tensões e correntes, foco deste artigo, a primeira versão do padrão IEC 1000-4-7 (IEC, 1991), que se refere a procedimentos de medições de harmônicos, identificava a possibilidade de análise “no domínio da frequência”, por meio de processamento analógico ou “no domínio do tempo”, por meio de processamento digital de sinais utilizando algoritmos de decomposição (como a Transformada Direta de Fourier, DFT ou a Transformada Rápida de Fourier, FFT) ou

ainda o uso de filtragem digital. Emendas e versões posteriores (European Norm, 2009) incorporaram aspectos tecnológicos que se mostraram mais proveitosos para as análises pretendidas. A partir da versão de 2002 da referida norma estabeleceu-se apenas o uso de sistemas digitais para a avaliação de harmônicos e inter-harmônicos.

Os diferentes procedimentos estabelecidos em normas específicas para vários distúrbios de QEE foram agregados na EN 61000-4-30, de 2003, na qual se consolidaram, com a tecnologia da época, os procedimentos para as medições (digitalizadas). A versão atual dessa norma é de 2015 (European Norm, 2015), com emenda em 2021.

1.2 Detalhes da instrumentação segundo a IEC

A instrumentação a ser utilizada para análise espectral (harmônicas e inter-harmônicas) é detalhada na IEC 61000-4-7 (2011). A Fig. 1 mostra a estrutura de blocos de um medidor genérico que pode ser usado para análise de tensão, corrente e potência. O fato de a norma especificar a DFT como o método de identificação espectral, não exclui a aplicação de outros princípios de análise, como bancos de filtros (digitais) ou *wavelets*. Projetos mais modernos tendem a usar a Transformada Rápida de Fourier.

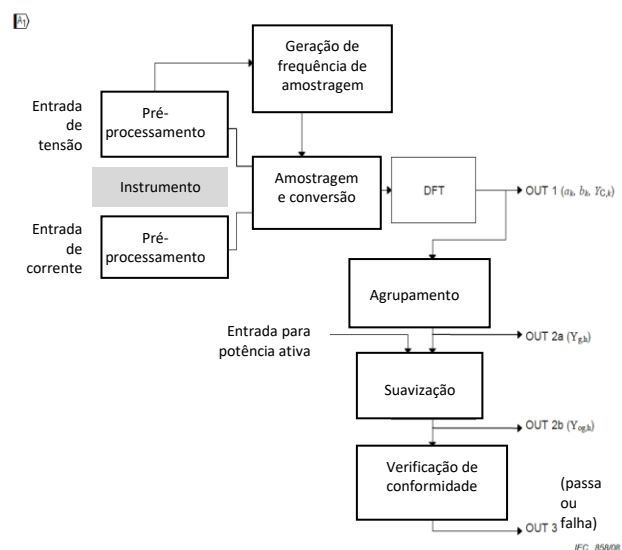


Fig. 1 Estrutura de medidor para análise espectral de acordo com IEC 61000-4-7 (2011).

Para a verificação de conformidade, a medição é feita em uma janela de 200 ms (resolução espectral de 5 Hz), fazendo uso de uma janela retangular, sincronizada com a frequência fundamental. Especialmente para instrumentos de baixo custo, uma janela mais curta, possivelmente apenas um ciclo, pode ser considerada. No entanto, tal instrumentação não pode ser usada para avaliar a conformidade de sinais não estacionários com limites de emissão, pois produzem resultados tecnicamente errados.

Estritamente falando, a DFT e a FFT produz resultados precisos apenas para sinais em estado estacionário. Sinais cujas amplitudes variam com o tempo não podem ser descritos corretamente apenas pelas componentes harmônicas. A fim de obter análises reproduzíveis de

emissões harmônicas quando analisando cargas de potência (e possivelmente conteúdo espectral) variável, uma combinação de técnicas de medição pode ser usada. A norma fornece uma estrutura simplificada, empregando métodos com coleta de amostras por um intervalo suficientemente longo para minimizar o impacto de variações na carga.

A saída OUT 1 fornece os componentes espectrais determinados a cada janela de 200 ms. Para avaliação dos harmônicos, a saída (OUT 2) faz uma agregação espectral por meio de uma soma quadrática das componentes intermediárias que porventura surjam entre dois harmônicos adjacentes. Tais componentes podem aparecer em função do processamento digital, pelo comportamento não estacionário da carga ou por existirem de fato. Tal agregação é feita de acordo com (1), ilustrada na Fig. 2. Devem ser usados componentes intermediários acima da ordem 2.

$$Y_{g,h}^2 = \frac{1}{2} \cdot Y_{C,(N \times h) - \frac{N}{2}}^2 + \sum_{k=-\frac{N}{2}+1}^{\frac{N}{2}-1} Y_{C,(N \times h) + k}^2 + \frac{1}{2} \cdot Y_{C,(N \times h) + \frac{N}{2}}^2 \quad (1)$$

O primeiro termo corresponde à amplitude identificada na própria frequência harmônica. Supondo uma rede de 60 Hz, os termos seguintes (supondo uma rede de 60 Hz) são aqueles que estão afastados de 5, 10, 15, 20 e 25 Hz da harmônica e o terceiro termo, por estar em 30 Hz é ponderado em 50% já que também será incluído no cálculo da próxima harmônica.

Embora o medidor seja capaz de identificar componentes a cada 5 Hz, na apresentação espectral, o que estiver em torno de cada harmônica será agregado e mostrado como se ocorresse na exata harmônica, ou seja, a presença de inter-harmônicas altera o valor da harmônica mais próxima. Caso se deseje observar inter-harmônicas, em geral é possível configurar o analisador para fornecer tais informações, que estão disponíveis em OUT 1.

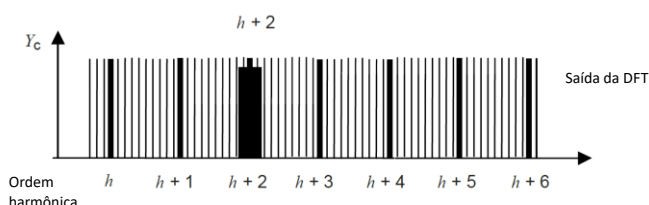


Fig. 2 Agregação de componentes para indicação do espectro.

A suavização do sinal indicada na Fig. 1 deve ser executada utilizando o valor eficaz $Y_{g,h}$ de cada ordem harmônica (OUT 2a), através de um filtro digital passa-baixas de primeira ordem com uma constante de tempo de 1,5 s, como mostra a Fig. 3. Tal procedimento produz a saída OUT 2b.

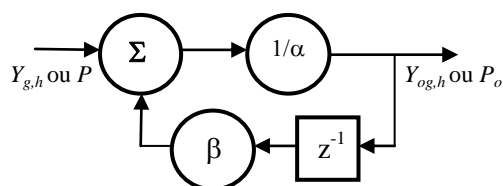


Fig. 3 Realização de um filtro digital passa-baixa: z^{-1} designa atraso de uma amostra, α e β são os coeficientes de filtro.

2. NOVOS CENÁRIOS PARA ANÁLISE DE QEE

Concomitantemente (Wetzler, 1982) ao desenvolvimento da tecnologia digital aplicada à medição de grandezas elétricas, o sistema elétrico sofreu, e ainda sofre uma intensa mudança de paradigmas, em especial associados à geração distribuída, ao uso de fontes renováveis, à implantação de microrredes (Lasseter, 2001) e à disseminação de conversores eletrônicos de potência conectados às redes de distribuição, tanto como carga, como realizando a injeção de potência a partir de fontes de energia, em particular a fotovoltaica e a eólica. Esse cenário trouxe novos e importantes desafios tecnológicos e normativos, alguns já antevistos por Wetzler (1982), como as questões relacionadas à proteção, medição de potência, tarifação, qualidade de energia, dentre outros.

Em particular interessa-nos considerar impactos da presença de múltiplos conversores eletrônicos de potência no lado de baixa tensão das redes de distribuição. Há alguns fenômenos conhecidos há muito (Prince, 1922), antes do atual processo de modernização das redes elétricas, como as distorções devidas a retificadores (Ott, 1963). A proliferação de tais conversores nas redes tem aumentado a distorção da corrente e, conseqüentemente, da tensão (Yanchenko, 2015). Espera-se que venha a ocorrer um aumento dos níveis de harmônicas nos sistemas de fornecimento de energia, até que as fontes de emissões sejam devidamente contidas pela imposição de normas específicas.

Além de tais problemas, as novas tecnologias trazem comportamentos potencialmente danosos (Troncha, 2021), ainda não contemplados nas normas. Um exemplo são os decorrentes de técnicas de comutação em alta frequência nos conversores eletrônicos de potência, cujas frequências são da ordem de quilohertz até algumas centenas de quilohertz (a depender da potência do conversor), produzindo interferências na rede além da faixa de harmônicas. Tais distorções podem, inclusive, advir de fenômenos de instabilidade sistêmica dada a interação de diversos conversores, além da faixa controlável pelos respectivos reguladores (Li, 2018).

2.1 A questão das supra-harmônicas

A preocupação com a presença de ruído eletromagnético conduzido nessa faixa de frequência tem crescido em virtude, principalmente, da proliferação de inversores associados a painéis fotovoltaicos de uso residencial, assim como diversas outras aplicações (IEC, 2015) (Bollen et.al., 2014), como fontes ininterruptas de energia, sistemas de carga/descarga de baterias, sistemas de acionamento e frenagem de motores, etc. Em um cenário de redes inteligentes de eletricidade (*smart grids*), a presença de tais conversores dispersos pela rede é certa.

2.2 As normas e as supra-harmônicas

Há intensa discussão sobre procedimentos de medição e limites de emissão nessa faixa espectral, denominada de “supra-harmônicas” em algumas referências (Ota et. al., 2020) (Greverner et.al., 2017). Uma premissa é que a presença de componentes espectrais de elevada frequência não devem produzir danos aos equipamentos alimentados. Assim, por exemplo, deve haver uma restrição de nível, à medida de aumenta a frequência como forma de proteger,

principalmente, os capacitores contra um aumento excessivo em suas correntes.

Devido às frequências de estudo serem na faixa de várias dezenas de kHz, há a necessidade de uma alta taxa de amostragem para a observação correta dos sinais. Para que seja possível identificar a presença de uma componente espectral em um sinal amostrado é preciso pelo menos duas amostras por período. Assim, por exemplo, para identificar sinais até 150 kHz seria necessário não menos que 300 kHz de frequência de amostragem.

Esses fenômenos representam comportamentos em que a realidade impõe aos legisladores a necessidade de dar respostas a novas questões, impensáveis há poucos anos, mas que vão ganhando importância em virtude de efeitos decorrente da própria evolução da tecnologia.

Um primeiro aspecto a ser demonstrado é que, de fato, esse é um problema que merece atenção normativa. A presença de componentes na faixa de frequências em questão representa efetivamente um problema de QEE? Apenas se a resposta for claramente afirmativa é que haverá alguma possibilidade de mudança nas normas.

Um problema correlato se refere aos efeitos de tais componentes espectrais sobre os equipamentos. Nesse caso, o foco se desloca para os padrões que regulamentam a fabricação dos aparelhos, tanto no aspecto de emissão quando no de susceptibilidade. Embora importantes, tais aspectos não serão discutidos neste trabalho.

2.3 A amplificação das componentes de chaveamento

Os conversores eletrônicos de potência (CEP) que realizam chaveamento interno em alta frequência, atuam como fonte (conectando fontes distribuídas à rede) ou como carga, possuem um filtro passa baixas em sua conexão com a rede CA de modo a minimizar a propagação do ruído de chaveamento para a rede. O dimensionamento de tais filtros tipicamente do tipo LC ou LCL, consideram que a rede apresenta uma característica indutiva, o que lhes garante a efetividade da filtragem (Nardi et.al. 2015).

No entanto, no cenário de redes repletas de CEPs, cada um com seu filtro, o comportamento da impedância no ponto de acoplamento (PAC) não necessariamente será do tipo indutivo, uma vez que as interações entre os filtros eletricamente próximos introduzirão novas ressonâncias e, com isso, poderão alterar significativamente a capacidade de filtragem esperada, conforme já descrito por Carneiro et al. (2021).

A Fig. 4 ilustra conceitualmente a interconexão de dois CEPs em um mesmo PAC. O que pode ser verificado é que existe um caminho para componentes de alta frequência que circula preferencialmente entre os conversores e apenas de forma muito limitada circula para a rede, que é representada por L_{rede} e V_{rede} .

As formas de onda experimentais da Fig. 5 mostram esse comportamento. Com um único inversor (primeiro conjunto de formas de onda), verifica-se a efetiva filtragem da alta frequência, não sendo identificável a componente de comutação (20 kHz) nos sinais. No entanto, ao serem ligados

outros inversores (nesta instalação há quatro inversores), a corrente observada na saída de cada um dos CEPs passa a apresentar uma elevada componente em alta frequência, como se vê na forma de onda intermediária (em azul) conjunto inferior. As componentes de corrente devidas ao chaveamento dos CEPs não se propaga para a rede devido à impedância indutiva elevada deste caminho. Entretanto circula facilmente entre os estágios de saída dos filtros dos inversores (Carneiro, 2020).

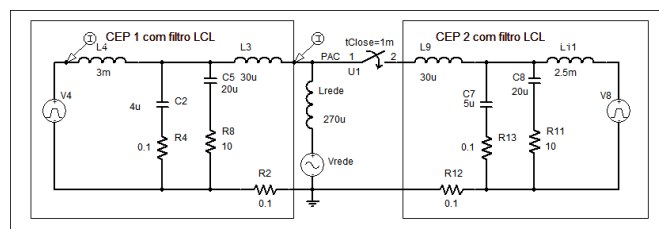


Fig. 4 Conexão de dois CEPs em um mesmo PAC.

Verifica-se assim que, a depender das interações entre filtros dos CEPs podem surgir fenômenos que amplifiquem a presença das frequências de chaveamento nos sinais de tensão e corrente a serem observados pelos analisadores de QEE. Na sequência será discutido o impacto de tais componentes nos procedimentos de medição baseados em processamento digital.

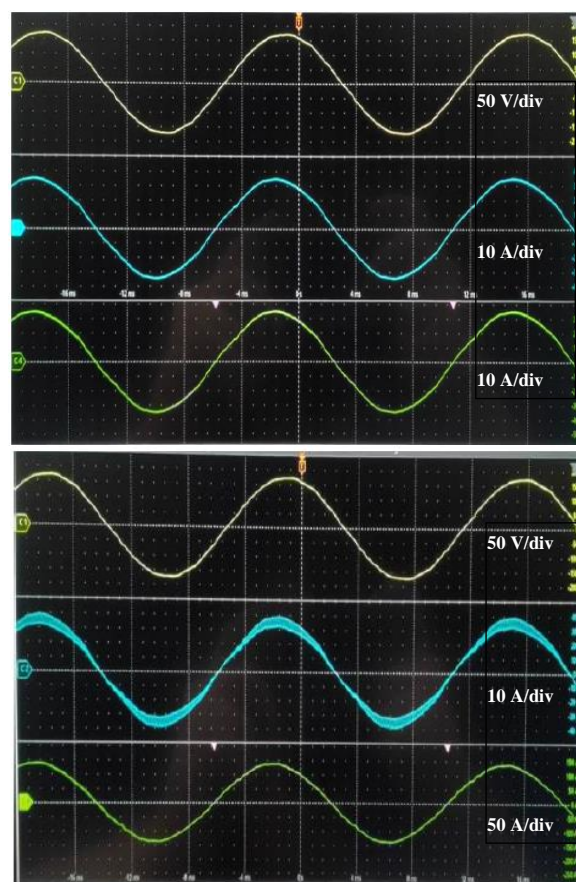


Fig. 5 Interação de inversores FV. Acima, operação de um único inversor; abaixo, operação conjunta de quatro inversores. De cima para baixo, Tensão no PAC, corrente de um inversor e corrente injetada na rede.

3. PROCESSAMENTO DIGITAL

A Fig. 6 mostra o efeito da amostragem de um sinal senoidal, conforme tipicamente realizado no estágio de entrada dos analisadores de energia. Nota-se a boa qualidade na reprodução espectral, o que se deve à elevada taxa de amostragem. Praticamente não há erro no valor da senoide amostrada, mas surgem componentes espectrais em torno da frequência de amostragem (1600 Hz, correspondente a 32 amostras por ciclo de 50 Hz). Ou seja, um analisador de harmônicas que estivesse submetido a tais dados amostrados, sem qualquer processamento adicional, poderia indicar a presença das 31ª e 33ª harmônicas que inexistem.

O uso de uma filtragem no sinal de entrada (filtro *anti-aliasing*) não resolveria o problema, pois não se trata de evitar a amostragem de componentes não identificáveis, mas sim de um efeito da própria amostragem. O que os aparelhos fazem é limitar a indicação do espectro apenas até a frequência identificável, que corresponde, teoricamente, à metade da frequência de amostragem. No exemplo, o espectro seria mostrado apenas até 800 Hz, sem criar qualquer confusão para a análise.

Ao elevar a taxa de amostragem, os componentes espectrais espúrios deslocam-se para frequência mais elevadas. Se o espectro deve ser analisado até a 50ª harmônica, 100 amostras por ciclo seria suficiente.

Para permitir a análise espectral utilizando a FFT é preciso coletar uma quantidade de amostras que seja potência de dois e que corresponda a um número inteiro de ciclos da rede. Assim, ao amostrar um sinal com 128 amostras por ciclo, o espectro até a 64ª harmônica seria plenamente confiável. Note-se que a identificação correta se refere apenas à frequência. Para uma correta identificação de amplitude é necessária uma quantidade maior de amostras por período.

Para que um analisador de QEE identifique corretamente a presença de componentes de alta frequência, a amostragem tem que ser maior do que o dobro da frequência de produzida pelos CEPs. Se isso não ocorrer, além de não ser capaz de identificar corretamente a componente espectral, fenômenos espúrios de identificação podem ocorrer.

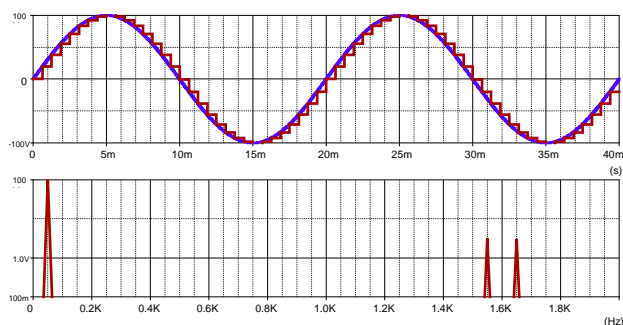


Fig. 6 Acima: sinal senoidal e respectiva amostragem do tipo amostrador-segurador. Abaixo: espectro do sinal amostrado.

3.1 Erros na identificação de frequências

A Fig. 7 mostra um sinal senoidal (180 V de pico em 60 Hz) ao qual se sobrepõe uma alta frequência em 15 kHz, com 11

V pico-a-pico. É feita amostragem com 256 amostras por ciclo, ou seja, em 15360 Hz. Enquanto o sinal se mantém senoidal o sinal amostrado (inferior) acompanha a forma original. Quando ocorre a contaminação pela alta frequência o sinal amostrado passa a mostrar-se com uma distorção em baixa frequência.

A Fig. 8 mostra o detalhe da onda amostrada e o espectro calculado pela FFT a partir do sinal amostrado. A harmônica em 360 Hz inexistente no sinal e aparece em função da diferença entre o sinal existente (15 kHz) e a amostragem (15,36 kHz). O valor de 3% poderia levantar questões sobre a qualidade do conversor e de seu filtro de saída. No entanto, é apenas um efeito do processo de digitalização e de uma combinação fortuita entre frequências observáveis no sinal original.

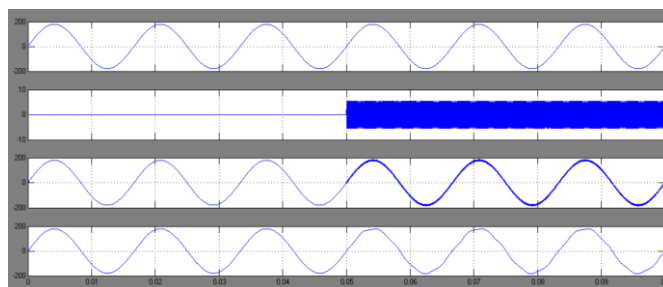


Fig. 7 De cima para baixo: sinal senoidal (200V/div.), sinal em 15 kHz (10V/div.), sinal senoidal somado à alta frequência (200V/div.), sinal após a amostragem (200V/div.). Horiz.: 10ms/div.

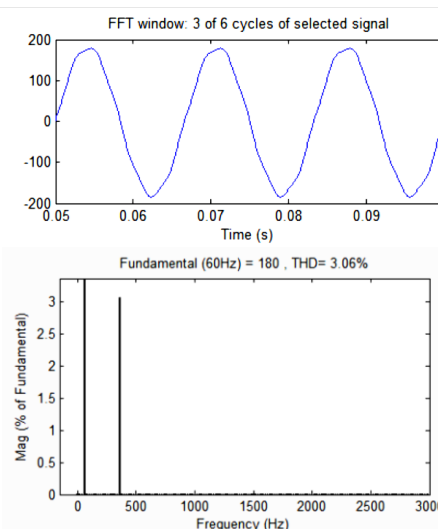


Fig.8 Sinal após a amostragem e respectivo espectro, indicando harmônica em 360 Hz inexistente no sinal original.

A Fig. 9 mostra os mesmos sinais com 512 amostras por ciclo (30720 Hz), ou seja, com capacidade de identificar a presença da componente de 15 kHz.

O novo cálculo da FFT produz uma distorção nula na faixa harmônica. Note no traço inferior que, após a amostragem, a forma de onda não corresponde ao sinal original, no entanto, a identificação da componente espectral está correta. Ou seja, diferentes analisadores, ambos de boa qualidade, podem indicar resultados muito diversos, alguns errados, a depender da composição espectral do sinal original de tensão ou corrente. O segundo medidor, com 512 amostras, também

teria problemas de identificação caso o sinal estivesse contaminado em frequências próximas a 30 kHz.

De forma análoga, um analisador de QEE que amostrasse em 10,24 kHz (comum em produtos comerciais, que fazem coleta de amostras durante 200 ms, totalizando 2048 amostras em 12 ciclos de 60 Hz) terá problemas com componentes acima de 5,12 kHz, que é uma faixa de frequência em que se encontram inversores de maior potência, normalmente associados a geradores eólicos.

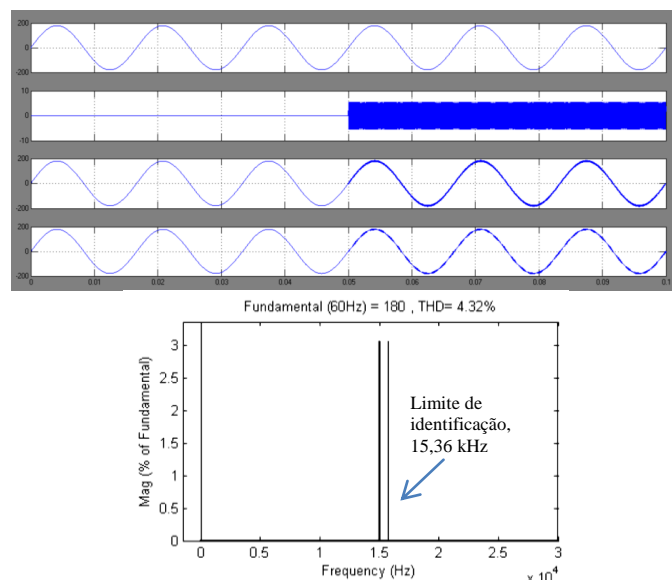


Fig. 9 Resultados utilizando 512 amostras por ciclo. Acima, de cima para baixo: sinal senoidal (200V/div.), sinal em 15 kHz (10V/div.), sinal senoidal somado à alta frequência (200V/div.), sinal após a amostragem (200V/div.). Horiz.: 10ms/div. Abaixo, espectro do sinal amostrado.

A norma EN 61000-4-30 diz que para aparelhos Classe S o uso de filtro *anti-aliasing* é opcional. Muitos medidores qualificados para Classe A têm a opção de realizar a amostragem com ou sem filtro. A EN 61000-4-7 indica a filtragem, sem diferenciar as classes e dá informações sobre as características da filtragem, indicando a frequência de corte e a atenuação esperada.

Mesmo com o uso do filtro, existe a possibilidade de a saída do analisador indicar harmônicas inexistentes. Isso parece mais possível nas medições de corrente, pois, como foi mostrado, a participação relativa da alta frequência é maior na corrente do que na tensão.

Embora a filtragem possa reduzir o problema de identificações erradas, não resolve a incapacidade dos analisadores identificarem a presença da alta frequência. Ou seja, a rede pode estar com significativos problemas na faixa supra-harmônica e os procedimentos e aparelhos de medição não são capazes de identificá-los.

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Antes de apresentar medições realizadas com analisadores de QEE, consideram-se sinais adquiridos por um osciloscópio digital, o qual permite alterar a taxa de amostragem. O sinal de corrente refere-se à saída de um inversor fotovoltaico (FV)

conectado em um PAC onde também se encontram outros conversores do mesmo tipo. Ou seja, realiza-se a amplificação da componente de alta frequência (20 kHz) conforme já descrito. A Fig. 10 mostra a aquisição em 1MS/s (10^6 amostras por segundo). Verifica-se a identificação de componentes em baixa frequência correspondentes a efetiva distorção harmônica da corrente. Na faixa de frequência mostrada no espectro (até a 200ª harmônica, 12 kHz) não se identifica a componente de chaveamento.

A Fig. 11 mostra os mesmos sinais com amostragem em 31,25 kHz. Aparecem componentes em torno de 11,25 kHz, que é a diferença entre a componente efetivamente presente na corrente (20 kHz) e a amostragem. Embora inexistentes, tais componentes, por estarem além da faixa de análise harmônica talvez não despertassem desconfiância, ou sequer seriam indicadas por analisadores de QEE.

A Fig. 12 repete a medição, agora com uma amostragem em 25 kHz. O espectro mostra até a 100ª harmônica (6 kHz), dominado por componentes espúrias em torno de 5 kHz que inexistem na corrente e, novamente, são devidas apenas à combinação da amostragem com a componente de alta frequência presente na corrente.

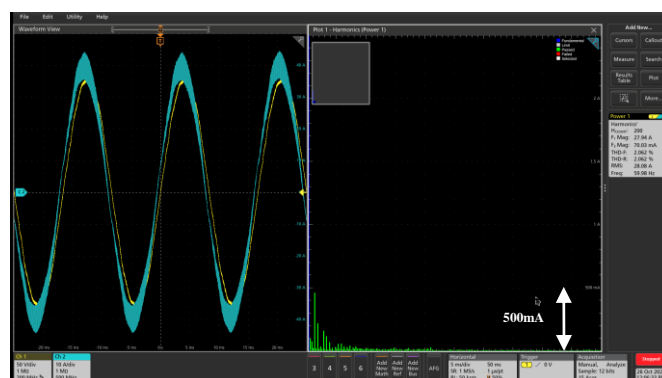


Fig. 10 Corrente de saída de inversor FV (azul, 10A/div.), tensão no PAC (amarelo, 50V/div.) e espectro da corrente amostrada em 1 MHz, entre 0 e 12 kHz.

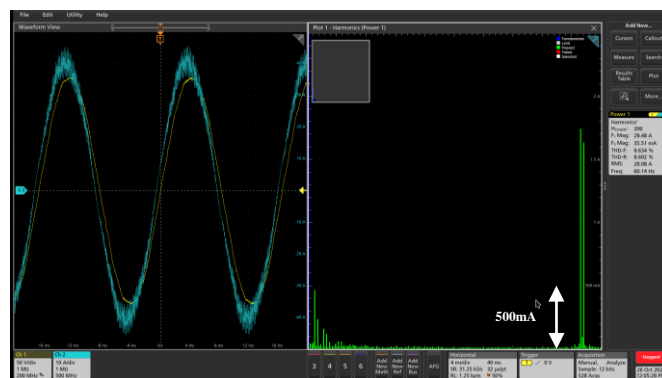


Fig. 11 Corrente de saída de inversor FV (azul, 10A/div.), tensão no PAC (amarelo, 50V/div.) e espectro da corrente amostrada em 31,25 kHz, entre 0 e 12 kHz.

4.1 Medição com analisador de QEE

Os seguintes resultados foram obtidos em uma planta FV de 337 kWp, com cinco inversores trifásicos, comutação em 32 kHz, conectada no mesmo PAC. O analisador Dranetz,

modelo HDPQ VISA SP, com 512 amostras/ciclo (30,72 kHz @ 60 Hz) foi instalado na saída de um dos inversores FV.

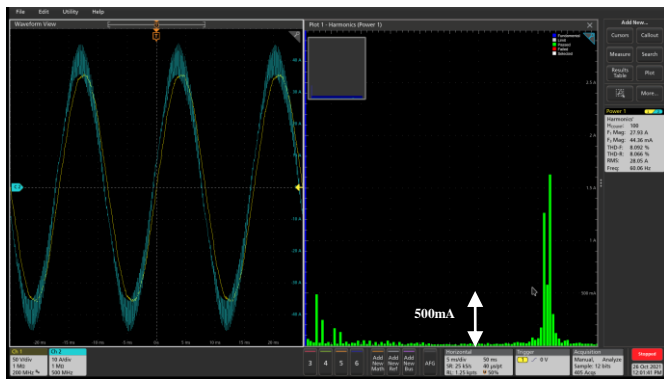


Fig. 12 Corrente de saída de inversor FV (azul, 10A/div.), tensão no PAC (amarelo, 50V/div.) e espectro da corrente amostrada em 25 kHz, entre 0 e 12 kHz.

A Fig. 13 mostra a corrente de uma das fases na saída do inversor, como observada pelo analisador, ou seja, após a amostragem. A oscilação de corrente de alta frequência é claramente notada e pode ser estimada em 10 A pico ao pico. No entanto, a frequência é diferente da que realmente ocorre. Todos os procedimentos de cálculo e análise feitos pelo analisador de QEE são baseados neste sinal amostrado. Observe que os componentes reais de alta frequência não estão mais disponíveis após a amostragem.

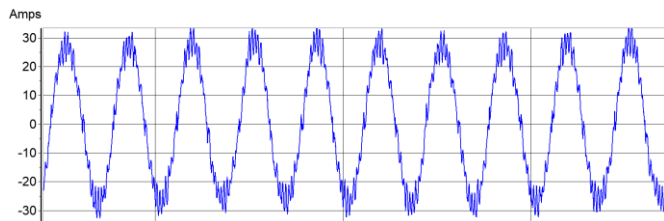


Fig.13 Corrente de uma das fases na saída do inversor, após amostragem, resultando em uma ondulação de alta frequência inexistente. Escala horizontal: 50ms/div.

A Fig. 14 mostra o histograma das componentes harmônicas da corrente. A diferença entre a amostragem (30,72 kHz) e a frequência de comutação (cerca de 32 kHz) leva ao surgimento de componentes em torno de 1280 Hz. O procedimento de agregação espectral, reúne as componentes nos valores harmônicos da vizinhança. A componente fundamental é omitida na figura.

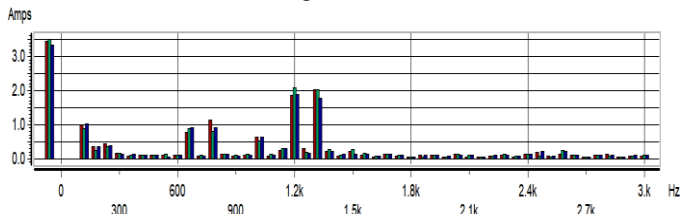


Fig. 14 Espectro das correntes, com harmônicas inexistentes. À esquerda (primeira barra de histograma), valor RMS de todos harmônicos [A].

O mesmo comportamento ocorre com a tensão. No entanto, como neste ensaio os valores do ruído de alta frequência e do

sinal de amostrado resultante são relativamente menores, o impacto no espectro não é significativo.

Esses resultados de medições erradas, se não identificados como tal, poderiam criar obstáculos à conexão do CEP à rede elétrica, pois poderiam ser interpretadas como problemas de mau funcionamento do conversor ou ainda ressonâncias do sistema, exigindo, por exemplo, a aplicação de filtros adicionais, tentando mitigar harmônicos que, na realidade, não existem. A identificação completa e correta da rede é bastante importante para identificar possíveis ressonâncias, separando-as das medidas impróprias (Torquato, 2020) (Gregory et al., 2020).

5. CONCLUSÕES

Dado que todos os modernos medidores e analisadores de energia elétrica fazem uso de processamento digital de sinais, o conhecimento de como tais equipamentos, a partir dos sinais reais de tensão e corrente, chegam às indicações de importantes parâmetros de avaliação da QEE, é fundamental para a correta interpretação dos resultados. Este trabalho discutiu o problema das supra-harmônicas associadas aos conversores eletrônicos de potência que estão presentes nas modernas redes elétricas. Demonstrou-se a possibilidade de amplificação de circulação de tais componentes espectrais e os decorrentes possíveis erros de medição. Em especial, a detecção errônea de harmônicas é preocupante, pois, se não identificadas como um erro de medição, pode levar à exigência inócua de implantação de procedimentos de filtragem ou mesmo ao impedimento da conexão de algum dispositivo de geração distribuída. Os resultados de simulação e as medições de campo comprovam os fenômenos e os erros de medição apontados também são verificados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o financiamento da Fundação de Amparo à Pesquisa de São Paulo (FAPESP) por meio dos processos #2016/08645-9 e #2018/13993-1. Este trabalho foi desenvolvido através do programa de Pesquisa e Desenvolvimento do Setor Elétrico PD-00063-3058/2019 - PA3058: "MERGE - Desenvolvimento de Microrredes Eficientes, Confiáveis e Sustentáveis.", regulado pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, em parceria com as distribuidoras do grupo CPFL Energia.

REFERÊNCIAS

- Abdul-Karim, M.A.H. and Boghosian, D.H. (1980). A Digital Power-Factor Meter Design Based on Binary Rate Multiplication Techniques, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol.: 29, Issue: 4.
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica (2013). *Resolução Normativa No. 569*, de 23 de Julho de 2013.
- Bollen, M., Olofsson, M., Larsson, A., Rönnberg, S., Lundmark, M. (2014). Standards for supraharmonics (2 to 150 kHz). *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, v. 3, n. 1, p. 114–119.
- Carneiro, R.K., Ota, J.I.Y. and Pomilio, J.A. (2020). Field Measurements of Non-intentional Emissions above 2 kHz in Photovoltaic Inverter Installations. *IEEE 29th*

- International Symposium on Industrial Electronics*, pp. 1503-1508.
- Carneiro, R.K., Ota, J.I.Y. and Pomilio, J.A. (2021). Amplificação da Distorção em Alta Frequência em Redes de Distribuição com Conversores Eletrônicos de Potência. *XIV Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, CBQEE 2021*.
- European Norm (2009). *Testing and measurement techniques. General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto*. EN 61000-4-7:2002 +A1:2009.
- European Norm (2015). *Testing and measurement techniques. Power quality measurement methods*. EN 61000-4-30:2015 +A1:2021.
- European Norm (2017). *Power quality measurement in power supply systems. Power quality instruments (PQI)*. EN 62586-1:2017.
- Garcia, F.D., Marafão, F.P., de Souza, W.A. and Pereira da Silva, L.C. (2017) Power Metering: History and Future Trends. *9th IEEE Green Technologies Conference*, pp. 26-33.
- Gregory, R.C.F., Troncha, G.S., Giancesini, B.M., Chaves, C.F., and Santos, I.N. (2020). Impact Studies of Connecting Tuned Harmonic Filters onto a Brazilian Wind Farm. *Renewable Energy & Power Quality Journal*, Vol.18, pp.562-567.
- Grevener, A., Meyer, J., Rönnerberg, S., Bollen, M. and Myrzik, J. (2017). Survey of supraharmmonic emission of household appliances. *CIREN – Open Access Proceedings Journal*, v. 2017, n. 1, p. 870–874.
- IEC (1991) *Electromagnetic compatibility (EMC). General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto*. IEC 1000-4-7.
- IEC (2011) *Electromagnetic compatibility (EMC). General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto*. IEC 61000-4-7.
- IEC (2015). *Power electronics systems and equipment – Operation conditions and characteristics of active infeed converter (AIC) applications including design recommendations for their emission values below 150 kHz*. IEC Technical Specification, IEC TS 62578, 2nd edition.
- Komatsu, M., Kobayashi, T., Wada, S. and Nakamura, H. (1989) Volt-ampere-hour meter using a digital signal processor, *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*.
- Lasseter, B. (2001) Microgrids [distributed power generation], *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*. Vol. 1.
- Li, C. (2018). Unstable Operation of Photovoltaic Inverter from Field Experiences, *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 33, no. 2, pp.1013–1015.
- Matouka, M.F. (1982). A Wide-Range Digital Power/Energy Meter for Systems with Nonsinusoidal Waveforms, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. IE-29, Issue: 1.
- Matsumoto, E. (2003). Edward Weston made his mark on history of instrumentation. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, vol. 6, no. 2, pp. 46-50.
- Montano, J-C, Lopez, A., Castilla, M. and Gutierrez, J. (1992). A DSP-based electric power meter, *International Conference on Industrial Electronics, Control, Instrumentation, and Automation*.
- Nardi, C., Stein, C.M.O., Carati, E.G., Costa, J.P. and Cardoso, R. (2015). A methodology of LCL filter design for grid-tied power converters. *IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference*. pp. 1-5.
- Ota, J.I.Y., Carneiro, R.K., Santos, J.P., Rufino, R.F. and Pomilio, J.A. (2020). Problema emergente das distorções entre 2 e 150 kHz em redes elétricas: Levantamento bibliográfico. *VIII Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*.
- Ott, R.R. (1963). A filter for silicon-controlled rectifier commutation and harmonic attenuation in high-power inverters. *IEEE Transactions on Communication and Electronics*, vol. 82, no. 2, pp. 259-262.
- Pomilio, J.A., Bonaldo, J.P., Morales-Paredes, H.K. and Tenti, P. (2015). About Power Factor and THDi in the Smart Micro-Grid Scenario, *13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st IEEE Southern Power Electronics Conference*.
- Prince, D.C. (1922). Mathematical Treatment of Rectification Phenomena. *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, vol. 10, no. 5, pp. 393-398.
- Rocha, J.P.S. and Deckmann, S.M. (1995). Digital flickermeter implementation, *IEEE 38th Midwest Symposium on Circuits and Systems*, Vol. 2.
- Torquato, R., Arguello, A. and Freitas, W. (2020). Practical Chart for Harmonic Resonance Assessment of DFIG-Based Wind Parks. *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 35, no. 5, pp. 2233–2242.
- Troncha, G.S., Santos, I.N. and Bonelli, A.F. (2021). Interações Harmônicas em Sistemas com Elevada Penetração de Conversores Eletrônicos Modernos: Estado da Arte e Novos Desafios. *XIV Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica*, pp.1-6.
- Wetzler, F.U. (1982). Power/energy: Connecting renewable power sources into the system: Windmills, fuel cells, and photovoltaics may serve existing grids, but first many technical, legal, and economic issues must be addressed. *IEEE Spectrum*, vol. 19, no. 11, pp. 42-45.
- Yanchenko, S. and Meyer, J. (2015). Harmonic emission of household devices in presence of typical voltage distortions. *IEEE Eindhoven PowerTech*.