

Assessment on the Behavior of Harmonic Phase Angles

Guilherme L. Xavier and José Rubens Macedo Jr, *Senior Member, IEEE*

Abstract—Existing methodologies and protocols for characterizing the harmonic components of voltage and current from digital measurements only consider the measurement of the amplitudes of these quantities. Thus, the phase angles of the harmonic components, required for some types of analysis in electrical systems, are simply ignored. In fact, there is no standardized methodology for measuring and temporal aggregation of phase angles of harmonic components. In this context, the present article aims to contribute to the subject by presenting the behavior of the phase angles of the harmonic components over time under different conditions. For this purpose, specific voltage and current waveform measurements were performed to analyze the phase angle behavior of the harmonic components over 24 hours, considering individual electrical loads, as well as residential and commercial installations, both connected to a low voltage power distribution system. Additionally, the behavior of the phase angles of the harmonic components measured at the output of a medium voltage distribution feeder will be presented. The results show a sporadic behavior for these quantities, reinforcing the need to develop a new methodology for temporal aggregation of phase angles of harmonic components.

Index Terms—harmonic analysis, harmonic phase angle, prevailing harmonic phasor, measurement protocols, power system harmonics, power quality

I. INTRODUÇÃO

Ao longo dos últimos anos, notadamente em função da ascensão das políticas de sustentabilidade e meio ambiente em todo o mundo, é cada vez mais evidente a evolução tecnológica na geração, transmissão, distribuição e consumo da energia elétrica, devido, sobretudo, à busca por soluções energéticas mais eficientes. Neste contexto, em decorrência da crescente utilização de cargas eletrônicas, com características não-lineares, surgem nos sistemas elétricos fenômenos ou perturbações que podem ser traduzidos em prejuízos tanto para os consumidores, quanto para as concessionárias de distribuição e transmissão de energia elétrica.

A designação “não-linear”, para caracterização de cargas elétricas sob o ponto de vista da qualidade da energia elétrica (QEE), é utilizada para representar aquelas cargas que fundamentalmente não obedecem à lei de Ohm [1]. Ou seja, aquelas cargas nas quais a relação entre a tensão aplicada e a corrente resultante não pode ser matematicamente representada por uma função linear. Assim, como decorrência direta dessa

não-linearidade, verifica-se o surgimento de um dos principais fenômenos associados com a qualidade da energia elétrica: a distorção harmônica [2].

Em função do surgimento das distorções nas formas de onda da corrente e, conseqüentemente, da tensão, tem-se, dentre outros impactos, o incremento das perdas técnicas nos sistemas de distribuição e transmissão da energia elétrica [3]-[4]. Uma das formas de quantificar a parcela de perdas técnicas, associada à circulação das correntes harmônicas nas redes elétricas, é a realização de simulações computacionais de fluxo harmônico. Contudo, para realização deste tipo de simulação torna-se fundamental a caracterização das componentes harmônicas de corrente e tensão em termos de amplitude e ângulo de fase. Tais características das componentes harmônicas podem ser obtidas através de modelos matemáticos previamente incorporados ao estudo de fluxo harmônico, ou, ainda (e de forma mais assertiva), através da realização de campanhas de medição, contemplando o registro não somente das amplitudes das componentes harmônicas, mas também dos respectivos ângulos de fase para cada uma dessas componentes harmônicas [5].

Nesse sentido, os medidores dos parâmetros de qualidade da energia elétrica, atualmente disponíveis no mercado, baseiam-se nos protocolos e procedimentos estabelecidos por normas internacionais [6]-[7], as quais estabelecem uma metodologia para quantificação apenas das amplitudes das tensões e das correntes harmônicas. Apesar desta metodologia para medição das amplitudes encontrar-se consolidada, o mesmo não se observa no caso dos ângulos de fase das componentes harmônicas. Na verdade, ainda não existe uma metodologia padronizada para esse propósito. No entanto, mesmo assim alguns fabricantes de equipamentos trazem como resultado da medição utilizando seus analisadores, os ângulos de fase das componentes harmônicas, os quais muitas vezes são apenas grandezas instantâneas ou ainda, baseados em implementação de metodologia própria. Os resultados de ângulos de fase para as tensões ou correntes harmônicas provenientes desses medidores não podem ser considerados confiáveis, visto que em [7] não é mencionado ainda as agregações dos ângulos de fase das componentes harmônicas. No Brasil, a metodologia de medição dos fenômenos da QEE é estabelecida no Módulo 8 do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional), o qual não faz nenhuma menção

quanto aos ângulos de fase das componentes harmônicas [8].

Assim, considerando-se que os medidores comercialmente disponíveis possibilitam apenas o registro dos valores das amplitudes das tensões e correntes harmônicas individuais, agregadas em 10 minutos [7], qual seria o valor do ângulo de fase correspondente para essas duas grandezas para o mesmo intervalo de tempo de agregação? Em termos físicos e elétricos, apesar da pergunta parecer não possuir um sentido prático, uma vez que os fasores de tensão e corrente harmônica podem variar muito dentro de uma mesma janela de tempo de 10 minutos, ela é de suma importância para solução de problemas práticos, como por exemplo: estudos de fluxo de potência harmônico [9]-[10], dimensionamento de soluções para atenuação dos efeitos decorrentes da circulação das correntes harmônicas nas redes elétricas [11], método simplificado para estimação do potencial de cancelamento do nível harmônico em uma rede elétrica [12], estudo da performance de relés de proteção [13], estudo do somatório das correntes harmônicas de diferentes cargas perturbadoras [14], dentre outras aplicações. Os ângulos de fase das componentes harmônicas são de grande importância nesses estudos, uma vez que os mesmos definem o sentido do fluxo da potência harmônica, podendo ser no sentido da fonte para a carga ou no sentido da carga para a fonte, dependendo do defasamento angular entre a tensão e a corrente harmônica de mesma ordem.

Objetivando auxiliar no desenvolvimento de uma nova metodologia, capaz de realizar a agregação dos ângulos de fase das componentes harmônicas, a qual represente de forma fidedigna o comportamento físico correspondente ao período de agregação, é de suma importância conhecer o comportamento destes ângulos ao longo do tempo. Neste contexto, surge o presente trabalho, cujo objetivo é apresentar uma análise do comportamento dos ângulos de fase das componentes harmônicas ao longo de um dia de observação. As análises serão apresentadas para cargas e instalações reais, conectadas à rede elétrica de distribuição em baixa tensão, assim como à um alimentador de distribuição de energia elétrica em média tensão. Desta forma, será possível verificar como os ângulos de fase das componentes harmônicas variam ao longo do tempo, assim como identificar uma possível existência de prevalência desses ângulos, em torno de uma região específica, para diferentes ordens harmônicas.

II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Aplicando a Transformada de Fourier, qualquer sinal distorcido pode ser decomposto em um somatório de ondas puramente senoidais, com frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental, conforme (1).

$$f(t) = c_0 + \sum_{k=1}^{\infty} c_k \text{sen}[k(2\pi f_1)t + \varphi_k] \quad (1)$$

Sendo,

- c_0 = componente contínua do sinal $f(t)$;
- k = ordem da componente espectral;
- c_k = amplitude da componente espectral de ordem k ;
- f_1 = frequência da componente fundamental;
- φ_k = ângulo de fase da componente espectral de ordem k .

Um sinal contínuo $f(t)$ amostrado a uma frequência de N amostras por ciclo, ou seja, $T_S = T/N$, onde T_S representa o período de amostragem e T o período do sinal, a TDF (Transformada Discreta de Fourier) para este sinal pode ser obtida conforme (2).

$$F(\omega_k) = \sum_{n=0}^{N-1} f(n) e^{-j(2\pi/N)nk} \quad (2)$$

Sendo,

$F(\omega_k)$ = espectro de $f(n)$;

$$\omega_k = \left(\frac{2\pi}{T_S N} \right) k = \left(\frac{2\pi}{T} \right) k.$$

A partir desta equação, obtém-se a representação, no domínio da frequência, de um sinal no domínio do tempo. O domínio da frequência apresenta os valores em amplitude e ângulo de fase do sinal original presentes para diversas frequências harmônicas. A amplitude quantifica a intensidade do harmônico, enquanto o ângulo de fase representa o deslocamento angular na determinada frequência. Todos os ângulos de fase das componentes harmônicas estão referenciados para o início da janela do sinal (instante zero) [15]. Para um melhor entendimento dos ângulos de fase das componentes harmônicas, adota-se como exemplo a forma de onda hipotética apresentada na Fig. 1, a qual pode ser representativa de um sinal de tensão ou de corrente.

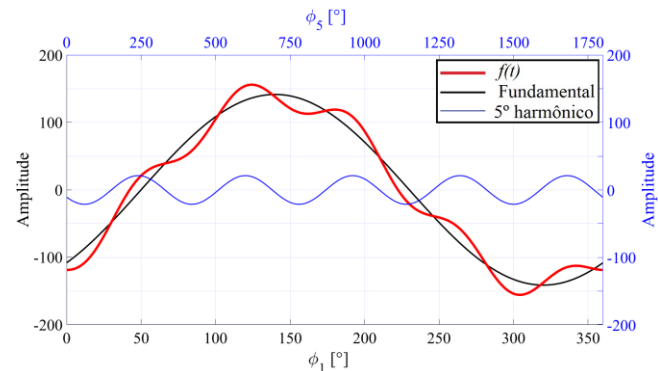


Fig. 1. Forma de onda distorcida para o exemplo da definição do ângulo de fase das componentes harmônicas [15].

A forma de onda distorcida ilustrada na Fig. 1, e definida em (3), possui uma componente fundamental, em 60 Hz, e uma componente de 5ª harmônica (300 Hz). Neste exemplo específico, os ângulos de fase da componente fundamental e da componente de 5ª harmônica são, respectivamente, -50° e -150° , ambos referenciados a partir do instante de início da janela de agregação. Todavia, como as frequências de ambas componentes são diferentes, as escalas de ângulos também serão distintas. Assim, a componente de 5ª harmônica possui uma frequência angular 5 vezes maior que a frequência angular da componente fundamental. Dessa forma, portanto, enquanto a componente de 5ª harmônica completa, por exemplo, 5 ciclos de duração ($5 \times 360^\circ$), a componente fundamental terá completado apenas um ciclo (360°) de duração.

$$f(t) = 100\sqrt{2}\text{sen}[(2\pi f)t - 50^\circ] + 15\sqrt{2}\text{sen}[5(2\pi f)t - 150^\circ] \quad (3)$$

III. CAMPANHA DE MEDIÇÃO

As análises apresentadas neste tópico foram obtidas através de medições digitais de formas de onda de tensões e correntes instantâneas em diferentes pontos de medição. As medições foram realizadas utilizando-se um analisador de qualidade da energia elétrica, modelo Marh-21 da RMS Sistemas Eletrônicos Ltda. Este equipamento registra oscilografias das formas de onda das tensões e correntes com uma taxa amostral de 64 amostras por ciclo.

Devido à baixa capacidade de armazenamento de dados deste equipamento, a alternativa encontrada para analisar o comportamento dos ângulos de fase, ao longo de 24 horas de medição, foi utilizar o método de registro das formas de onda no modo de captura. Este modo possibilita a aquisição de formas de onda de tensão e corrente com um ciclo de duração, a cada intervalo de tempo pré-determinado pelo usuário. Assim, o equipamento foi parametrizado para registrar um ciclo completo de formas de onda de tensão e corrente a cada intervalo de tempo igual a 1 (um) minuto, durante 24 horas de medição. Deste modo, foram obtidos os registros de 1.440 ciclos ao longo de 24 horas.

Ao todo foram realizadas 5 medições, sendo: 2 cargas domésticas funcionando de forma individual, 2 instalações elétricas de baixa tensão e 1 alimentador de distribuição de energia elétrica em média tensão (medição realizada dentro da subestação, na saída do alimentador). As características nominais das cargas e das instalações são as seguintes:

- Lâmpada Fluorescente Compacta (LFC), 34 W – 127 V;
- Lâmpada LED, 6 W – 127~220 V;
- Instalação tipicamente residencial, tensão nominal igual a 127/220 V, 60 Hz, alimentada com 2 fases e neutro;
- Instalação tipicamente comercial, tensão nominal igual a 127/220 V, 60 Hz, alimentada com 2 fases e neutro;
- Alimentador de média tensão trifásico, tensão nominal de 13.800 V, 60 Hz.

Após a realização das medições, durante um período de tempo de 24 horas, os dados foram processados utilizando-se um código de programação desenvolvido no *software* MATLAB. O código realiza o processamento dos cálculos da Transformada de Fourier e gera os gráficos com os resultados obtidos. Os resultados estão apresentados na forma de gráfico em coordenadas polares para os fasores oriundos da Transformada de Fourier considerando-se janelas de um ciclo de duração. Cada ponto, indicado nos gráficos de coordenadas polares, representa a extremidade dos fasores de tensão ou de corrente com origem no centro do sistema. Nos resultados apresentados para os ângulos de fase das componentes harmônicas de tensão, a referência adotada é o ângulo de fase da fundamental ($\phi_{V1} = 0^\circ$). Já no caso dos resultados apresentados para os ângulos de fase das componentes harmônicas de corrente, a referência será o ângulo de fase da componente harmônica de tensão de mesma frequência ($\phi_{Vh} = 0^\circ$).

Neste artigo serão apresentados os resultados para as ordens harmônicas mais expressivas, no caso a 3ª, 5ª e 7ª ordens harmônicas. Para retratar melhor a densidade dos pontos dentro de uma “nuvem de dados”, adotou-se a representação em “mapa

de calor”, na qual utiliza uma escala de cores para evidenciar a quantidade de pontos em uma determinada região, seguindo uma escala de cores na sequência do azul passando pelo verde e amarelo até chegar ao vermelho, onde os menores valores são na cor azul e os maiores valores são representados na cor vermelha. Além do gráfico em coordenadas polares, são apresentados os gráficos com variação dos ângulos ao longo do dia e ainda, um histograma, no qual pode-se perceber maiores prevalências durante o intervalo de tempo analisado.

IV. RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados para os ângulos de fase das componentes harmônicas de tensão e de corrente obtidos a partir das 5 medições realizadas. Em todas as análises, a tensão de alimentação é a própria tensão da rede de distribuição de energia elétrica da concessionária local. No entanto, as 5 medições foram realizadas em dias e localidades diferentes. Nas Figs. 3, 6, 9 e 12, onde são apresentados os comportamentos dos ângulos de fase, o eixo referente ao tempo corresponde ao horário diário, com início às 00:00h e término às 23:59h.

Os resultados referentes aos ângulos de fase das componentes harmônicas de tensão e de corrente para a LFC estão apresentados na Fig. 2. Tais resultados, apresentados na forma de pontos nos gráficos de coordenadas polares, indicam uma certa predominância de valores em uma determinada região do gráfico, indicando uma prevalência dos ângulos de fase. Nota-se ainda, uma tendência de redução da amplitude das tensões e das correntes harmônicas conforme a frequência aumenta. A tensão de alimentação da LFC é a própria tensão de fornecimento da concessionária local, assim, pode-se observar pelos resultados apresentados nas Figs. 2(a), 2(b) e 2(c), que ocorreram variações tanto nas amplitudes quanto nos ângulos de fase das componentes harmônicas de tensão.

Apesar de não ser o objetivo deste estudo, a análise dos ângulos de fase das componentes harmônicas possibilita a determinação do sentido do fluxo de potência harmônica ativa (carga \rightarrow fonte ou fonte \rightarrow carga), conforme pode ser verificado na Fig. 2. Esta constatação é perceptível a partir da análise do defasamento angular ($\theta_h = \phi_{Vh} - \phi_{Ih}$) entre a tensão (referência) e a corrente de mesma ordem harmônica. Para as 3 ordens harmônicas apresentadas, o fluxo de potência ocorre no sentido da carga para a fonte, conforme pode ser observado nas Figs. 2(b), 2(d) e 2(f).

Na Fig. 3 são apresentados os comportamentos dos ângulos de fase de tensão e de corrente ao longo de um dia para a carga caracterizada por uma LFC. Na mesma figura, percebe-se uma tendência de variação dos ângulos de fase das correntes de forma inversa aos ângulos de fase das componentes harmônicas de tensão, como no caso da Fig. 3(a) no período de 12:00h às 16:00h. Neste intervalo quando o ângulo da tensão reduziu o ângulo da corrente teve um incremento e a partir das 14:00h o contrário foi verificado. Por se tratar de uma carga fixa, as variações verificadas nos ângulos de fase das componentes harmônicas de correntes são atribuídas as variações ocorridas nos ângulos de fase das componentes harmônicas de tensão [16], que por sua vez, são dependentes da configuração da rede e das demais cargas conectadas neste sistema (rede elétrica da

concessionária local).

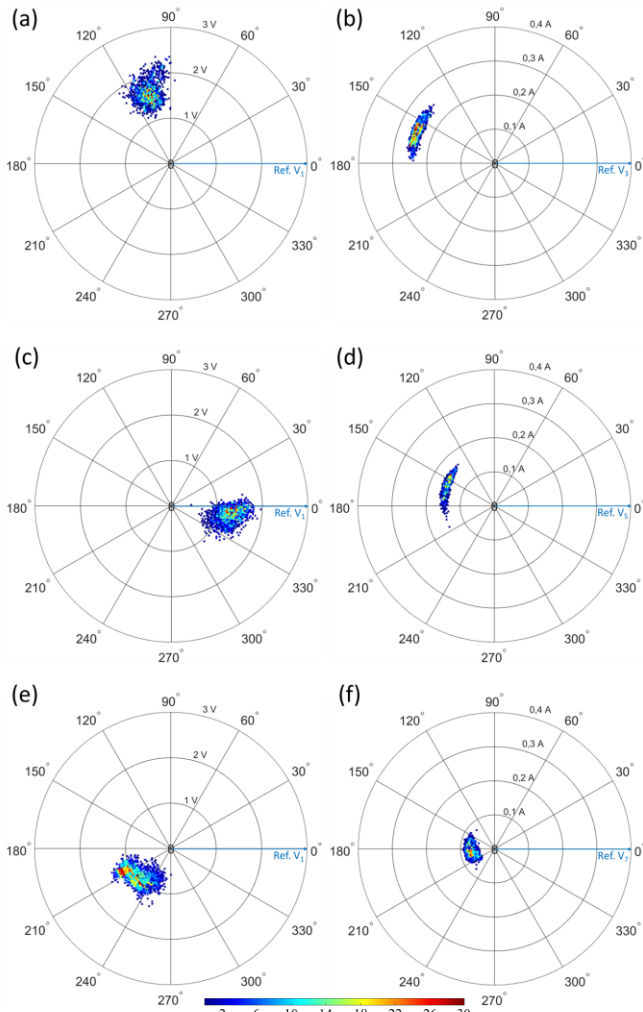


Fig. 2. Tensão e corrente harmônica de alimentação da LFC, medição de 24 horas. (a) tensão de 3ª harmônica, (b) corrente de 3ª harmônica, (c) tensão de 5ª harmônica, (d) corrente de 5ª harmônica, (e) tensão de 7ª harmônica, (f) corrente de 7ª harmônica.

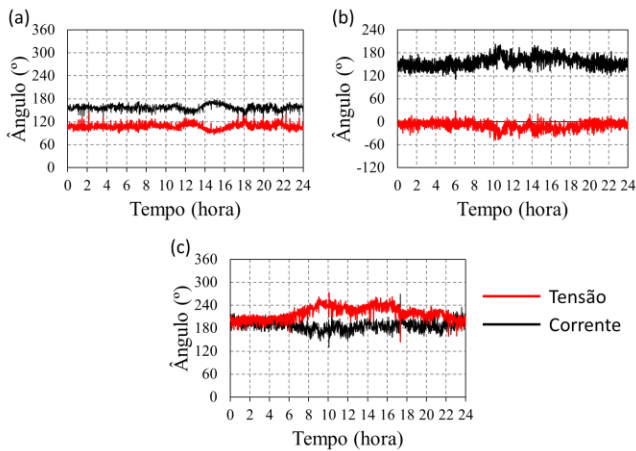


Fig. 3. Comportamento dos ângulos de fase das tensões e das correntes harmônicas de alimentação da LFC, medição de 24 horas. (a) 3ª harmônica, (b) 5ª harmônica, (c) 7ª harmônica.

Na Fig. 4 são apresentados os histogramas com os resultados de ângulos de fase ao longo de um dia de medição. Através destes gráficos é possível notar que, em todas as ordens

harmônicas, os ângulos de fase apresentam uma tendência para uma faixa de valores em específico, porém com um espalhamento nas suas adjacências. Este mesmo espalhamento é notado também na dispersão dos pontos da “nuvem de dados” apresentada na Fig. 2.

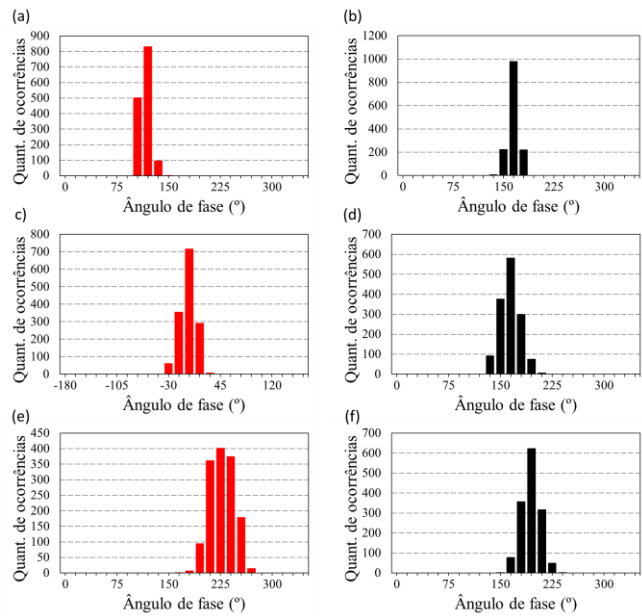


Fig. 4. Histograma dos ângulos de fase das componentes harmônicas de tensão e de corrente para a LFC, medição de 24 horas. (a) tensão de 3ª harmônica, (b) corrente de 3ª harmônica, (c) tensão de 5ª harmônica, (d) corrente de 5ª harmônica, (e) tensão de 7ª harmônica, (f) corrente de 7ª harmônica.

A próxima análise é realizada a partir da medição das tensões e das correntes de alimentação de uma carga caracterizada por uma lâmpada LED. Os resultados obtidos para este equipamento são apresentados na Fig. 5. No caso dos ângulos de fase das tensões harmônicas, tanto para a LFC quanto para a LED, os resultados se apresentaram de forma similar, apesar das medições terem ocorrido em dias distintos. No caso dos ângulos de fase das correntes harmônicas, os quais são dependentes das características intrínsecas do equipamento, a única semelhança que se pode destacar é na concentração dos dados em regiões específicas, porém com amplitudes e ângulos de fase diferentes.

A variação dos ângulos de fase das componentes harmônicas para a lâmpada LED é apresentada na Fig. 6. Mais uma vez, por se tratar de uma carga fixa, de pequena potência e funcionando de forma individual, algumas variações, ocorridas ao longo do dia no comportamento dos ângulos de fase das correntes harmônicas, são atribuídas às variações dos ângulos de fase das componentes harmônicas de tensão.

Pelos resultados apresentados nos histogramas da Fig. 7, percebe-se uma concentração maior de ocorrências em uma determinada faixa de valores, porém com uma certa quantidade de dados em suas adjacências. Para o caso específico dos ângulos de fase da tensão harmônica de 7ª ordem, ocorreu uma maior dispersão, conforme destacado na Fig. 7(e) e também na Fig. 5(e). Esta variação ocorreu de forma mais acentuada a partir das 6 horas da manhã, conforme pode ser observado na Fig. 6©.

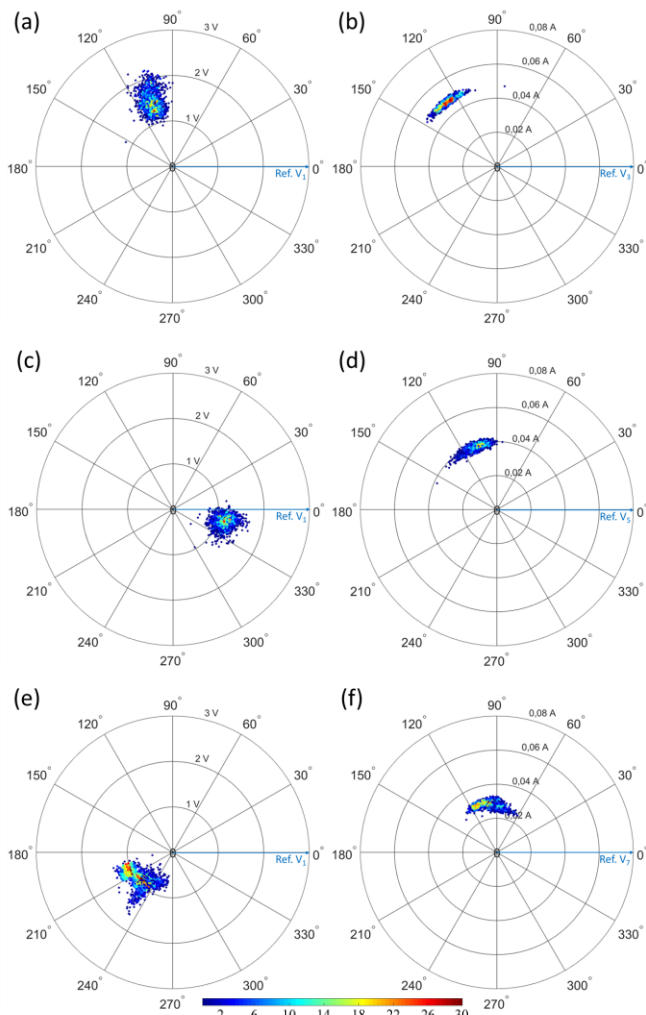


Fig. 5. Tensão e corrente harmônica de alimentação da lâmpada LED, medição de 24 horas. (a) tensão de 3ª harmônica, (b) corrente de 3ª harmônica, (c) tensão de 5ª harmônica, (d) corrente de 5ª harmônica, (e) tensão de 7ª harmônica, (f) corrente de 7ª harmônica.

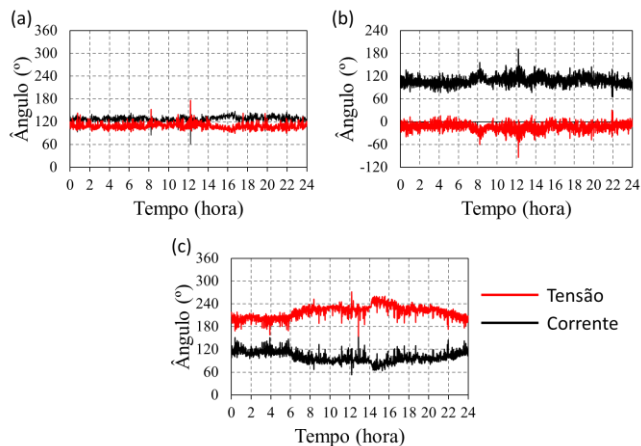


Fig. 6. Comportamento dos ângulos de fase das tensões e das correntes harmônicas de alimentação da lâmpada LED, medição de 24 horas. (a) 3ª harmônica, (b) 5ª harmônica, (c) 7ª harmônica.

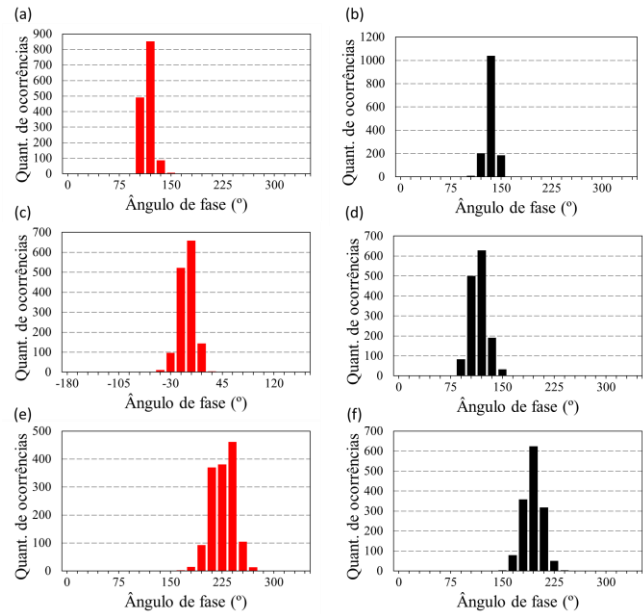


Fig. 7. Histograma dos ângulos de fase das componentes harmônicas de tensão e de corrente para lâmpadas LED. (a) tensão de 3ª harmônica, (b) corrente de 3ª harmônica, (c) tensão de 5ª harmônica, (d) corrente de 5ª harmônica, (e) tensão de 7ª harmônica, (f) corrente de 7ª harmônica.

A partir dos resultados até aqui apresentados, pode-se dizer que para cargas individuais, os ângulos de fase das componentes harmônicas de corrente tendem a sofrer poucas variações ao longo do dia. As alterações mais expressivas são atribuídas às mudanças dos ângulos de fase das componentes harmônicas de tensão, que por sua vez são dependentes do carregamento, da regulação de tensão, assim como da topologia de rede da distribuidora de energia elétrica local.

Comparando-se os resultados apresentados para as duas cargas, percebe-se que, para cada ordem harmônica, as regiões de prevalência dos ângulos de fase são diferentes. Ou seja, os ângulos de fase das correntes harmônicas de corrente são intrínsecos para cada equipamento e podem, ainda, sofrer modificações dependendo dos ângulos de fase das tensões harmônicas do sistema de alimentação.

Passando-se agora para a análise de instalações conectadas à rede de baixa tensão, é possível verificar o comportamento dos ângulos de fase das correntes harmônicas para um conjunto de equipamentos. As instalações escolhidas são do tipo residencial e comercial, uma vez que nestas, a presença de cargas do tipo não-linear é bastante comum, assim como a aleatoriedade de entrada e saída de funcionamento das mesmas.

Na Fig. 8 são apresentados os resultados obtidos para a instalação residencial. Neste ponto de medição, observou-se a ocorrência de uma maior dispersão de dados para as tensões harmônicas, quando comparado com o local de medição das cargas individuais. Para as correntes harmônicas, como era de se esperar, também é notável a maior dispersão dos pontos, visto que em cada instante podem estar em funcionamento diferentes cargas. É notório algumas concentrações de pontos localizadas em regiões distintas no plano, o que pode ser justificado pela entrada e saída das cargas em funcionamento na instalação. Neste caso, tanto as amplitudes como os ângulos de fase das correntes harmônicas possuem uma aleatoriedade de valores.

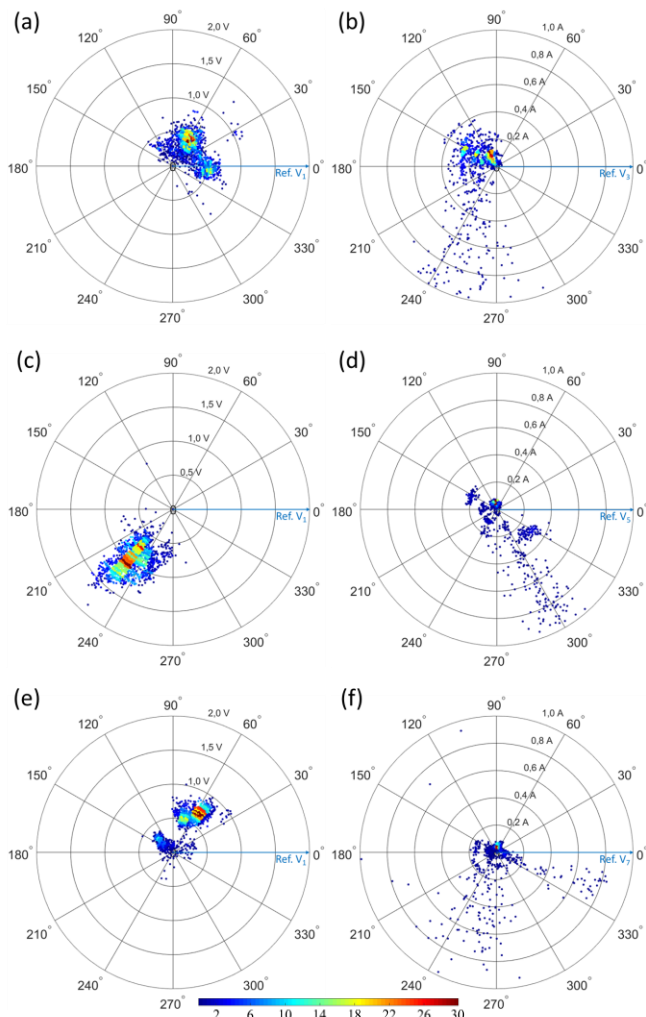


Fig. 8. Tensão e corrente harmônica de alimentação da instalação residencial, medição de 24 horas. (a) tensão de 3ª harmônica, (b) corrente de 3ª harmônica, (c) tensão de 5ª harmônica, (d) corrente de 5ª harmônica, (e) tensão de 7ª harmônica, (f) corrente de 7ª harmônica.

A Fig. 9 mostra a variação dos ângulos de fase para as componentes harmônicas de tensão e de corrente oriundos da medição na instalação residencial. Consta-se que os ângulos de fase para as tensões harmônicas se comportaram de forma mais instável ao longo do dia, quando comparados com as situações já apresentadas. O mesmo ocorre para os ângulos de fase das correntes harmônicas, que além da variação ocorrida devido as mudanças de cargas, sofreram também com as alterações nos ângulos de fase das tensões harmônicas. Apesar da aleatoriedade observada nos ângulos de fase, tanto para as tensões quanto para as correntes harmônicas, em alguns intervalos de tempo os ângulos permanecem com uma tendência de valores mais estável, como por exemplo, no período das 12:00h às 14:00h.

Pelos histogramas apresentados na Fig.10, fica evidenciada uma maior variação dos ângulos de fase neste ponto de monitoração. Mesmo com o espalhamento, em alguns determinados instantes, os ângulos de fase seguem uma certa tendência de prevalência, como pode ser visto nas barras representativas de maiores ocorrências.

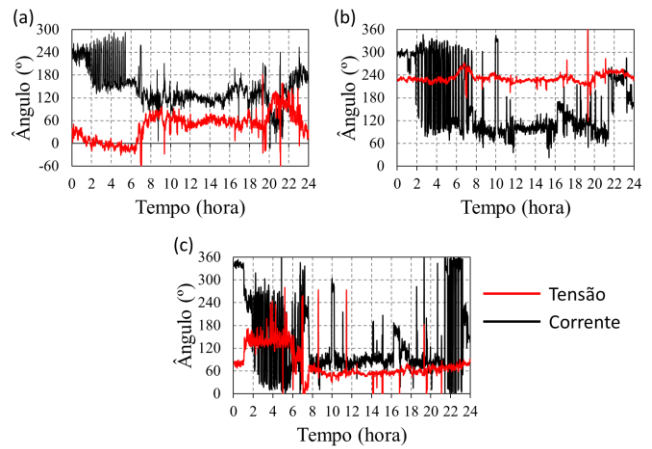


Fig. 9. Comportamento dos ângulos de fase das tensões e das correntes harmônicas de alimentação da instalação residencial, medição de 24 horas. (a) 3ª harmônica, (b) 5ª harmônica, (c) 7ª harmônica.

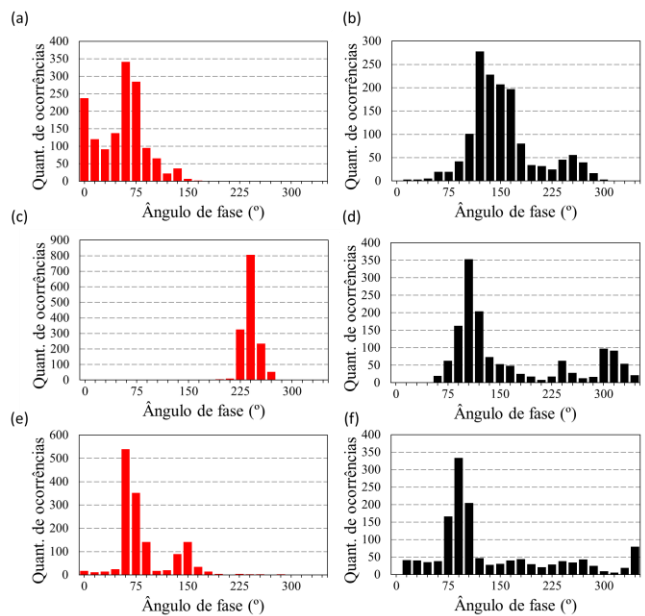


Fig. 10. Histograma dos ângulos de fase das compontes harmônicas de tensão e de corrente para a instalação residencial. (a) tensão de 3ª harmônica, (b) corrente de 3ª harmônica, (c) tensão de 5ª harmônica, (d) corrente de 5ª harmônica, (e) tensão de 7ª harmônica, (f) corrente de 7ª harmônica.

Na seqüência são apresentados os resultados obtidos para a instalação comercial. Esta instalação, em específico, possui as seguintes cargas do tipo não-linear: computador, ar condicionado, geladeira e iluminação com lâmpadas LED. A iluminação permanece, em parte, as 24 horas do dia em funcionamento, enquanto que as demais cargas permanecem energizadas apenas durante o horário comercial.

Os resultados das medições de ângulo de fase obtidas para a instalação comercial estão apresentados na Fig. 11. Neste caso, houve uma dispersão mais suave quando comparada com os resultados obtidos para instalação residencial. Tanto a tensão quanto a corrente apresentaram “nuvens de dados” mais concentradas. Considerando apenas as correntes harmônicas, por exemplo Fig. 11(b), nota-se aproximadamente 4 regiões de concentração de dados, isto ocorre porque na instalação comercial, a aleatoriedade de funcionamento das cargas é menor quando comparada com a instalação residencial.

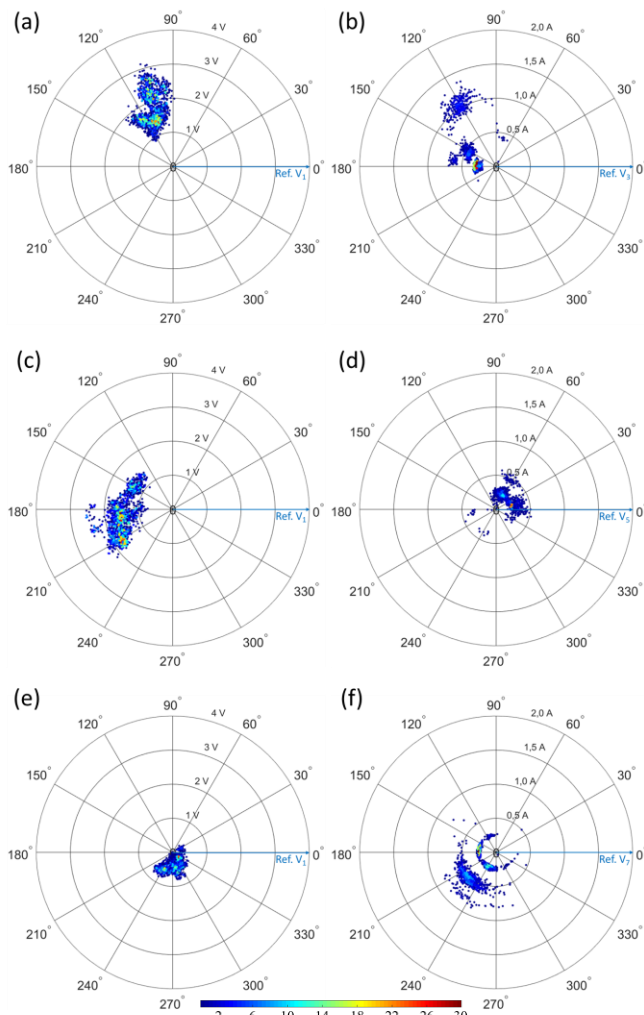


Fig. 11. Tensão e corrente harmônica de alimentação da instalação comercial, medição de 24 horas. (a) tensão de 3ª harmônica, (b) corrente de 3ª harmônica, (c) tensão de 5ª harmônica, (d) corrente de 5ª harmônica, (e) tensão de 7ª harmônica, (f) corrente de 7ª harmônica.

As variações dos ângulos de fase das tensões e das correntes harmônicas para esta instalação são apresentadas na Fig. 12. Pela análise da Fig. 12, fica evidente que, aproximadamente, entre às 8h e às 18h tem-se o período em que ocorre as mudanças de cargas. Como, geralmente, em instalações comerciais a aleatoriedade de entrada e saída de cargas é menor, o ângulo de fase para as correntes harmônicas permanece com variações mais moderadas. Fora do horário comercial, os ângulos de fase tendem a permanecer mais fixos, visto que neste período apenas parte da carga de iluminação encontra-se em funcionamento. As variações observadas fora do horário comercial são semelhantes àquelas apresentadas para a LFC e lâmpada LED, ou seja, alterações ocorridas nos ângulos de fase das correntes harmônicas são resultantes das variações ocorridas nos ângulos de fase das tensões harmônicas.

Na Fig. 13 são apresentados os histogramas referentes aos ângulos de fase para as tensões e correntes harmônicas da instalação comercial. O ângulo de fase para a tensão harmônica de 3ª ordem se apresentou com uma maior prevalência próximo de 120°, conforme pode ser visto na Fig. 13(a).

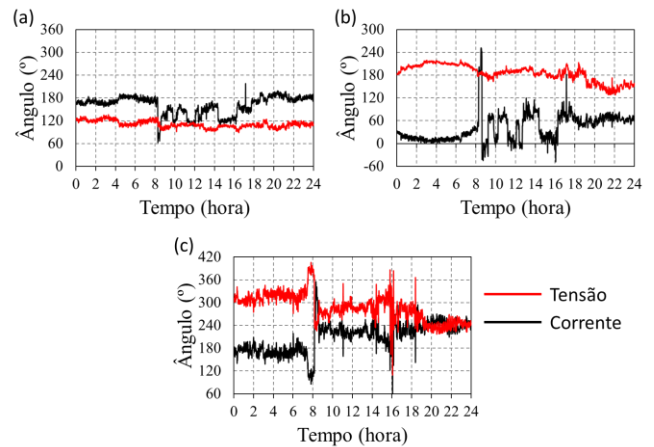


Fig. 12. Comportamento dos ângulos de fase das tensões e correntes harmônicas de alimentação da instalação comercial, medição de 24 horas. (a) 3ª harmônica, (b) 5ª harmônica, (c) 7ª harmônica.

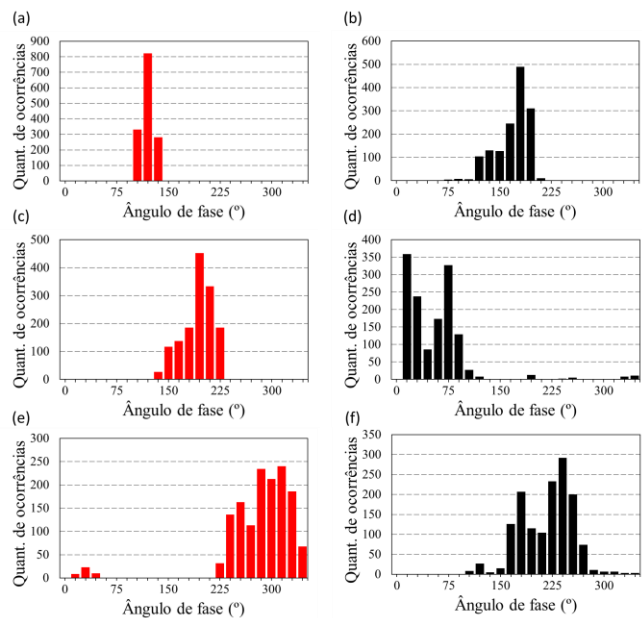


Fig. 13. Histograma dos ângulos de fase das componentes harmônicas de tensão e de corrente para a instalação comercial. (a) tensão de 3ª harmônica, (b) corrente de 3ª harmônica, (c) tensão de 5ª harmônica, (d) corrente de 5ª harmônica, (e) tensão de 7ª harmônica, (f) corrente de 7ª harmônica.

Por fim, são apresentados os resultados obtidos para medição em um alimentador de média tensão. A referida medição foi realizada com auxílio de transformadores de potencial (TP) e transformadores de corrente (TC) já instalados na subestação da distribuidora de energia elétrica local. Por se tratar de um alimentador em média tensão, onde existem vários transformadores de distribuição (abaixadores de tensão) com conexão do tipo delta-estrela aterrada (DYg), a amplitude das correntes de terceira harmônica, oriundas das cargas situadas à jusante desses transformadores, possuem baixas amplitudes, uma vez que as componentes de sequência zero são confinadas na ligação em delta desses equipamentos. Ressalta-se que apenas uma pequena parcela de correntes de terceira harmônica, de sequência positiva ou negativa, chega ao lado primário do transformador em função do desequilíbrio existente nas cargas conectadas no lado de baixa tensão desses transformadores. Assim sendo, por possuírem amplitudes muito pequenas, os

resultados de ângulos de fase obtidos para a 3ª harmônica não serão aqui considerados.

Na Fig. 14 são apresentados os resultados das tensões e das correntes harmônicas de 5ª e 7ª ordens harmônicas obtidas através de medição para o alimentador de distribuição em média tensão. Os resultados demonstram que os ângulos de fase das tensões harmônicas deste alimentador se mantiveram mais concentrados em duas “nuvens de dados” distintas, conforme pode ser visto nas Figs. 14(a) e 14(c).

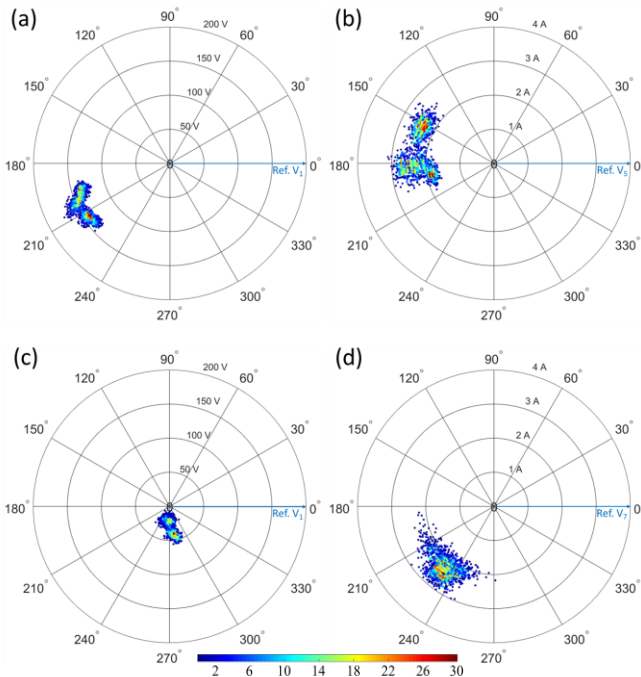


Fig. 14. Tensão e corrente harmônica do alimentador de distribuição em média tensão, medição de 24 horas. (a) tensão de 5ª harmônica, (b) corrente de 5ª harmônica, (c) tensão de 7ª harmônica, (d) corrente de 7ª harmônica.

O comportamento dos ângulos de fase das tensões e das correntes harmônicas de 5ª e 7ª ordens harmônicas, ao longo do dia de monitoração, estão apresentados na Fig. 15, onde pode ser verificado que os ângulos de fase das componentes harmônicas se mantiveram menos dispersos quando comparados aos resultados obtidos para as instalações residenciais e comerciais. Isso se deve ao fato de que no barramento de média tensão da subestação, a tensão permanece confinada em uma pequena faixa de variação devido tanto à regulação de tensão existente quanto ao maior nível de curto-circuito nesse ponto do sistema, fazendo com que a mesma se apresente de uma forma mais comportada ao longo do dia, diferentemente do que ocorre em um ponto do alimentador mais distante da subestação.

Finalmente, na Fig. 16 são apresentados os histogramas obtidos para os ângulos de fase das componentes harmônicas, medidas no alimentador de média tensão. Na mesma figura, nota-se uma maior prevalência dos ângulos de fase para a tensão de 5ª ordem, aproximadamente 220°, e para a corrente de 7ª ordem harmônica, por volta de 230°.

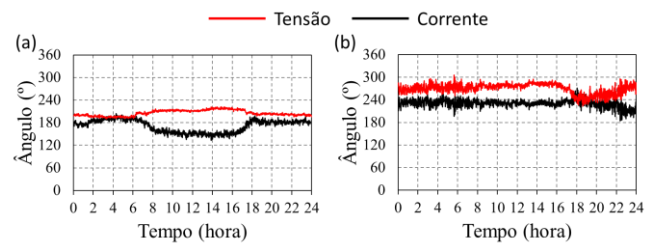


Fig. 15. Comportamento dos ângulos de fase das tensões e correntes harmônicas do alimentador de distribuição em média tensão, medição de 24 horas. (a) 5ª harmônica, (b) 7ª harmônica.

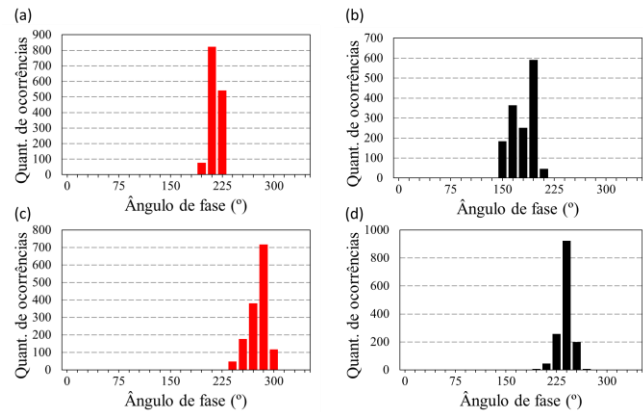


Fig. 16. Histograma dos ângulos de fase das componentes harmônicas de tensão e de corrente para o alimentador de distribuição em média tensão. (a) tensão de 5ª harmônica, (b) corrente de 5ª harmônica, (c) tensão de 7ª harmônica e (d) corrente de 7ª harmônica.

V. CONCLUSÃO

Este artigo buscou analisar o comportamento dos ângulos de fase das componentes harmônicas de tensão e de corrente para algumas condições específicas, contribuindo, assim, para a elaboração de uma nova metodologia para agregação dos ângulos de fase dessas componentes.

Pelos resultados apresentados, os ângulos de fase para as tensões harmônicas tendem a se comportar de forma mais estável ao longo do dia, salvo algumas variações dependendo do horário. A exceção verificada pode ser associada às medições realizadas nas instalações residenciais e comerciais. Já no caso dos ângulos de fase das componentes harmônicas de corrente, os mesmos se apresentaram com valores característicos de cada equipamento. Nas análises considerando-se as medições de cargas individuais, as variações verificadas para os ângulos de fase das correntes harmônicas estiveram associadas com as variações ocorridas nos ângulos das tensões harmônicas. Adicionalmente, para o caso das instalações conectadas na rede elétrica de baixa tensão, verificou-se uma maior variação dos ângulos de fase para as correntes harmônicas, devido as constantes mudanças de cargas em funcionamento dentro dessas instalações.

Finalmente, em função do comportamento verificado para os ângulos de fase das componentes harmônicas, o presente trabalho mostrou que para algumas aplicações específicas, a exemplo de estudos de fluxo harmônico visando a quantificação das perdas técnicas na distribuição, faz-se necessária a consideração desses ângulos para uma maior assertividade dos estudos a serem realizados. Nesse sentido, portanto, torna-se imprescindível o desenvolvimento de uma nova metodologia de

agregação temporal dos ângulos de fase das componentes harmônicas, a exemplo do intervalo de 10 minutos utilizado pela IEC 61000-4-30 [7] para agregação das amplitudes dessas mesmas componentes.

REFERÊNCIAS

- [1] R. C. Dugan, M. F. McGranagh, S. Santoso e H. W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, 2nd ed. New York, 2003.
- [2] M. H. J. Bollen, *Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions*, New York: IEEE, 2000.
- [3] A. E. Emanuel, *Power Definitions and the Physical Mechanism of Power Flow*. John Wiley & Sons Ltd, 2010.
- [4] M. H. Bollen, *The Smart Grid: Adapting the Power System to New Challenges, Synthesis Lectures on Power Electronics*, 2011.
- [5] O. H. Ando Junior, R. C. Leborgne e A. S. Bretas, "Methodology for Calculation and Management for Indicators of Power Quality", *IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, no 7, Julho de 2015, DOI: 10.1109/TLA.2015.7273780.
- [6] Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-7: Testing and measurement techniques - General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto, IEC 61000-4-7:2002, Geneva, Switzerland, 2002.
- [7] Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods, IEC 61000-4-30:2008, Geneva, Switzerland: IEC, 2008.
- [8] Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, 2018.
- [9] W. Xu, "Status and Future Directions of Power System Harmonic Analysis", *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Denver, 2004, DOI: 10.1109/PES.2004.1372917.
- [10] F. C. d. I. Rosa, *Harmonics and Power Systems*. Taylor e Francis, 2006.
- [11] W. N. Sepulchro, L. F. Encarnação e M. Brunoro, "Harmonic Distortion and Power Flow State Estimation for Distribution Systems Based on Evolutionary Strategies", *IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, no 9, Setembro de 2015, DOI: 10.1109/TLA.2015.7350060.
- [12] J. Meyer, A. M. Blanco, M. Domagk e P. Schegner, "Assessment of Prevailing Harmonic Current Emission in Public Low-Voltage Networks", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 32, 2017, DOI: 10.1109/TPWRD.2016.2558187.
- [13] V. E. Wagner, J. C. Balda, T. M. Barnes, A. E. Emanuel e R. J. Ferraro, "Effects of Harmonics on Equipment" *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol 8, no 2, Abril 1993, DOI: 10.1109/61.216874.
- [14] A. M. Blanco, J. Meyer e P. Schegner, "Calculation of phase angle diversity for time-varying harmonic currents from grid measurement", *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'14)*, Cordoba, Espanha, 2014, DOI: 10.24084/repqj12.490.
- [15] A. M. Blanco, R. Stiegler, J. Meyer e M. Schwenke, "Implementation of harmonic phase angle measurement for power quality instruments", *IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS)*, Aachen, Alemanha, 2016, DOI: 10.1109/AMPS.2016.7602811.
- [16] A. M. Blanco, J. Meyer e P. Schegner, "Aggregation characteristic of low-order harmonic currents in residential low-voltage networks", in *IEEE Manchester PowerTech*, Manchester, United Kingdom, 2017, DOI: 10.1109/PTC.2017.7981194.

Uberlândia. Areas of interest: power quality, measurement protocols and harmonic power flow.



José Rubens Macedo Junior, (M'2001-SM'2007), was born in Uberlândia, Brazil, in 1972. He concluded his B.Sc and M.Sc in Electrical Engineering in 1997 and 2002, respectively, at the Federal University of Uberlândia, Brazil. In 2009 he concluded his Ph.D. at the Federal University of Espírito Santo, Brazil. He was the president of the Brazilian Power Quality Society from 2011 to 2013 and since 2010 he is professor at Federal University of Uberlândia, where he works in a research group involved with distribution systems and power quality issues.



Guilherme Leal Xavier, was born in Serra do Salitre, Brazil, in 1983. He concluded his B.Sc. and M.Sc. in Electrical Engineering in 2007 and 2012, respectively, at the Federal University of Uberlândia (UFU). He is assistant professor at the Federal University of Viçosa (UFV). Currently, he is a Ph.D. student at Federal University of