



## Capítulo IV

# Metodologia para agregação dos ângulos de fase das componentes harmônicas em medidores de qualidade da energia elétrica

### INTRODUÇÃO

No âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica, regulamentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), a Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e o Grupo Energisa firmaram acordo para elaboração de uma nova metodologia visando a quantificação das perdas técnicas nos sistemas de distribuição, abordando aspectos físicos e elétricos não contemplados pela regulamentação vigente sobre o assunto. Nesse sentido, as perdas técnicas da distribuição foram também quantificadas considerando-se a circulação de correntes harmônicas nas redes de distribuição. Porém, para esse propósito, tornava-se imperativa a modelagem (através da realização de medições) das cargas da distribuição em termos de circulação de correntes com frequências harmônicas, de forma a ser possível a condução de estudos de fluxo harmônico contemplando da forma mais fiel possível o comportamento das cargas harmônicas presentes no sistema. Dessa forma, o conhecimento do comportamento dos ângulos de fase das componentes harmônicas, associadas às cargas da distribuição, se mostrou um aspecto chave para o sucesso da pesquisa.

Todavia, rapidamente constatou-se que nenhum dos medidores de parâmetros de qualidade da energia elétrica disponíveis no mercado dispunha de uma metodologia para apresentação desses ângulos de fase de forma agregada em cada intervalo de medição de 10 minutos. Como consequência imediata dessa dificuldade técnica, os pesquisadores da UFU, de forma paralela ao escopo original do projeto, desenvolveram uma metodologia para agregação temporal dos ângulos de fase das componentes harmônicas, a qual, através do apoio por parte de um fabricante de medidores (Sigmasys Engenharia), foi devidamente implementada em um medidor disponível comercialmente. Como resultado da metodologia, chegou-se ao desenvolvimento de técnicas mais aprimoradas (e realistas) para quantificação das perdas técnicas na

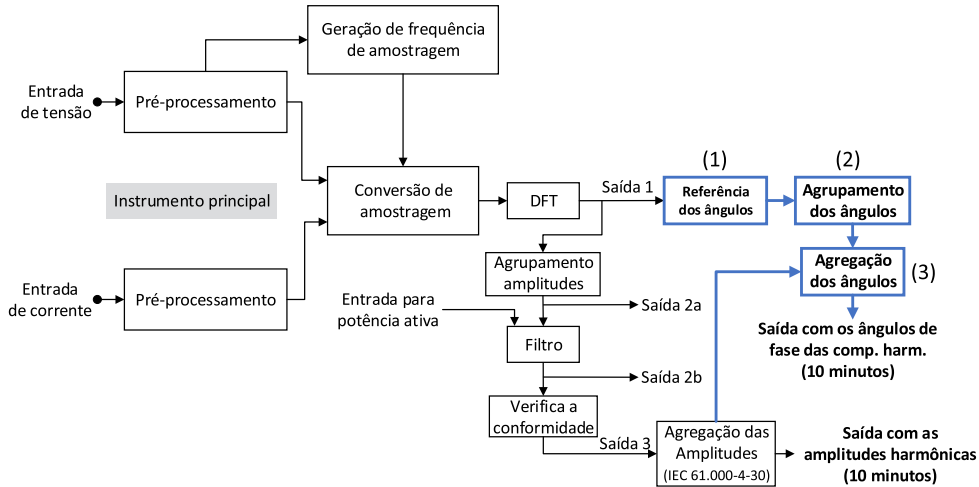
distribuição. Como resultado do projeto, foi possível demonstrar de forma inequívoca que a circulação de correntes harmônicas nas redes de distribuição, em todo o país, representa um incremento de centenas de milhões de reais no custo das perdas técnicas da distribuição. Como consequência imediata dos resultados obtidos, teve início um novo projeto, dessa vez em parceria com a Equatorial Maranhão Distribuidora de Energia Elétrica, no qual está sendo realizada a maior campanha de medição já realizada no país visando a modelagem das cargas harmônicas da distribuição para estudos de quantificação das perdas técnicas.

Diante do exposto, este artigo tem como objetivo apresentar o detalhamento e os resultados obtidos no desenvolvimento da metodologia de agregação temporal dos ângulos de fase das componentes harmônicas.

### DESENVOLVIMENTO ANALÍTICO DA METODOLOGIA PARA AGREGAÇÃO DOS ÂNGULOS DE FASE DAS COMPONENTES HARMÔNICAS

Praticamente todos os medidores de parâmetros da Qualidade da Energia Elétrica, disponíveis comercialmente, baseiam-se em protocolos e procedimentos estabelecidos nas normas IEC 61.000-4-7 e IEC 61.000-4-30. Essas normas, por sua vez, abordam apenas a medição das amplitudes das tensões e das correntes harmônicas, sem nenhuma consideração quanto aos ângulos de fase das componentes harmônicas das tensões e/ou das correntes harmônicas.

Esta seção tem por objetivo apresentar uma metodologia para realizar a agregação temporal dos ângulos de fase das componentes harmônicas de tensão e de corrente, a qual se encontra embasada no fluxo de energia harmônica dentro do intervalo de tempo da medição. Isto representa que, calculando o fluxo de potência através das amplitudes agregadas de tensões e correntes



**Figura 1 - Estrutura geral para instrumentos de medição, adaptado da IEC 61000-4-7, considerando a agregação dos ângulos de fase das componentes harmônicas.**

harmônicas, conforme protocolos apresentados nas normas da IEC (*International Electrotechnical Commission*), juntamente com os ângulos de fase também agregados, conforme metodologia aqui apresentada, resultará no fluxo de potência real visto pelo sistema elétrico no ponto de medição.

Para que um medidor realize a agregação dos ângulos de fase das componentes harmônicas é necessário fazer uma adaptação na estrutura original apresentada na norma IEC 61.000-4-7. De

forma sucinta, adicionou-se 3 novos blocos à estrutura geral para instrumentos de medição apresentada na IEC 61.000-4-7. Estes 3 novos blocos são referentes às etapas de: (1) definição da referência, (2) agrupamento e (3) agregação dos ângulos de fase das componentes harmônicas. Na Figura 1 é apresentada a nova estrutura para instrumentos de medição com as adaptações necessárias para realizar as agregações dos ângulos de fase das componentes harmônicas (etapas destacadas).

## EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Instalar os produtos certos fazem uma grande diferença no seu empreendimento. Por isso, a Romagnole oferece um portfólio de transformadores com eficiência energética e tecnologia avançada, proporcionando soluções inteligentes e customizadas para cumprirem os requisitos exigidos



TRANSFORMADORES INDUSTRIAIS • TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO • TRANSFORMADORES A SECO • TRANSFORMADORES PEDESTAIS • TRANSFORMADORES SUBMERSÍVEIS



O primeiro bloco inserido, referência dos ângulos, tem como entrada os dados de saída da Transformada Discreta de Fourier (TDF), sendo que, para cada intervalo de 12 ciclos, tem-se os valores referentes às amplitudes e aos ângulos de fase para cada componente espectral de ordem  $h$ . Estes valores estão disponibilizados na saída 1 da Figura 1 e podem ser representados na forma fasorial de acordo com (1) e (2), respectivamente para tensão e corrente harmônicas.

$$\dot{V}_h = V_h \angle \phi_{Vh} \quad (1)$$

$$\dot{I}_h = I_h \angle \phi_{Ih} \quad (2)$$

Em que:

$V_h$  = amplitude das tensões harmônicas de ordem  $h$  resultantes da janela de 12 ciclos;

$\phi_{Vh}$  = ângulo de fase das tensões harmônicas de ordem  $h$  resultantes da janela de 12 ciclos;

$I_h$  = amplitude das correntes harmônicas de ordem  $h$  resultantes da janela de 12 ciclos;

$\phi_{Ih}$  = ângulo de fase das correntes harmônicas de ordem  $h$  resultantes da janela de 12 ciclos;

$h$  = ordem harmônica da componente espectral.

Para determinação dos ângulos de fase das componentes harmônicas é necessária a adoção de uma referência para os ângulos. O objetivo desta referência é obter uma melhor interpretação dos resultados e, assim, evitar imprecisões devido às variações da frequência do sistema. A recomendação para referência é manter o ângulo de fase da tensão fundamental na fase A igual a zero em cada janela da TDF de 12 ciclos. Fazendo isto, a referência estará sendo ressinchronizada a cada intervalo de 12 ciclos. Desta forma, para cada intervalo de tempo de 12 ciclos, os ângulos provenientes da Saída 1 (Figura 1), tanto das tensões quanto das correntes harmônicas, devem ser ajustados de forma que o ângulo de fase da tensão fundamental da fase A seja igual a zero.

Cada componente harmônica possui diferentes escalas de tempo para os ângulos de fase, ou seja, cada fasor está a uma velocidade angular proporcional a  $h$  vezes a frequência fundamental. Desta forma, ao considerar uma mudança na referência dos ângulos de fase da frequência fundamental ( $0^\circ$ ), os ângulos de fase, tanto para as tensões quanto para as correntes harmônicas, devem ser ajustados de acordo com sua respectiva frequência, conforme apresentado em (3) e (4).

$$\phi'_{Vh} = \phi_{Vh} - (h \times \phi_{V1}) \quad (3)$$

$$\phi'_{Ih} = \phi_{Ih} - (h \times \phi_{V1}) \quad (4)$$

Em que:

$\phi'_{Vh}$  = ângulo de fase das componentes harmônicas de tensão corrigido de acordo com a referência adotada;

$\phi'_{Ih}$  = ângulo de fase das componentes harmônicas de corrente corrigido de acordo com a referência adotada;

$\phi_{V1}$  = ângulo de fase da tensão fundamental da fase A de cada janela de 12 ciclos.

Os cálculos realizados no segundo bloco, agrupamento dos ângulos de fase, seguem em duas vias distintas, sendo uma para determinação dos ângulos de fase das componentes harmônicas de tensão e uma outra para a corrente. O agrupamento realizado para os ângulos deve ser realizado adotando a criação dos grupos ou subgrupos harmônicos e inter-harmônicos, assim como já é recomendado para as amplitudes. O agrupamento para as amplitudes permanece conforme recomendações da IEC 61.000-4-30. Para os ângulos de fase das componentes harmônicas de tensão, o agrupamento deve ser realizado através da soma fasorial, conforme apresentado em (5) e (6), respectivamente para o grupo e subgrupo. Os ângulos de fase das componentes harmônicas de tensão, para os grupos ou subgrupos, são os argumentos dos resultados das somas fasoriais.

$$\dot{V}_{g,n} = \frac{\dot{V}_{h_{k-6}}}{2} + \sum_{i=-5}^5 \dot{V}_{h_{k+i}} + \frac{\dot{V}_{h_{k+6}}}{2} \quad (5)$$

$$\dot{V}_{sg,n} = \sum_{i=-1}^1 \dot{V}_{h_{k+i}} \quad (6)$$

Em que:

$\dot{V}_{g,n}$  = grupo das componentes harmônicas associado a ordem harmônica igual a  $n$ ;

$\dot{V}_{sg,n}$  = subgrupo das componentes harmônicas associado a ordem harmônica igual a  $n$ ;

$n$  = ordem harmônica referente ao agrupamento das componentes harmônicas (resolução espectral igual a 60 Hz).

Por outro lado, os agrupamentos dos ângulos de fase das componentes harmônicas de corrente são realizados utilizando as energias harmônicas resultantes de cada janela de 12 ciclos, as quais são determinadas através das potências harmônicas ativa e reativa definidas conforme (7) e (8), respectivamente.

$$P_h = V_h I_h \cos(\phi'_{Vh} - \phi'_{Ih}) \quad (7)$$

$$Q_h = V_h I_h \text{sen}(\phi'_{Vh} - \phi'_{Ih}) \quad (8)$$

Em que:

$P_h$  = potência harmônica ativa de ordem  $h$  da janela de 12 ciclos;

$Q_h$  = potência harmônica reativa de ordem  $h$  da janela de 12 ciclos.

As energias harmônicas resultantes de cada janela de 12 ciclos, ou seja, considerando o intervalo de tempo, corresponde a 0,2 segundos, são definidas de acordo com (9) e (10).



$$E_{A,h} = \sum_{i=1}^N (P_{h(i)} \Delta t_1) \quad (9)$$

$$E_{R,h} = \sum_{i=1}^N (Q_{h(i)} \Delta t_1) \quad (10)$$

Em que:

$E_{A,h}$  = energia harmônica ativa de ordem h referente a janela de 12 ciclos;

$E_{R,h}$  = energia harmônica reativa de ordem h referente a janela de 12 ciclos;

$\Delta t_1$  = intervalo de tempo referente a janela de 12 ciclos (0,2 segundos);

Na seqüência, o agrupamento prossegue a partir do somatório das energias harmônicas, conforme (11) e (12) para formação dos grupos e (13) e (14) para os subgrupos.

$$E_{A_{g,n}} = \frac{E_{A,h_{k-6}}}{2} + \sum_{i=-5}^5 E_{A,h_{k+i}} + \frac{E_{A,h_{k+6}}}{2} \quad (11)$$

$$E_{R_{g,n}} = \frac{E_{R,h_{k-6}}}{2} + \sum_{i=-5}^5 E_{R,h_{k+i}} + \frac{E_{R,h_{k+6}}}{2} \quad (12)$$

$$E_{A_{sg,n}} = \sum_{i=-1}^1 E_{A,h_{k+i}} \quad (13)$$

$$E_{R_{sg,n}} = \sum_{i=-1}^1 E_{R,h_{k+i}} \quad (14)$$

Em que:

$E_{A_{g,n}}$  = grupo da energia harmônica ativa de ordem n referente a janela de 12 ciclos;

$E_{R_{g,n}}$  = grupo da energia harmônica reativa de ordem n referente a janela de 12 ciclos;

$E_{A_{sg,n}}$  = subgrupo da energia harmônica ativa de ordem n referente a janela de 12 ciclos;

$E_{R_{sg,n}}$  = subgrupo da energia harmônica reativa de ordem n referente a janela de 12 ciclos;

Uma vez realizado o agrupamento, passa-se então para o terceiro bloco referente às agregações dos ângulos de fase das componentes harmônicas de tensão e de corrente. Assim como no caso do agrupamento, os cálculos necessários para realizar as agregações também continuam de forma distinta.

Os ângulos de fase agregados para as tensões harmônicas são determinados pelos ângulos resultantes das somas fasoriais das tensões harmônicas, após a realização dos agrupamentos, conforme apresentado em (15).

$$\phi_{V_{ag,n}} = \arg \left( \sum_{i=1}^N V_{g,n(i)} \right) \quad (15)$$

Em que:

$\phi_{V_{ag,n}}$  = ângulo de fase das componentes harmônicas de tensão agregado;

$V_{g,n}$  = fasor de tensão harmônica após a realização do agrupamento.

Por outro lado, tratando-se das correntes harmônicas, a agregação dos ângulos de fase tem como fundamento o fluxo de energia harmônica resultante durante o intervalo de tempo definido para agregação (180 ciclos, 10 minutos ou 2 horas). Assim, os fluxos das energias resultantes são definidos pelo somatório das energias harmônicas ativa e reativa referentes às janelas de 12 ciclos agrupadas, durante o intervalo de tempo estabelecido para a agregação, conforme (16) e (17), respectivamente.

$$E_{ag A,n} = \sum_{i=1}^N (E_{A_{g,n(i)}}) \quad (16)$$

$$E_{ag R,n} = \sum_{i=1}^N (E_{R_{g,n(i)}}) \quad (17)$$

Em que:

$E_{ag A,n}$  = energia harmônica ativa agregada de ordem n;

$E_{ag R,n}$  = energia harmônica reativa agregada de ordem n;

Os ângulos de fase agregados para cada componente harmônica de corrente são definidos conforme (18), onde o sinal referente ao ângulo de defasamento entre a tensão e a corrente harmônicas ( $\theta_{ag,n}$ ) é definido de acordo com a energia harmônica reativa (19).

$$\phi_{I_{ag,n}} \quad \phi_{V_{ag,n}} - \theta_{ag,n} \quad (18)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_{ag,n} = \cos^{-1} \left( \frac{\left( \frac{E_{ag A,n}}{\Delta t_2} \right)}{V_{ag,n} I_{ag,n}} \right), \text{ se } E_{ag R,n} \geq 0 \\ \theta_{ag,n} = -\cos^{-1} \left( \frac{\left( \frac{E_{ag A,n}}{\Delta t_2} \right)}{V_{ag,n} I_{ag,n}} \right), \text{ se } E_{ag R,n} < 0 \end{array} \right. \quad (19)$$

Em que:

$\phi_{I_{ag,n}}$  = ângulo de fase das componentes harmônicas de corrente agregado;

$\phi_{V_{ag,n}}$  = ângulo de fase das componentes harmônicas de tensão agregado;

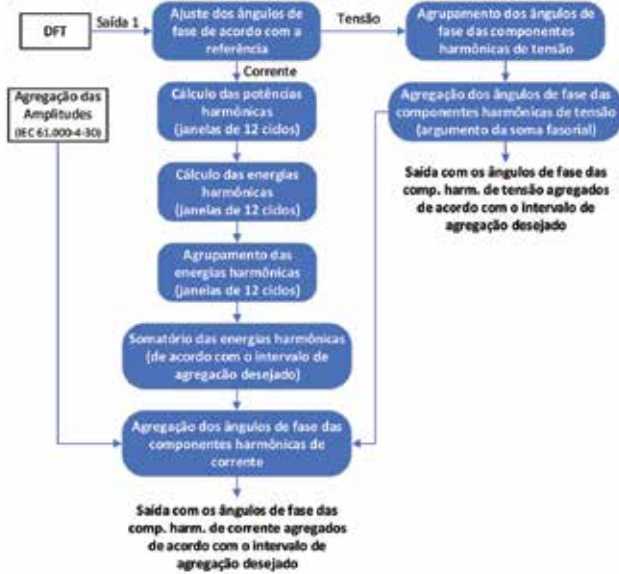
$\theta_{ag,n}$  = defasamento angular entre a tensão e a corrente harmônica agregado;

$V_{ag,n}$  = amplitude eficaz da tensão harmônica agregada;

$I_{ag,n}$  = amplitude eficaz da corrente harmônica agregada;

$\Delta t_2$  = intervalo de tempo referente a agregação temporal, onde os valores padronizados são: 180 ciclos, 10 minutos e 2 horas.

Para melhor interpretação da metodologia proposta, é apresentado na Figura 2 um fluxograma com a seqüência de etapas apresentadas para realização da agregação temporal dos ângulos de fase das componentes harmônicas de tensão e de corrente.



**Figura 2 - Fluxograma para determinação dos ângulos de fase das tensões e das correntes harmônicas.**

## IMPLEMENTAÇÃO DA METODOLOGIA DESENVOLVIDA EM UM MEDIDOR DE PARÂMETROS DE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

Após demonstrar todo o desenvolvimento analítico da metodologia para realização das agregações temporais dos ângulos de fase das componentes harmônicas, apresenta-se a implementação desta técnica em um medidor comercial. Por meio do apoio oferecido pelo fabricante de medidores Sigmasys Engenharia, a metodologia desenvolvida pela UFU foi implementada em um de seus medidores de parâmetros de qualidade da energia elétrica. Na Figura 3 é apresentado o medidor juntamente com seus acessórios.



**Figura 3 - Analisador de Qualidade da Energia Elétrica contemplando a metodologia UFU de agregação de ângulos de fase de componentes harmônicas.**

### Testes de desempenho do medidor em laboratório

Para avaliar a performance do medidor, principalmente do ponto de vista da metodologia implementada, procedeu-se,

inicialmente, com uma série de testes em ambiente controlado. Para realização dos testes utilizou-se uma fonte programável (tensão e corrente) modelo CMC 256 plus fabricada pela Omicron Electronics Corp, que possui 4 canais de tensão (4 x 0 ... 300 V) e 6 canais de corrente (6 x 0 ... 12,5 A), ambos com precisão garantida de erro menor que 0,04%. Em todos os testes realizados adotou-se a conexão trifásica da fonte programável.

Utilizando esta fonte controlada, o usuário tem a liberdade de programar a forma de onda desejável para a tensão e para a corrente, ambas de forma independente, possibilitando assim, simular diferentes fontes de tensões e diferentes tipologias de cargas não-lineares. As grandezas programáveis são as amplitudes e os ângulos de fase para cada ordem harmônica, podendo ainda, variar essas grandezas ao longo do período selecionado para o teste.

Na Figura 4 é apresentada a estrutura laboratorial utilizada para a realização dos testes, na qual o medidor sob avaliação é conectado à fonte programável através das ponteiros de tensão (medição direta) e dos transformadores de corrente (TC) do tipo split com corrente primária de até 100 A.



**Figura 4 - Estrutura laboratorial de testes do medidor.**

Para avaliar o desempenho do medidor, no que diz respeito às agregações de 10 minutos dos ângulos de fase das componentes harmônicas de tensão e de corrente, procedeu-se com dois testes em laboratório (Teste I e Teste II). No Teste I manteve-se as grandezas referentes às amplitudes e aos ângulos de fase constantes durante o intervalo de 10 minutos de medição. Para o Teste II, considerou-se variações nas amplitudes e nos ângulos de fase durante o intervalo de 10 minutos de medição. Foram considerados dois conjuntos de dados (Intervalo A e Intervalo B), sendo que a cada período de 1 minuto a fonte fornecia um intervalo. Desta forma, ao longo dos 10 minutos de medição, o sinal referente ao intervalo A permaneceu durante 5



minutos e o mesmo aconteceu para o intervalo B, porém os mesmos foram se alternando a cada minuto.

O primeiro teste tem como objetivo avaliar a exatidão do medidor, verificando se as agregações dos ângulos de fase estão sendo realizadas em conformidade com a metodologia apresentada. O segundo teste tem como objetivo avaliar a agregação dos ângulos de fase para sinais variáveis dentro da janela de agregação de 10 minutos, assim como é comumente verificado em instalações reais.

Nas Tabelas I e II são apresentados os desvios de medição para os ângulos de fase das componentes harmônicas de tensão e de corrente verificados nos Teste I e II respectivamente. A coluna denominada como “Padrão” é referente às grandezas programadas na fonte de potência, enquanto que na coluna denominada “Medido” estão apresentados os valores fornecidos pelo medidor em teste. Para avaliar o desempenho do medidor, em cada ordem harmônica, tem-se a coluna “Desvio”, a qual apresenta a diferença angular entre os ângulos de fase registrados em relação àqueles denominados como referência.

**TABELA 1 – TESTE I: ÂNGULOS DE FASES DAS COMPONENTES HARMÔNICAS DE TENSÃO E DE CORRENTE FIXAS DURANTE OS 10 MINUTOS DE MEDIÇÃO**

Grandeza	TENSÃO			CORRENTE		
	Padrão	Medido	Desvio	Padrão	Medido	Desvio
$\phi 2$	180,00°	180,03°	0,03°	30,00°	30,28°	0,28°
$\phi 3$	330,00°	330,00°	0,00°	160,00°	160,32°	0,32°
$\phi 4$	250,00°	250,06°	0,06°	250,00°	250,43°	0,43°
$\phi 5$	270,00°	269,99°	-0,01°	300,00°	300,39°	0,39°
$\phi 6$	30,00°	30,01°	0,01°	230,00°	230,53°	0,53°
$\phi 7$	180,00°	179,99°	-0,01°	0,00°	0,56°	0,56°
$\phi 8$	90,00°	89,90°	-0,10°	330,00°	330,33°	0,33°
$\phi 9$	130,00°	130,01°	0,01°	45,00°	45,67°	0,67°
$\phi 10$	0,00°	0,15°	0,15°	100,00°	100,76°	0,76°
$\phi 11$	50,00°	50,01°	0,01°	150,00°	150,82°	0,82°
$\phi 12$	120,00°	119,88°	-0,12°	110,00°	110,51°	0,51°
$\phi 13$	0,00°	0,00°	0,00°	335,00°	335,83°	0,83°
$\phi 14$	240,00°	239,80°	-0,20°	240,00°	241,65°	1,65°
$\phi 15$	300,00°	300,01°	0,01°	330,00°	330,76°	0,76°

Para o Teste I, considerando os ângulos de fase agregados das componentes harmônicas de tensão, verificou-se o maior desvio para a tensão harmônica de 14ª ordem, com uma diferença angular de -0,20°. No caso dos ângulos de fase das componentes harmônicas de corrente, quando comparados com os de tensão, apresentaram desvios superiores. Este fato pode ser justificado visto que as medições das tensões são realizadas de forma direta, enquanto que as medições das correntes são de forma indireta, com uso de transformadores de corrente, os quais apresentam erros intrínsecos na transdução de ângulos de fase. Assim como para o caso das tensões harmônicas, a maior diferença angular registrada para os ângulos de fase das componentes harmônicas de corrente foi para a 14ª ordem, com um desvio de 1,65°.

Para o Teste II considerou-se apenas 3 frequências harmônicas,

sendo a 3ª, 5ª e 7ª ordens harmônicas, representando componentes de seqüências zero, negativa e positiva. Por se tratar de um teste com grandezas variáveis, os valores ditos como Padrão para este teste em específico foram obtidos de forma teórica, ou seja, os mesmos foram calculados conforme a metodologia apresentada anteriormente, utilizando os dois intervalos considerados.

Analisando-se os ângulos de fase das componentes harmônicas de tensão, a maior diferença angular verificada foi de 0,07° para a 3ª ordem harmônica, enquanto que para o caso das correntes harmônicas, o maior desvio verificado foi de 0,30° para a 5ª e 7ª ordens harmônicas.

**TABELA 2 – TESTE II: ÂNGULOS DE FASES DAS COMPONENTES HARMÔNICAS DE TENSÃO E DE CORRENTE COM VARIAÇÃO AO LONGO DOS 10 MINUTOS DE MEDIÇÃO**

Grandeza	Intervalo A	Intervalo B	Padrão	Medido	Desvio
$\phi V 3$	90,00°	110,00°	94,96°	95,03°	0,07°
$\phi V 5$	180,00°	150,00°	175,13°	175,10°	-0,03°
$\phi V 7$	30,00°	330,00°	27,00°	26,96°	-0,04°
$\phi I 3$	240,00°	190,00°	223,59°	223,67°	0,08°
$\phi I 5$	20,00°	140,00°	47,05°	47,35°	0,30°
$\phi I 7$	300,00°	150,00°	294,85°	295,15°	0,30°

Com os desvios verificados nestes dois testes em ambiente controlado, utilizando sinais de tensões e de correntes harmônicas fixos e variáveis ao longo do tempo, o medidor apresentou desvios para os ângulos de fase considerados aceitáveis para a aplicação em campo.

## MEDIÇÕES REAIS

Após validação laboratorial do medidor, com a metodologia proposta devidamente embarcada no mesmo, esta seção está direcionada para o uso do medidor em campo. Assim, será apresentado os resultados obtidos a partir de uma medição realizada durante 7 dias consecutivos em um consumidor do tipo industrial conectado à rede elétrica em média tensão.

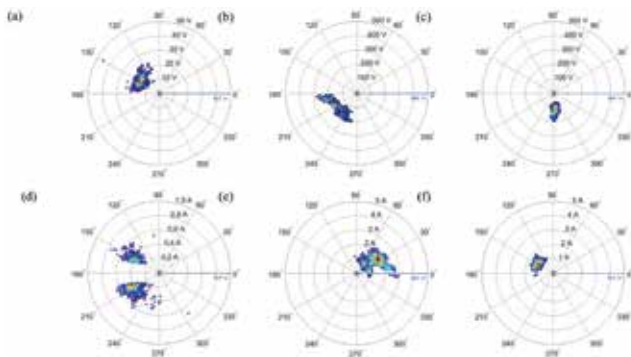
Os resultados desta medição serão apresentados na forma de gráficos em coordenadas polares, onde cada ponto no plano representa a extremidade de um fasor de tensão ou de corrente, para cada ordem harmônica, com origem no centro do sistema de coordenadas polares. Cada fasor foi construído utilizando as amplitudes agregadas conforme a norma IEC 61.000-4-30, juntamente dos ângulos de fase agregados conforme metodologia aqui apresentada, ambos para o intervalo de tempo igual a 10 minutos. Desta forma, será apresentado um plano de coordenadas polares para a tensão harmônica, sendo adotada como referência a tensão na frequência fundamental, e um outro para a corrente harmônica de mesma ordem. Neste caso, a referência será a tensão harmônica de mesma frequência da corrente. Para retratar melhor a densidade dos pontos dentro de uma “nuvem de dados”, adotou-se a representação em “mapa de calor”, na qual utiliza-se uma escala de cores para evidenciar a quantidade de pontos em uma determinada região. A escala de cores segue na seqüência do azul passando pelo verde e amarelo até chegar ao vermelho, onde as

menores ocorrências são na cor azul e as maiores são representadas na cor vermelha.

### Instalação industrial atendida em média tensão

A unidade industrial monitorada encontra-se conectada a uma rede com tensão nominal de linha igual a 13,8 kV. A medição foi realizada com auxílio de transformadores de potencial (13.800V/115V) e de corrente (100A/5A) de uso exclusivo da unidade consumidora.

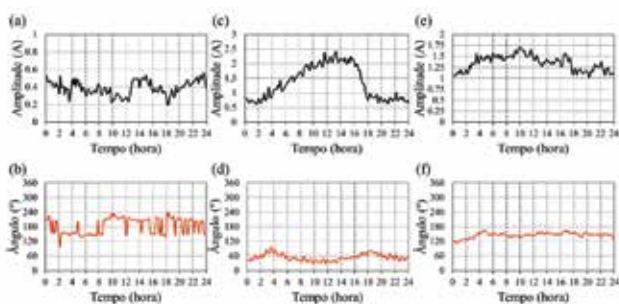
Os resultados obtidos para as tensões e para as correntes harmônicas da instalação industrial estão apresentados na Figura 5. As amplitudes das tensões de 3ª ordem harmônica apresentaram magnitudes inferiores às de 5ª e 7ª ordens harmônicas, fato que pode ser atribuído ao tipo de conexão do transformador, neste caso delta-estrela.



**Figura 5 - Medição de 24 horas na instalação industrial MT. (a), (b) e (c) tensões de 3ª, 5ª e 7ª ordens harmônicas, (d), (e) e (f) correntes de 3ª, 5ª e 7ª ordens harmônicas, respectivamente.**

Analisando-se as correntes harmônicas, pode-se verificar que, para a corrente de 3ª ordem harmônica, os registros predominaram em duas regiões distintas da Figura 5(d), representando um fluxo de potência harmônica ativa no sentido da carga para a fonte. Por outro lado, o fluxo de potência harmônica reativa apresentou-se com características ora indutiva, ora capacitiva. Para a 5ª ordem, o fluxo de potência harmônica ativa apresentou-se predominantemente no sentido da fonte para a carga, enquanto que para a 7ª ordem, o fluxo foi no sentido inverso, ou seja, da carga para a fonte.

Para analisar as variações das correntes harmônicas ao longo



**Figura 6 - Comportamento das correntes harmônicas registradas para a instalação industrial MT durante 24 horas de medição. (a) amplitude de 3ª harmônica, (b) ângulo de fase para 3ª harmônica, (c) amplitude de 5ª harmônica, (d) ângulo de fase para 5ª harmônica, (e) amplitude de 7ª harmônica e (f) ângulo de fase para 7ª harmônica.**

do dia, na Figura 6 são apresentadas as amplitudes e os ângulos de fase para a 3ª, 5ª e 7ª ordens harmônicas, os quais são referentes apenas a 1 dos 7 dias de medição. De acordo com a Figura 6(b), as maiores variações verificadas ocorreram para os ângulos de fase da componente de 3ª ordem harmônica, assim como verificado anteriormente na Figura 5(b).

### CONCLUSÃO

O trabalho aqui desenvolvido concentrou-se na apresentação de uma metodologia para agregação dos ângulos de fase das componentes harmônicas para um intervalo de tempo específico de medição. Esta metodologia é baseada no fluxo de energia harmônica real no ponto de medição. Com isso, utilizando os dados obtidos através de medições, é possível representar de forma fidedigna o comportamento físico real no ponto de medição. Todo o desenvolvimento matemático foi apresentado, o qual consiste em duas vias de cálculo, sendo uma para as agregações dos ângulos de fase das tensões harmônicas e uma outra para as correntes harmônicas.

A metodologia apresentada foi implementada em um analisador de parâmetros de Qualidade da Energia Elétrica disponível comercialmente. Através de testes laboratoriais, em ambiente controlado, o medidor apresentou resultados em conformidade com o sinal programado na fonte padrão, tornando o medidor apto para utilização em campo. Assim, realizou-se uma medição em campo com objetivo de verificar o comportamento dos ângulos de fase das componentes harmônicas e, ainda, analisar os fluxos de potência harmônica em uma instalação elétrica do tipo industrial atendida em média tensão. Os resultados obtidos demonstraram que os ângulos de fase para as componentes harmônicas de corrente apresentam comportamentos intrínsecos as cargas em operação. Em determinados instantes, de acordo com as cargas em funcionamento, os fluxos de potência harmônica ativa e reativa podem estar em sentidos diferentes conforme a ordem harmônica analisada, podendo inclusive, inverter de sentido em caso de mudança de carga.

Finalmente, o trabalho desenvolvido mostrou que os ângulos de fase das componentes harmônicas, necessários para os estudos de fluxo de potência harmônica, podem ser obtidos através de medições. Neste sentido, utilizando-se medidores embarcados com a metodologia desenvolvida pela UFU, é possível a realização de campanhas de medição visando a caracterização das correntes harmônicas para as diversas classes de unidades consumidoras, tanto em termos de amplitudes quanto também de ângulos de fase, resultando na quantificação mais assertiva das perdas técnicas nas redes de distribuição de energia elétrica através de estudos fluxo de potência harmônica.

\*Guilherme Leal Xavier é graduado em engenharia elétrica pela UFU, com mestrado e doutorado pela mesma instituição. Atualmente é professor na UFV campus Rio Paranaíba.

\*José Rubens Macedo Jr. é graduado em engenharia elétrica pela UFU, com mestrado pela mesma instituição e doutorado pela UFES. Desenvolveu seu pós-doutorado no Worcester Polytechnic Institute - WPI, Massachusetts, Estados Unidos. Atualmente é professor na UFU e coordenador do Laboratório de Distribuição de Energia Elétrica (LADEE).