

Analysis of Reactive Energy Measurement Methods Under Non-Sinusoidal Conditions

G. Miyasaka, E. T. Silvério, G. L. Xavier, H. R. J. da Silva, L. L. Braz,
R. F. B. Oliveira, R. N. C. Lima, and J. R. Macedo Jr.

Abstract—The different methods of measuring the reactive power and energy for billing electricity consumers connected to medium and high voltage systems, presents different results in non-sinusoidal conditions. The purpose of the paper is to point out the imperfections of each method accepted by the legislation on measuring precisely the power absorbed by consumers. In this sense, the present work addresses the effect of the harmonic distortion of voltage and current in the measurement of reactive energy, considering the different existing measurement methods. Initially, the paper presents an analytical study covering modeling and computational implementations of each method available for the measurement of reactive energy. In addition, calibration tests were carried out considering different meter devices. Finally, considering a meter specifically developed in the context of the present work, a measurement campaign was applied in different medium and high voltage facilities in order to perform a practical comparison between the different reactive energy measurement methods. The results showed the need for a unification of reactive energy measurements methods in order to achieve isonomy in the billing process of electricity consumers.

Index Terms—harmonic distortion, reactive power, measurement methods, reactive power meters for billing.

I. INTRODUÇÃO

O FATURAMENTO de energia elétrica em consumidores de média e alta tensão é baseado não apenas na potência e energia ativa, mas também na potência e energia reativa [1]. Por esta razão, se faz necessária a utilização de medidores que possibilitem o registro dessas grandezas isonomicamente entre os diferentes consumidores de energia elétrica.

Existem vários tipos de medidores de potência/energia reativa no mercado, os quais são baseados em diferentes métodos de medição. Em condições senoidais, esses métodos são equivalentes e, nas mesmas condições de operação,

Data de submissão 21 de novembro de 2018. Este trabalho teve apoio técnico e financeiro do Grupo Energisa, do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica da ANEEL, assim como à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

G. Miyasaka; Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia 38900-702 Brasil (e-mail: gabrielmiyasaka@ufu.br).

E. T. Silvério; Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil. eduardot.silverio@ufu.br).

G. L. Xavier; Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia 38900-702 Brasil (e-mail: guilhermexavier@ufu.br).

H. R. J. Silva; Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia 38900-702 Brasil (e-mail: rubensjacob08@hotmail.com).

L. L. Braz; Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia 38900-702 Brasil (e-mail: lara.braz@ufu.br).

R. F. B. Oliveira; Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia 38900-702 Brasil (e-mail: raphaelbarata@gmail.com).

R. N. C. Lima; Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia 38900-702 Brasil (e-mail: rodrigonobis@hotmail.com).

J. R. Macedo, Jr., Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia 38900-702 Brasil (e-mail: jrubs@ufu.br).

levam a resultados compatíveis com as respectivas classes de exatidão desses equipamentos [1].

Entretanto, a conexão de cargas não-lineares e a presença de componentes harmônicas nos sistemas de energia elétrica, extensamente discutidas em [2] e [3], levantaram algumas questões relativas à exatidão dos medidores em condições distorcidas de tensão e corrente [4]. Os principais problemas são encontrados nas medições de potência/energia reativa, pois existem no mercado diferentes medidores para essa grandeza, embarcados com diversos métodos de medição, sendo que em condições não-senoidais esses métodos apresentam valores distintos para a potência reativa quando submetidos aos mesmos sinais de tensão e corrente.

Dessa forma, em termos financeiros, alguns consumidores poderiam ser beneficiados, enquanto outros seriam prejudicados no que tange ao faturamento da demanda e energia reativa excedentes.

A comunidade científica vem discutindo a questão da unificação da definição de potência reativa em condições não-senoidais há décadas, e diferentes propostas podem ser encontradas na literatura. Alexander Emanuel, por exemplo, apresenta em [5] e [6] formulações para potência reativa no âmbito das distorções harmônicas. As definições apresentadas por Emanuel são as mais recentes e comumente aceitas pela comunidade científica, além de terem sido endossadas pelo IEEE em [7]. Adicionalmente, em [8] são definidos os conceitos de potência de acordo com o dicionário de definições do IEEE. Diversas outras definições de potência, em condições distorcidas de tensão e corrente, foram também propostas [9-16]. Ressalta-se, ainda, que tais definições de potência não podem ser confundidas com os métodos de medição utilizados pelos diferentes medidores de energia elétrica.

Assim, além das diferentes definições de potência elétrica, tem-se também diferentes métodos de medição de potência e energia elétrica, utilizados pelos mais diversos medidores comerciais. Estes métodos de cálculo são amplamente difundidos e conhecidos pela comunidade científica, entretanto o tema carece de uma análise experimental, isto é, os resultados apresentados para cada método ainda não foram discutidos e analisados de acordo com o impacto que possuem no faturamento de energia elétrica, mostrando-se assim a relevância deste tema.

O objetivo deste trabalho, em termos de contribuição científica, é identificar as fragilidades e deficiências de cada método, apresentados em [17], para a medição de potência e energia reativa. A proposta também abrange o desenvolvimento de um medidor de energia elétrica que contemple, em um mesmo equipamento, os diferentes métodos de cálculo discutidos neste trabalho. Tal medidor foi utilizado em medições de campo para analisar quantitativamente a discrepância entre os métodos de medição estudados.

Este é um tema bastante explorado e, apesar da ampla divulgação do conhecimento acerca dos diferentes métodos de medição, as comparações entre os métodos e a evidência do impacto de tal discrepância no faturamento de energia elétrica. Além da influência desta na interpretação do fator de potência de uma unidade consumidora, ainda não foram estudos de forma clara e objetiva, como propõe este artigo.

Para esse propósito, foram realizados testes de calibração em laboratório, assim como medições em campo para diferentes tipos de consumidores de média e alta tensão. Os testes de calibração de medidores foram realizados contemplando-se vários medidores de potência reativa, enquanto que as medições em campo foram realizadas com um medidor especificamente desenvolvido para a medição da potência e energia reativa, com o auxílio do conteúdo científico apresentado em [18] e [19], contemplando simultaneamente todos os métodos de medição disponíveis.

II. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Inicialmente, para cada um dos métodos de medição sugeridos em [17], foi realizada uma abordagem analítica com o intuito de compreender a origem dos possíveis erros de medição em condições distorcidas de tensão e corrente. Para isso, por exemplo, é necessário abranger a forma de cálculo tanto da potência ativa quanto da aparente, no caso do método do triângulo de potências. Dessa forma, em medidores do tipo eletromecânico, a potência ativa é obtida de forma contínua, uma vez que o processo para sua obtenção se baseia nas interações entre os campos elétricos e magnéticos considerando-se, para esse propósito, disposições geométricas específicas entre as bobinas de potencial e de corrente.

Os medidores eletrônicos, por outro lado, realizam uma amostragem discreta dos valores instantâneos de tensão e corrente, de modo que a potência ativa possa ser calculada com os valores de componente fundamental e harmônica de tensão e corrente discriminadas, no domínio da frequência, como indicado em (1).

$$P = V_1 I_1 \cos(\theta_1) + \sum_{h=2}^{h_{\max}} V_h I_h \cos(\theta_h) \quad (1)$$

A. Método do Triângulo de Potências

O método do Triângulo de Potências utiliza os valores eficazes de tensão V_{RMS} e corrente I_{RMS} para calcular a potência aparente S . Então, a potência reativa Q pode ser computada.

Os medidores eletrônicos registram os valores eficazes de tensão e corrente de forma discreta, como indica (2) e (3).

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N v_n^2} \quad (2)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N i_n^2} \quad (3)$$

O produto entre a tensão e a corrente eficaz, assim obtido, resulta no valor da potência aparente, como mostrado em (4).

$$S^2 = V_1^2 I_1^2 + V_1^2 \left(\sum_{h=2}^{h_{\max}} I_h^2 \right) + \left(\sum_{h=2}^{h_{\max}} V_h^2 \right) I_1^2 + \left(\sum_{h=2}^{h_{\max}} V_h^2 \right) \left(\sum_{h=2}^{h_{\max}} I_h^2 \right) \quad (4)$$

Utilizando (1) e (4), determina-se Q , por meio do triângulo de potências. Desta forma, o comportamento de Q , neste método, é diretamente influenciado por P e S . A seguir, apresenta-se uma análise capaz de demonstrar a incapacidade de representar com eficácia a potência reativa na presença de conteúdo harmônico.

Caso 1: Para $\varphi_v = \varphi_i$ e $\varphi_{v_h} = \varphi_{i_h}$, ou seja, quando não há presença de reativo oriundo do defasamento de tensões e corrente de mesma ordem, no sistema observa-se que (1) resulta em (5).

$$P = V_1 I_1 + \sum_{h=2}^{h_{\max}} V_h I_h \quad (5)$$

No entanto, ao se calcular a potência reativa substituindo os valores de potência aparente e ativa, indicados em (4) e (5), respectivamente, obtém-se um valor de Q diferente de zero. Neste caso, a determinação da potência reativa Q , ainda que todas as componentes de tensão e corrente estejam em fase, considera a presença de componentes de potência de distorção, conforme definições de Alexander Emanuel em [3], [16] e [17], na composição da potência reativa. Tal constatação se faz incoerente, uma vez que, neste caso, o valor de Q não é proveniente, especificamente, do defasamento entre tensão e corrente.

B. Método do Deslocamento de 90° por Amostras

1) Deslocamento da corrente por amostras: Este método consiste em aplicar uma defasagem de 90° ou $\pi/2$ rad no sinal de corrente para determinar potência reativa Q . A expressão matemática da corrente deslocada é apresentada em (6).

$$i_d(t) = I_1 \sin\left(\omega t + \varphi_i + \frac{\pi}{2}\right) + \sum_{h=2}^{h_{\max}} I_h \sin\left(h\omega t + \varphi_{i_h} + h\frac{\pi}{2}\right) \quad (6)$$

Realizando o cálculo do valor médio da potência utilizando o produto entre tensão e sinal de corrente deslocada, tem-se que apenas componentes de mesma ordem harmônica apresentam valor médio igual a zero, ou seja, $Q_{1,h} = Q_{h,1} = Q_{n,m} = Q_{m,n} = 0$.

Isso ocorre porque a tensão e a corrente deslocada são ortogonais.

Já as parcelas de Q de mesma ordem harmônica, em contrapartida, apresentam valor médio diferente de zero e este pode ser calculado por:

$$\sum_{h=1}^{h_{\max}} Q_h = \sum_{h=1}^{h_{\max}} V_h I_h \left(\cos(\varphi_{v_h} - \varphi_{i_h}) \cos\left(h\frac{\pi}{2}\right) + \sin(\varphi_{v_h} - \varphi_{i_h}) \sin\left(h\frac{\pi}{2}\right) \right) \quad (7)$$

Caso fosse realizado um deslocamento de $-\pi/2$ rad, todas as componentes provenientes do produto entre senos, ou seja, o segundo termo de (7), teriam sinais opostos aos utilizados.

Ao se analisar (7), percebem-se algumas peculiaridades quanto ao cálculo de Q para certos grupos de harmônicas. O comportamento da potência reativa calculada para cada um desses grupos é descrito a seguir.

Caso 1: Para $h = 1, 5, 9, 13, \dots$, ou $1+4k, k = 0, 1, 2, 3, \dots$, a potência reativa pode ser calculada por (8).

$$Q_h = V_h I_h \text{sen}(\varphi_{v_h} - \varphi_{i_h}) \quad (8)$$

Caso 2: Para $h = 2, 6, 10, 14, \dots$, ou $2+4k, k = 0, 1, 2, 3, \dots$, a potência reativa pode ser calculada por (9).

$$Q_h = -V_h I_h \text{cos}(\varphi_{v_h} - \varphi_{i_h}) \quad (9)$$

Caso 3: Para $h = 3, 7, 11, 15, \dots$, ou $3+4k, k = 0, 1, 2, 3, \dots$, a potência reativa pode ser calculada por (10).

$$Q_h = -V_h I_h \text{sen}(\varphi_{v_h} - \varphi_{i_h}) \quad (10)$$

Caso 4: Para $h = 4, 8, 12, 16, \dots$, ou $4+4k, k = 0, 1, 2, 3, \dots$, a potência reativa pode ser calculada por (11).

$$Q_h = V_h I_h \text{cos}(\varphi_{v_h} - \varphi_{i_h}) \quad (11)$$

Em suma, a Equação (12) expressa como este método determina o valor da potência reativa Q .

$$Q = Q_1 - P_2 - Q_3 + P_4 + Q_5 - P_6 + \dots \quad (12)$$

2) *Deslocamento de tensão por amostras:* Este método consiste em aplicar um defasamento de 90° , ou $\pi/2$ rad, ao sinal de tensão para determinar quais são as parcelas de potência reativa Q . A análise é similar ao método anterior. A Equação (13) mostra a expressão matemática da onda de tensão deslocada em $+90^\circ$.

$$v_d(t) = V_1 \text{sen}\left(\omega t + \varphi_v + \frac{\pi}{2}\right) + \sum_{h=2}^{h_{\text{máx}}} V_h \text{sen}\left(h\omega t + \varphi_{v_h} + h\frac{\pi}{2}\right) \quad (13)$$

Novamente, percebe-se que apenas a multiplicação entre tensões deslocadas e correntes de mesma frequência apresentam valor médio diferente de zero, resultando em (14):

$$\sum_{h=1}^{h_{\text{máx}}} Q_h = \sum_{h=1}^{h_{\text{máx}}} V_h I_h \left(\text{cos}(\varphi_{v_h} - \varphi_{i_h}) \text{cos}\left(h\frac{\pi}{2}\right) + \text{sen}(\varphi_{v_h} - \varphi_{i_h}) \text{sen}\left(h\frac{\pi}{2}\right) \right) \quad (14)$$

Observa-se que (14) é similar a (7), tendo como única distinção o sinal utilizado em componentes advindas das parcelas constituídas por funções seno.

Assim, de forma análoga ao método anterior, a potência reativa calculada pode ter quatro comportamentos diferentes, a depender da ordem harmônica. As quatro situações diferentes são mostradas a seguir.

Caso 1: Para $h = 1, 5, 9, 13, \dots$, ou $1+4k, k = 0, 1, 2, 3, \dots$, a potência reativa pode ser calculada por (15).

$$Q_h = -V_h I_h \text{sen}(\varphi_{v_h} - \varphi_{i_h}) \quad (15)$$

Caso 2: Para $h = 2, 6, 10, 14, \dots$, ou $2+4k, k = 0, 1, 2, 3, \dots$, a potência reativa pode ser calculada por (16).

$$Q_h = -V_h I_h \text{cos}(\varphi_{v_h} - \varphi_{i_h}) \quad (16)$$

Caso 3: Para $h = 3, 7, 11, 15, \dots$ ou $3+4k, k = 0, 1, 2, 3, \dots$, a potência reativa pode ser calculada por (17).

$$Q_h = V_h I_h \text{sen}(\varphi_{v_h} - \varphi_{i_h}) \quad (17)$$

Caso 4: Para $h = 4, 8, 12, 16, \dots$, ou $4+4k, k = 0, 1, 2, 3, \dots$, a potência reativa pode ser calculada por (18).

$$Q_h = V_h I_h \text{cos}(\varphi_{v_h} - \varphi_{i_h}) \quad (18)$$

A análise de cada caso é similar à apresentada para o método de deslocamento de corrente. Resumidamente, este método determina Q conforme indicado em (19).

$$Q = -Q_1 - P_2 + Q_3 + P_4 - Q_5 - P_6 + \dots \quad (19)$$

Ao se observar as equações (12) e (19), nota-se que ambos os métodos chegam aos mesmos módulos de potência reativa para cada ordem harmônica. Porém, para ordens ímpares, o sinal é oposto. Dessa forma, a potência reativa fundamental será medida inadequadamente. Esse problema pode ser contornado ao se multiplicar (19) por -1 , obtendo-se, assim (20).

$$Q = Q_1 + P_2 - Q_3 - P_4 + Q_5 + P_6 - \dots \quad (20)$$

C. Método do deslocamento da tensão por derivação

O método de deslocamento de tensão por derivação consiste em derivar um sinal de tensão e calcular a potência através do produto entre tensão derivada e corrente. A derivada de um sinal de tensão genérico no domínio do tempo, é dada por (21).

$$\frac{dv(t)}{dt} = V_1 \omega \text{cos}(\omega t + \varphi_v) + V_h h \omega \text{cos}(h\omega t + \varphi_{v_h}) \quad (21)$$

Utilizando-se de (21) para computar Q , percebe-se que todas as componentes de potência reativa oriundas de tensões e correntes de frequências diferentes têm valor médio iguais a zero. As outras componentes de Q , produtos da multiplicação de sinais de mesma frequência resultam em (22).

$$Q = V_1 I_1 \omega \text{sen}(\varphi_v - \varphi_i) + \sum_{h=2}^{h_{\text{máx}}} (V_h I_h \omega h \text{sen}(\varphi_{v_h} - \varphi_{i_h})) \quad (22)$$

Analisando-se a Equação (22), nota-se a presença do termo ω , ou ωh para as harmônicas. Como os medidores são projetados para medir potência na frequência fundamental, o resultado de (22) é dividido por ω . No entanto, para as componentes harmônicas, além de ω , existe também a ordem h no produto, o qual incrementa o valor da potência reativa harmônica proporcionalmente a sua ordem. Desta forma, este método determina Q de acordo com (23).

$$Q = Q_1 + 2Q_2 + 3Q_3 + 4Q_4 + \dots \quad (23)$$

D. Método do deslocamento da tensão por integração

O deslocamento de tensão por integração consiste em integrar o sinal de tensão e calcular a potência através do produto entre a integral do sinal de tensão no domínio do tempo e o sinal de corrente. A integral do sinal de tensão é dada por (24).

$$\int v(t) dt = V_1 \frac{(-\cos(\omega t + \varphi_v))}{\omega} + V_h \frac{(-\cos(h\omega t + \varphi_{v_h}))}{h\omega} \quad (24)$$

Utilizando-se de (24) para calcular Q , obtém-se (25).

$$Q = \frac{V_1 I_1}{\omega} \sin(\varphi_v - \varphi_i) + \sum_{h=2}^{h_{\max}} \left(\frac{V_h I_h}{h\omega} \sin(\varphi_{v_h} - \varphi_{i_h}) \right) \quad (25)$$

Na Equação (25), percebe-se que o valor de potência reativa de cada ordem está dividido por suas respectivas frequências angulares. De forma a corrigir esse erro para a frequência fundamental, os medidores eletrônicos multiplicam a expressão (25) por ω . Para a frequência fundamental, o erro é corrigido perfeitamente. Entretanto, para cada frequência harmônica, a potência reativa fica dividido por h , como indicado em (26).

$$Q = Q_1 + \frac{Q_2}{2} + \frac{Q_3}{3} + \frac{Q_4}{4} + \dots \quad (26)$$

E. Método da Série de Fourier

Esta metodologia realiza o cálculo de potência reativa da fundamental e para todas as ordens harmônicas presentes. Para isso, aplica-se a Série de Fourier aos sinais de tensão e corrente de forma a separar as frequências presentes, como indicado pela Equação (27).

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{h=1}^{h_{\max}} \left(a_h \cos(\omega_h t + \varphi_h) + b_h \sin(\omega_h t + \varphi_h) \right) \quad (27)$$

Neste caso, $f(t)$ pode representar tanto $v(t)$ como $i(t)$. Assim, com todas as frequências segregadas, é possível calcular a potência reativa Q de cada frequência e, posteriormente, somar algebricamente o valor de Q para cada ordem harmônica, obtendo, portanto, o valor da potência reativa resultante do sistema analisado.

III. TESTES DE CALIBRAÇÃO

O objetivo desta seção é comparar a energia reativa medida pelos diversos medidores utilizados em distribuidoras de energia elétrica frente a sinais de tensão e corrente distorcidos. Vale ressaltar que a medição de energia reativa faz parte do faturamento dos consumidores e impacta diretamente na receita tanto dos consumidores como da concessionária. Para realizar os testes de calibração nos medidores, utilizou-se a estrutura da Fig. 1.

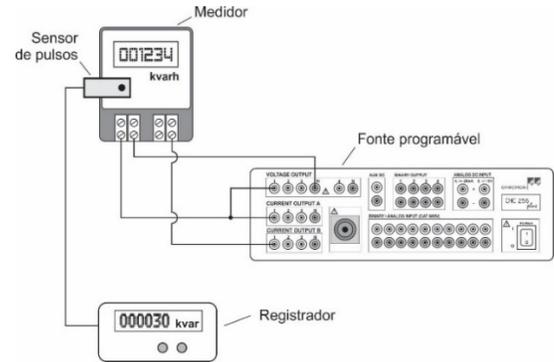


Fig. 1 – Esquema de montagem dos testes de calibração.

Tal estrutura é composta por uma fonte programável que é capaz de sintetizar formas de onda, tanto de tensão quanto de corrente, a serem aplicadas no medidor de energia reativa. Os sinais implementados na fonte programáveis são comumente encontrados em redes de distribuição. O equipamento utilizado se trata de uma fonte OMICRON CMC 256 Plus (erro < 0,1% para calibração de medidores).

Os canais de tensão e de corrente foram conectados ao medidor de energia reativa em teste, o qual processa os sinais e calcula a energia reativa a ser faturada.

Os medidores do tipo eletrônico emitem um pulso luminoso referente a uma quantidade de energia ativa e outro referente a energia reativa, ambas demandadas em um determinado tempo, denominado K_h , expresso em $Wh/pulso$ e em $varh/pulso$, respectivamente. Neste trabalho, utilizou-se apenas o pulso referente à energia reativa. Foi desenvolvido um equipamento específico para quantificação da potência reativa medida, o qual processa a quantidade de pulsos luminosos durante um determinado período e converte o valor de energia reativa em valores de potência reativa, de acordo com a constante K_h de cada medidor.

Na sequência, foram escolhidos 19 modelos de medidores utilizados para faturamento de potência e energia reativa de 5 diferentes fabricantes. As marcas e modelos dos medidores foram preservados devido sigilo industrial e ética profissional, sendo os fabricantes nomeados com as letras de A até E, e os modelos numerados em ordem crescente.

Inicialmente, todos os medidores foram submetidos a dois testes de calibração com tensão e corrente puramente senoidais. O primeiro teste representou uma carga monofásica com fator de potência 0,70 indutivo, enquanto no segundo, o fator de potência da carga representativa foi 0,70 capacitivo.

Na Fig. 2, estão apresentados os resultados dos testes para cada medidor. Os resultados estão apresentados na forma da razão entre a potência reativa registrada (Q) e a fundamental do sistema (Q_1). Apesar dos desvios verificados, todos os resultados levantados estão dentro da faixa aceitável da classe de exatidão dos medidores, que é de 4% para energia reativa com carga monofásica por elemento, conforme aponta [20].

Na sequência, os medidores foram submetidos a uma bateria de testes com sinais de tensão e corrente distorcidos. As distorções adotadas são comumente encontradas nas redes de distribuição de energia elétrica. Ao todo, foram realizados 6 testes, com as características apresentadas na Tabela I.

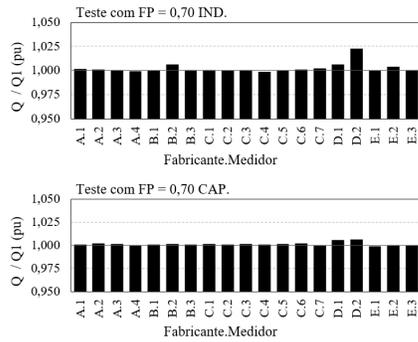


Fig. 2 – Relação entre a potência reativa registrada pelo medidor pela potência reativa fundamental.

TABELA I
CARACTERÍSTICAS DOS TESTES REALIZADOS

Nº	Características dos testes realizados	DHT _v (%)	DHT _i (%)
1	Harmônicas ímpares não múltiplas de 3	5,0	10,0
2	Harmônicas ímpares não múltiplas de 3	7,0	30,0
3	Harmônicas pares não múltiplas de 3	7,0	30,0
4	Harmônicas pares não múltiplas de 3	9,0	50,0
5	Harmônicas múltiplas de 3	5,0	10,0
6	Harmônicas múltiplas de 3	9,0	50,0

A título de ilustração, a Fig. 3 apresenta as formas de onda dos pares de tensão e de corrente reproduzidos pela fonte para calibração dos medidores. Vale ressaltar que nos gráficos, o eixo vertical representa a amplitude em porcentagem da fundamental para cada sinal.

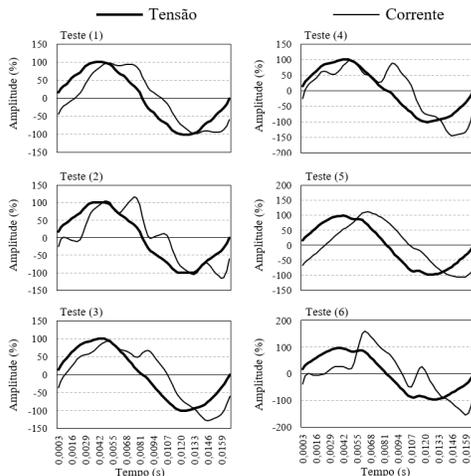


Fig. 3 – Forma de onda da tensão e corrente dos testes realizados.

Os resultados de potência reativa medida pelos 19 medidores eletrônicos são apresentados na Fig. 4. É importante salientar que não é possível determinar qual método é utilizado por cada medidor, uma vez que esta informação é retida pelo fabricante por segredo industrial, além de não ser possível analisar quais são os protocolos de aquisição e processamento de sinais utilizados por cada equipamento de medição. Entretanto, é conhecido que algum dos métodos de cálculo discutidos na seção II é utilizado para determinar a potência reativa, visto que estes são medidores comercializados no Brasil e devem seguir as orientações estabelecidas em [17] e [20], ou seja, as recomendações da agência reguladora e INMETRO, respectivamente.

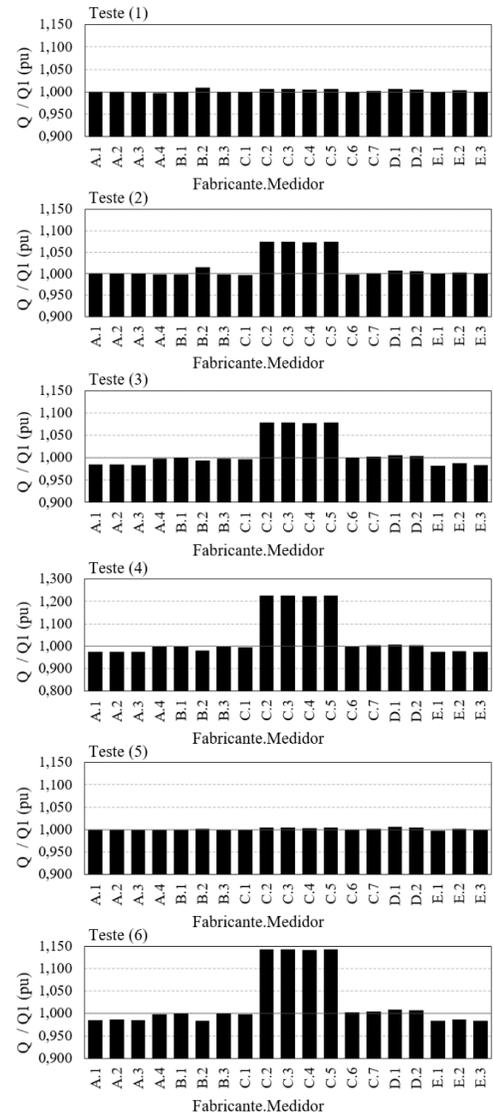


Fig. 4 – Relação entre a potência reativa registrada pelo medidor e a potência reativa fundamental.

Assim analisando os testes 1 e 5, os medidores não apresentaram divergências significativas entre os valores registrados em relação aos esperados. O maior desvio encontrado ficou abaixo de 1%. Para os demais testes, com exceção de 4 modelos do fabricante C (C.2, C.3, C.4 e C.5), os desvios encontrados ficaram abaixo de 1,5%.

Analisando agora os modelos de medidores C.2 ao C.5, os quais apresentaram as maiores discrepâncias nos desvios dentre os testes realizados, foi observado desvios entre 7,5% a 22,6% para os testes 2, 3, 4 e 6. De modo geral, é notório que os desvios registrados se apresentam de forma crescente conforme o incremento da distorção harmônica, o que pode ser causado devido aos diversos métodos de cálculo da potência reativa, como apresentado na seção anterior.

Além disso, outro experimento realizado foi a calibração dos medidores considerando uma condição especial, considerando-se um circuito elementar constituído de um retificador de meia onda suprindo uma carga puramente resistiva, conforme mostrado na Fig. 5, a qual também mostra a forma de onda da tensão (puramente senoidal) e da corrente no lado da fonte.

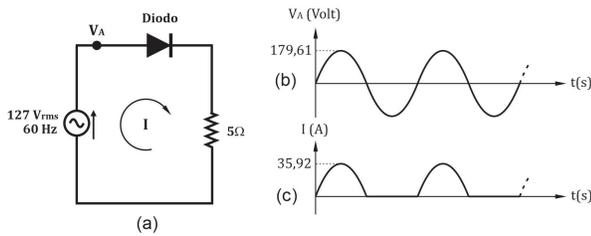


Fig. 5 – (a) Circuito de teste sintetizado pela fonte programável, (b) tensão instantânea e (c) corrente instantânea.

Os resultados obtidos pelos 19 medidores para a potência reativa, juntamente com o fator de potência para o circuito do retificador de meia onda estão apresentados na Fig. 6. Vale salientar que foi assumido como referência o fator de potência (FP) calculado a partir das componentes fundamentais de tensão e corrente. Para o caso específico dos sinais de tensão e corrente, associados ao retificador de meia onda, tem-se que as ondas de tensão e corrente na frequência fundamental encontram-se em fase, resultando, portanto, em um fator de potência unitário, segundo esta proposta de avaliação.

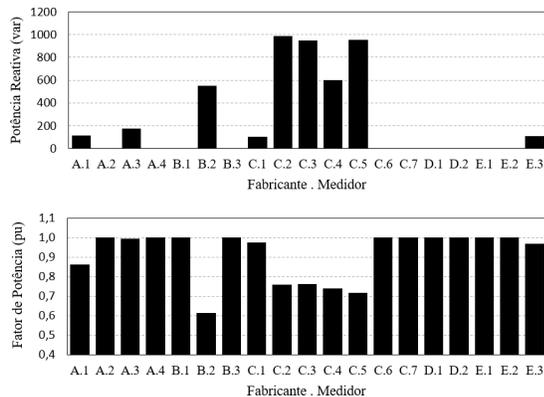


Fig. 6 – (a) Potência reativa registrada por medidor e (b) fator de potência registrado pelo medidor.

Pela análise da Fig. 6, é possível afirmar que a escolha do medidor utilizado e, conseqüentemente, a metodologia de cálculo implementada no mesmo, é fator determinante da energia reativa contabilizada. Tal afirmação será ratificada na seção seguinte.

IV. CAMPANHA DE MEDIÇÃO

Finalmente, de forma a mensurar quantitativamente o quanto a escolha do método de cálculo de potência reativa impacta no faturamento da energia reativa, foi desenvolvido um medidor capaz de calcular simultaneamente a energia reativa utilizando vários dos métodos apresentados na seção II. Assim como os medidores de faturamento comerciais, o medidor desenvolvido integraliza a energia reativa em janelas de 15 minutos. O protótipo desenvolvido pode ser visto na Fig. 7, com suas configurações apresentadas a seguir:

- Conversor A/D de 16 bits;
- Taxa de amostragem de 128 amostras por ciclo;
- Medição indireta;
- Tensão de operação 120 ~ 220 V;
- Corrente 2,5 (20) A;
- Medição trifásica a 4 fios.



Fig. 7 – Medidor desenvolvido para o estudo.

As metodologias implementadas no medidor estão listadas na Tabela II.

TABELA II
METODOLOGIA DE CÁLCULO DE POTÊNCIA REATIVA IMPLEMENTADAS NO MEDIDOR

Método	Método
A	Método Triângulo de Potências (ponto-a-ponto)
B	Método Deslocamento 90° por Amostras (Tensão)
C	Método Deslocamento 90° por Amostras (Corrente)
D	Método Deslocamento 90° por Derivação (Tensão)
E	Método Deslocamento 90° por Integração (Tensão)
F	Método Fourier (Apenas Fundamental)

De posse do medidor desenvolvido, foram realizadas 17 medições nos mais diversos tipos de consumidores de média e alta tensão, tais como mineradoras, hospitais, emissoras de televisão, centros comerciais e outros.

O quantitativo de energia reativa contabilizado em cada um dos métodos foi comparado com a energia reativa calculada apenas com tensão e corrente fundamentais, o método F. Os resultados são apresentados na Tabela III.

Pela Tabela III, percebem-se diferenças percentuais em todos os consumidores. De forma geral, os dois métodos que apresentaram resultados mais discrepantes foram o método A, que apresentou valores de energia reativa sempre maiores do que o método F em todos os casos, e o método C, que contabilizou menor montante de energia reativa que o método F em todas as situações.

A maior diferença percentual foi observada na medição 11. Também nessa medição, as maiores diferenças relativas foram vistas nos métodos A e C, iguais a +13,90% e -46,45%, respectivamente; logo, escolheu-se esse caso para um estudo mais aprofundado.

A medição 11 durou 10 dias, porém, de forma a melhor visualizar as diferenças dos métodos, apenas 1 dia de medição é apresentado na Fig. 8, que mostra a demanda de potência reativa calculada pelos métodos A e F nesse dia.

Pela análise da Fig. 8, percebe-se que o método A apresentou demanda reativa maior do que o método F durante todo o dia analisado. Vale salientar que o primeiro método contabiliza como reativo todas as componentes não ativas da potência aparente, ou seja, as potências produto do defasamento entre tensões e correntes de mesma ordem, e também as potências oriundas do relacionamento entre tensões e correntes de frequências diferentes são contabilizadas juntas, como reativo, como apresentado em (7).

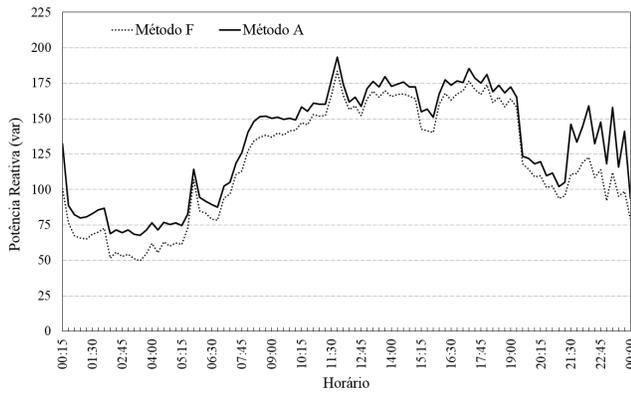


Fig. 8 – Potência reativa registrada pelos métodos A e F.

Em contrapartida, o método F contabiliza como reativo apenas a potência resultante do produto do defasamento entre tensão e corrente da frequência fundamental. Conclui-se, então, que a potência calculada pelo método A só será igual à do método F em sistemas livres de distorções harmônicas. Caso contrário, o reativo calculado pela metodologia A sempre será maior do que o calculado pelo método F.

TABELA III
ENERGIA REATIVA [%] CONTABILIZADA RELATIVA
POR CADA MÉTODO CONSIDERADO

Caso	Método A	Método B	Método C	Método D	Método E	Método F
1	103,52	99,97	86,30	99,86	100,00	100,00
2	104,14	99,75	82,39	99,44	99,75	100,00
3	102,39	99,77	99,76	99,14	99,94	100,00
4	100,69	99,88	89,88	99,92	99,90	100,00
5	101,50	99,99	99,97	99,68	100,00	100,00
6	107,12	99,87	90,26	99,12	99,98	100,00
7	107,18	99,57	99,55	95,76	99,85	100,00
8	100,90	99,98	91,54	99,93	100,00	100,00
9	108,29	99,91	86,91	99,13	99,96	100,00
10	103,40	100,10	79,39	101,21	100,05	100,00
11	113,90	100,18	53,55	99,68	100,04	100,00
12	103,18	100,15	79,10	100,29	100,08	100,00
13	129,62	94,42	93,82	92,19	95,33	100,00
14	133,53	99,78	79,54	99,94	100,00	100,00
15	106,13	99,80	93,92	98,31	99,17	100,00
16	100,35	99,99	89,79	99,89	100,01	100,00
17	120,61	95,89	88,43	93,78	94,57	100,00

Diferentemente do método A, a potência reativa calculada pelo método C foi menor do que a do método F durante todo o dia em análise, como mostra a Fig. 9.

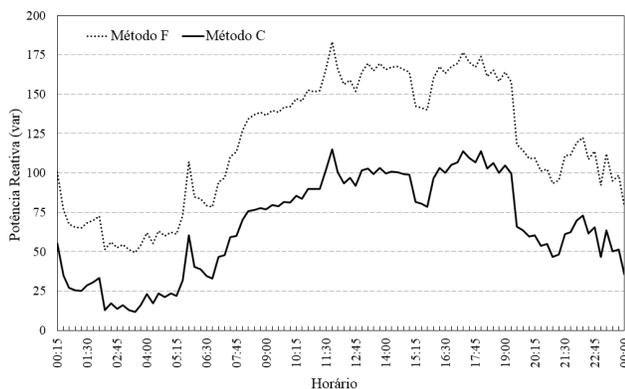


Fig. 9 – Potência reativa registrada pelos métodos C e F.

Como dito anteriormente, apenas as frequências harmônicas de ordem $h=1+4k$ têm o reativo medido corretamente. Todas as outras ordens têm as defasagens entre tensão e corrente originais alterados erroneamente, fazendo com que a potência reativa contabilizada seja incorreta, conforme observa-se em (12).

Mesmo os métodos A e C tendo apresentado os resultados mais discrepantes em relação à referência escolhida, que é a potência reativa fundamental, todos os outros métodos apresentados alteram o valor da potência reativa de forma incorreta, conforme apontado na Seção II. Os métodos que deslocam os sinais de tensão e corrente em 90° (B, C, D e E), particularmente, são totalmente inadequados para medições em ambientes não senoidais, uma vez que impactam significativamente a forma como a potência reativa das ordens harmônicas é calculada, cada um ao seu modo. O método A, por admitir toda a parcela não-ativa da potência como potência reativa, considerada aqui como sendo produto do deslocamento de tensão e corrente de mesma frequência, também não é recomendado para redes com tensões e/ou correntes distorcidas; essa metodologia de medição sempre trará os maiores valores dentre as apresentadas. Dessa forma, diante do exposto, dentre as metodologias de medição apresentadas, o método F é o que contabiliza a potência reativa de forma mais correta.

A Tabela III evidencia a necessidade da escolha de uma metodologia de cálculo apropriada e a padronização da mesma, uma vez que grandes diferenças de energia reativa calculada, e por consequência faturada, podem ocorrer única e simplesmente pela escolha do medidor escolhido.

V. CONCLUSÕES

Os estudos apresentados demonstram que todas as metodologias de medição de potência e energia reativa convergem para um mesmo valor quando considerados apenas sinais de tensão e corrente na frequência fundamental. No entanto, na presença de distorções de tensão e corrente, cada método de cálculo se comporta de uma forma diferente, acarretando em discrepâncias no montante de potência reativa calculada.

Além de discutir qualitativamente o impacto que a escolha da metodologia de cálculo de potência reativa representa em condições não-senoidais, o presente trabalho também apresentou quantitativamente as consequências dessa escolha em medidores comerciais, usados para faturamento de energia reativa. Os testes laboratoriais constataram grandes diferenças da potência reativa calculada nos medidores testados.

Adicionalmente, o teste com o retificador monofásico de meia onda, particularmente, evidenciou, mais uma vez, que há uma gama de metodologias de cálculo implementadas nos medidores comerciais, acarretando em diferentes valores de potência reativa para um mesmo sinal de tensão e corrente. A consequência dessa variedade da forma como os medidores quantificam a potência reativa é a cobrança não isonômica de reativo excedente por parte da concessionária.

Finalmente, complementando os resultados dos testes laboratoriais, foi realizada uma campanha de medição com um medidor capaz de calcular a potência reativa utilizando diversas metodologias de cálculo simultaneamente. Novamente, ficou comprovado que a metodologia de cálculo de Q é relevante para sua quantificação em ambientes com distorções harmônicas. As

diferenças entre a energia reativa medida em alguns consumidores chegaram a mais de 50%.

Diante de todo o exposto, ficou comprovada a necessidade urgente de padronização dos métodos de medição de potência e energia reativa, de forma que os faturamentos de demanda e energia reativa sejam realizados de forma isonômica para os mais diversos tipos de consumidores.

REFERÊNCIAS

- [1] Antonio Cataliotti, Valentina Cosentino, and Salvatore Nuccio. "The Measurement of Reactive Energy in Polluted Distribution Power Systems: An Analysis of the Performance of Commercial Static Meters". *IEEE Press*, 2008.
- [2] E. W. Kimbark, Direct current transmission, *J. Wiley and Sons*, 1971.
- [3] J. A. Suárez, G. F. Di Mauro, D. Anaut y C. Agüero. "Análisis de la distorsión armónica y los efectos de atenuación y diversidad en áreas residenciales.". *IEEE Latin America Transactions*. Vol. 3, Nº 5, Dezembro 2005.
- [4] S.L.Toral, J.M.Quero, and L.G.Franquelo. "Reactive power and energy measurement in the frequency domain using random pulse arithmetic". *IEEE Press*, 2001.
- [5] A.E.Emanuel, "Powers in nonsinusoidal situations - a review of definitions and physical meaning", *IEEE Trans. on Power Delivery*.
- [6] EMANUEL, A. Power Definitions and the Physical Mechanism of Power Flow. *Wiley-IEEE Press*, 2010.
- [7] *IEEE Std 1459-2000: IEEE Trial-Use Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced or Unbalanced Conditions*. 2011.
- [8] P.S.Filipski, Y.Baghzouz, M.D.Cox, "Discussion of power definitions contained in the IEEE Dictionary". *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 9, No 3, pp.1237 - 1244, July 1994.
- [9] W. Shepherd, P. Zakikhani, Definition of reactive power for nonsinusoidal systems, *IEEE Transactions on Power Systems*, 1972.
- [10] D. Sharon, Reactive power definition and power factor improvement in non-linear systems, *IEEE Transactions on Power Systems*, 1973.
- [11] N. L. Kusters, W. J. M. Moore, On the definition of reactive power under nonsinusoidal conditions, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1845-1854, 1980.
- [12] L. S. Czarniecki, "Considerations on the reactive power in nonsinusoidal situations", *IEEE Trans. On Instrumentations and measurement*, 1985.
- [13] S. Fryze, "Active, Reactive and Apparent Power in Circuits with Nonsinusoidal Voltages and Currents," (in German) *Elektrotechnische Z.*, Vol. 53, 1932, pp. 596-99, 625-27, 700-02.
- [14] C. I. Budeanu, "Reactive and Fictitious Powers," *Romanian National Institute*, Bucharest, Pub. No. 2, 1927.
- [15] Filipski, P. "A New Approach to Reactive Current and Reactive Power Measurement in Nonsinusoidal Systems". *IEEE Press*. 1980.
- [16] Alirio Fazio Jr., Leonardo P. Sampaio, Moacyr A. G. de Brito, Guilherme A. e Melo, Carlos A. Canesin, "Comparative Analysis for Reactive Energy Measurement Methodologies, Under Non-Sinusoidal Conditions in Three Phase Four-Wire Circuits. *IEEE Press*. 2011.
- [17] Nota Técnica nº 0083/2012-SRD/ANEEL: Proposta de abertura de Audiência Pública para o recebimento de contribuições visando aprimorar a regulamentação acerca do fator de potência e cobrança do excedente de reativos. 2012.
- [18] Songlin Fu Qiang Meng Xianzhuang, "A Compensation Method of Phase-shift Error on Reactive Power Measurement". *IEEE Press*. 2012..
- [19] W. A. Souza, F. P. Marafão, E. V. Liberado, I. S. Diniz and P. J. A. Serni. "Power Quality, Smart Meters and Additional Information from Different Power Terms". *IEEE Latin America Transaction*. Vol 13, Nº 1. Janeiro 2015.
- [20] ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. "ABNT NBR 14520 Medidores eletrônicos de energia elétrica – Método de Ensaio". Rio de Janeiro, 2011.

DADOS BIOGRÁFICOS



Gabriel Miyasaka, é engenheiro eletricitista (2018) pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Atualmente, é mestrando e pesquisador no Laboratório de Distribuição de Energia Elétrica. Suas áreas de interesse são: distribuição e transmissão de energia elétrica, qualidade da energia elétrica, máquinas elétricas, transformadores, fontes alternativas de energia.



Eduardo Tavares Silvério, é engenheiro eletricitista (2017) pela Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM). Atualmente aluno de pós-graduação a nível de mestrado na Universidade Federal de Uberlândia (UFU), além de cientista pesquisador no Laboratório de Distribuição de Energia Elétrica (LADEE). Suas áreas de interesse são: distribuição e qualidade da energia elétrica, filtros ativos, eletrônica de potência e sistemas elétricos de potência.



Guilherme Leal Xavier, nascido em Serra do Salitre - MG, é engenheiro eletricitista (2007) e mestre (2012) pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e professor assistente na Universidade Federal de Viçosa (UFV), *campus* Rio Paranaíba. Atualmente, é doutorando e atua como pesquisador no Laboratório de Distribuição de Energia Elétrica (LADEE). Tem como áreas de interesse: distribuição e qualidade da energia elétrica.



Hélio Rubens Jacob da Silva, é engenheiro eletricitista (2015) pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Atualmente, é pesquisador e mestrando no Laboratório de Distribuição de Energia Elétrica na mesma instituição. Suas áreas de interesse são: qualidade e distribuição de energia elétrica, instalações elétricas e geração de energia fotovoltaica.



Lara de Lima Braz, é engenheira eletricitista (2017) pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Minas Gerais. Atualmente, cursa mestrado em Engenharia Elétrica na UFU, desenvolvendo atividades de pesquisa e desenvolvimento no Laboratório de Distribuição de Energia Elétrica (LADEE). Suas áreas de interesse são: perdas técnicas na distribuição de energia elétrica, distribuição e qualidade da energia elétrica.



Raphael Ferreira Barata de Oliveira, é engenheiro eletricitista (2014) pela Universidade do Alabama em Huntsville. Atualmente aluno da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) para validação de diploma obtido no exterior. Atua como pesquisador no Laboratório de Distribuição de Energia Elétrica (LADEE). Suas áreas de interesse são: qualidade da energia

elétrica, máquinas elétricas, acionamentos elétricos, processamento digital de sinais.



Rodrigo Nobis da Costa Lima, é engenheiro eletricitista (2014) e mestre (2017) em Engenharia Elétrica pela Universidade de Uberlândia. Atualmente, é doutorando na Universidade Federal de Uberlândia. Suas áreas de interesse são: distribuição e transmissão de energia elétrica, qualidade da energia elétrica e sistema de energia.



José Rubens Macedo Jr., graduado em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia (1997), mestrado pela mesma instituição (2002) e doutorado em engenharia elétrica pela Universidade Federal do Espírito Santo (2009). Desenvolveu seu pós-doutorado no Worcester Polytechnic Institute, Massachusetts, Estados Unidos (2015). Atualmente é professor da Faculdade de Engenharia Elétrica junto à Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e pesquisador do Laboratório de Distribuição de Energia Elétrica (LADEE).