



XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica

SENDI 2008 - 06 a 10 de outubro

Olinda - Pernambuco - Brasil

Análise de Técnicas de Medição do Fator de Potência na Presença de Harmônicos

José Eduardo da Rocha

Alves Jr

CEPEL

alves@cepel.br

Marcos Riva Suhett

CEPEL

marcosrs@cepel.br

Edson Hirokazu Watanabe

COPPE/UFRJ

watanabe@coe.ufrj.br

Palavras-chave

Fator de Potência

Harmônicos

Medição

Resumo

O presente trabalho apresenta a análise das principais técnicas de medição de fator de potência empregadas pelos medidores eletrônicos na presença de harmônicos. Os medidores de energia são projetados para operar com uma única frequência nominal de 50/60Hz. Entretanto, a presença cada vez maior de cargas não-lineares faz com que os níveis de distorção harmônica no sistema elétrico sejam de tal ordem que interfiram no correto funcionamento dos equipamentos elétricos. São analisadas duas técnicas de medição normalmente utilizadas pelos medidores eletrônicos: técnica do triângulo de potências e técnica do deslocamento de noventa graus. São analisados os erros de medição de fator de potência na presença de harmônicos quando os valores fundamentais de tensão e corrente são utilizados como referência. A partir de resultados obtidos com experimentos práticos em medidores de energia comerciais, confirmou-se que os medidores eletrônicos são afetados pelos harmônicos em maior ou menor escala conforme amplitude de harmônicos injetada. Conclui-se que a falta de padronização do comportamento dos medidores eletrônicos na presença de harmônicos faz com que os consumidores de energia possam estar sendo penalizados pela distorção harmônica em seus estabelecimentos.

1. Introdução

O fator de potência é o indicador utilizado pelas concessionárias de energia elétrica para avaliar a ocupação supérflua dos condutores requerida pelas correntes das cargas [2]. No Brasil, os consumidores de energia podem ser penalizados com acréscimo de tarifa se o fator de potência apresentado por suas cargas for menor que o limite mínimo de 0,92, imposto por resolução [2]. É importante esclarecer que o valor que a concessionária fatura está associado à energia ativa que seria suprida pelo sistema caso o fator de potência estivesse acima de 0,92 e não à energia reativa propriamente dita.

A ocorrência de cargas não lineares é freqüente no sistema elétrico. Estas cargas provocam o aparecimento de harmônicos, múltiplos da freqüência fundamental, na corrente e conseqüentemente na tensão. Podem ser destacados equipamentos chaveados tais como retificadores, inversores,

compensadores estáticos de reativos, dentre outros como exemplos de geradores de harmônicos. Transformadores também podem ser responsabilizados pela geração de harmônicos, uma vez que a corrente de excitação possui conteúdo harmônico significativo [3]. Do lado da carga, lâmpadas compactas, fontes chaveadas de computadores e outros equipamentos em geral também contribuem significativamente para a presença de correntes harmônicas em sistemas de distribuição de energia elétrica.

As implicações de formas de onda não-senoidais na distribuição de energia elétrica já foram verificadas na literatura [4, 5, 6, 13]. As correntes harmônicas que circulam no sistema elétrico podem provocar as seguintes influências [3]: sobrecargas, sobretensões, interferências em equipamentos, aumento das perdas elétricas, aumento do fluxo de potência reativa, aumento da queda de tensão, funcionamento inadequado dos sistemas de proteção e controle, abertura indevida de disjuntores. Normas internacionais como IEEE 519-1992 [7] e IEC 61000-2-6 [8] mencionam alguns dos efeitos indesejáveis devido à presença de harmônicos na rede elétrica, tais como sobreaquecimentos de transformadores, correntes excessivas nos condutores de neutro e interferências nos sistemas de comunicação. A norma IEEE 519-1992 [7] recomenda práticas a serem adotadas tanto pelo consumidor como pela concessionária, incluindo a rede de distribuição de baixa tensão até a rede de transmissão de alta tensão. Já a norma IEC 61000-3-2 [9] especifica limites para equipamentos conectados à rede de baixa tensão somente.

Dentre os componentes que podem ser influenciados por poluição harmônica, destacam-se os medidores de energia utilizados para fins de faturamento. A medição de energia elétrica garante um sinal econômico para o consumidor o que permite um retorno correto com relação ao consumo elétrico levando na maior parte dos casos à melhoria da eficiência na utilização deste recurso.

Os conceitos de potência aparente e reativa pressupõem sistemas com tensões e correntes perfeitamente senoidais com cargas lineares associadas. Os medidores destas grandezas foram projetados para trabalhar sob estas condições. Desta forma, eles são calibrados e testados sob condições senoidais. Os medidores eletrônicos podem empregar diversas técnicas para a medição de potência reativa e fator de potência [1, 10, 11]. Todas estas técnicas estão baseadas na premissa de que as tensões e correntes a serem medidas são perfeitamente senoidais. Quando esta premissa não é satisfeita, ou seja, em função das tensões e/ou correntes não senoidais, esses instrumentos podem apresentar desvios (erros) de medição que podem ou não ser superiores aos estabelecidos na legislação e normalização vigentes [12, 13]. Isso pode acarretar em prejuízos financeiros para os consumidores ou para as concessionárias de energia elétrica [12, 13, 14].

Com relação à normalização do assunto, a norma metrológica internacional IEC 62053-23 [15] é uma norma específica para medidores estáticos de energia reativa. Esta norma afirma explicitamente que os efeitos das distorções harmônicas são completamente ignorados. As normas metrológicas nacionais NBR 14519 [16], NBR 14520 [17] e NBR 14521 [18] não tratam de forma separada os medidores de energia ativa e reativa e definem apenas um ensaio de 3º harmônico, com THDi (Distorção Harmônica Total de Corrente) menor que 1%. O Regulamento Técnico Metrológico vigente, que se refere à Portaria Inmetro N.º 431 de 04 de dezembro de 2007 [19], trata tanto os medidores de energia ativa quanto os medidores de energia reativa sendo que não define ensaios com harmônicos para os medidores de energia reativa.

Estudos sobre o comportamento de medidores de potência reativa eletrônicos em situações não-senoidais já foi descrito na literatura [12, 13]. Contudo, não se achou um mapeamento abrangente dos vários algoritmos possíveis de medição de potência reativa sob situações não-senoidais. Este trabalho propõe apresentar o comportamento de alguns dos principais algoritmos de medição de potência reativa e fator de potência de medidores eletrônicos sob condições não-senoidais. Procurar-se-á demonstrar o impacto destas diferentes técnicas de medição de potência reativa levando-se em consideração condições de referência senoidais.

2. Definições de Potências Elétricas

A definição tradicional de potência elétrica se baseia na definição de que o sistema elétrico foi projetado para operar com uma única frequência, a frequência fundamental de 60 ou 50 Hz. Segundo esta definição [20], a corrente que flui para uma carga na frequência fundamental (com valor eficaz I_1) pode ser decomposta em duas parcelas: a corrente ativa (I_p) e que contribui integralmente para o trabalho desenvolvido na carga e a corrente reativa (I_q) que não contribui para o trabalho sobre a carga. A relação entre estas correntes é dada por:

$$I_1 = \sqrt{I_p^2 + I_q^2} \quad (1)$$

A corrente ativa é a responsável pela potência ativa sobre a carga, dada por:

$$P_1 = V_1 I_1 \cos \phi_1 \quad (2)$$

onde V_1 , I_1 e ϕ_1 são definidos como o valor eficaz da tensão fundamental, o valor eficaz da corrente fundamental e o ângulo de defasagem entre eles, respectivamente. O termo $\cos(\phi_1)$ é definido como fator de potência fundamental e mede a eficácia da transmissão de energia elétrica.

A corrente reativa fundamental é a responsável pela potência que não se transforma em trabalho sobre a carga, esta potência reativa fundamental é definida por:

$$Q_1 = V_1 I_1 \sin \phi_1 \quad (3)$$

Aqui se deve notar que os harmônicos também [26, 27] não produzem trabalho útil na carga, e não são considerados na legislação vigente [2].

A presença de uma corrente que não contribui para geração de trabalho é altamente indesejável em um sistema elétrico porque exige dos cabos condutores uma seção de cobre maior que a necessária para a transmissão da potência útil. Além disso, a presença desta corrente faz com que as especificações de potência de equipamentos tais como transformadores sejam aumentadas, elevando o custo de distribuição de energia elétrica. A potência aparente fundamental seria o caso hipotético da potência máxima caso se conseguisse a maior eficácia possível no sistema, ou seja, o maior valor possível da potência ativa ou $\cos(\phi_1) = 1$, sendo definida como:

$$S_1 = V_1 I_1 \quad (4)$$

Pode-se demonstrar ainda que a potência aparente fundamental e o fator de potência fundamental também podem ser expressos por:

$$S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} \quad (5)$$

$$\text{fp}_1 = \frac{P_1}{S_1} \quad (6)$$

Os primeiros trabalhos que evidenciaram o fato de que a potência oscilante trocada entre a fonte de tensão alternada e a carga, em um circuito monofásico, é causada pelo ângulo de defasagem entre as formas de onda da tensão e da corrente surgiram em 1888 [21], como citado em [6]. Estes trabalhos não levam em consideração a possível presença de harmônicos no sistema elétrico, ocasionados por cargas não-lineares. Hoje em dia, o crescente uso de cargas não lineares contribui para a deformação das formas de onda de tensão e corrente do sistema elétrico. Alguns autores, diante de tal problema, se dispuseram a estudar teorias de potências elétricas, que contemplam a presença do conteúdo harmônico, com o objetivo de estabelecer as definições básicas para tal situação [6, 22, 23, 24, 25]. A grande discussão entre as diferentes definições pode ser resumida pela falta do senso comum com relação à natureza “reativa” da potência reativa. Alguns autores a consideram relacionada à oscilação da energia [22, 24]. Outros a consideram relacionada com o método de compensação [23, 25].

Em geral, não existe um consenso entre os engenheiros de qual é a solução ideal para o problema de harmônicos no sistema elétrico. A solução mais simples seria a filtragem de todos os harmônicos

do sistema para que somente a frequência fundamental, de 60 Hz ou 50 Hz, se mantivesse presente. Esta situação é a mais desejável uma vez que os harmônicos são identificados como poluição do ponto de vista da Qualidade de Energia. Entretanto, a eliminação dos harmônicos de um sistema elétrico de grande porte, como o sistema brasileiro, pode enfrentar barreiras econômicas que a tornariam inviável uma vez que os equipamentos geradores de harmônicos, como lâmpadas fluorescentes, computadores e etc., teriam seus custos aumentados consideravelmente com a adição de filtro para os harmônicos ou a utilização de retificadores do tipo “active front-end”, onde os harmônicos são eliminados ativamente, ou seja, por retificadores baseados em IGBT ou MOSFET [27].

3. Técnicas de Medição do Fator de Potência

Os medidores de energia podem ser eletromecânicos ou eletrônicos. Os métodos de medição de energia reativa por medidores eletromecânicos não serão estudados neste trabalho.

Os medidores eletrônicos comerciais surgiram nas décadas de 70/80, inicialmente com circuitos discretos [1]. Posteriormente, desenvolveram-se medidores com DSP's (Processador Digital de Sinais), e, finalmente, com circuitos integrados dedicados. Verifica-se cada vez mais a penetração dos medidores eletrônicos devido às seguintes características: melhor exatidão, maior estabilidade com relação à medição, agregação de funções adicionais, tais como dupla tarifa em demanda de energia, telemedição, etc. Estudar-se-ão neste trabalho as técnicas de medição de potência reativa usando-se medidores eletrônicos.

Dentre as técnicas identificadas para medição de potência reativa em medidores eletrônicos, encontra-se a técnica do triângulo de potências, a técnica do deslocamento de noventa graus e a técnica de transformada de Fourier. Neste trabalho apresentar-se-ão a técnica do triângulo de potências e a técnica do deslocamento de noventa graus.

3.1 Técnica do Triângulo de Potências

A técnica do “Triângulo de Potências” calcula a potência reativa e o fator de potência usando:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (7)$$

$$\text{fp} = \frac{P}{S} \quad (8)$$

Estas expressões partem do pressuposto de que os sinais de tensão e corrente são perfeitamente senoidais. Esta técnica é dependente do cálculo da potência aparente e do cálculo da potência ativa. Quando os sinais de tensão e corrente não são perfeitamente senoidais, eles possuem harmônicos e o cálculo das grandezas pode modificar o resultado da potência reativa devido a mudanças nos resultados da potência ativa e da potência aparente.

No caso da potência ativa, os medidores podem contabilizar o resultado segundo:

$$P = P_1 + P_H = V_1 I_1 \cos \varphi_1 + \sum_{k \neq 1} V_k I_k \cos \varphi_k, \quad (9)$$

onde P_1 é a potência ativa fundamental, P_H é a potência ativa devido aos harmônicos, V_k é a tensão eficaz devido ao k -ésimo harmônico e I_k é a corrente eficaz devido ao k -ésimo harmônico. Observa-se que a potência ativa total pode ser maior que aquela devida apenas à fundamental.

Com relação à potência aparente, o cálculo pode ser baseado nas definições contidas no documento “IEEE Working Group on Nonsinusoidal Situations: Effects on Meter Performance and Definition of Power, norma IEEE 1459:2000 [24]”. O ponto de partida destas definições é supor a tensão e corrente eficazes totais como:

$$V^2 = V_1^2 + \sum_{h \neq 1} V_h^2, \quad (10)$$

$$I^2 = I_1^2 + \sum_{h \neq 1} I_h^2. \quad (11)$$

O cálculo da potência aparente então seria dado por:

$$S = VI \quad (12)$$

Segundo o documento, a potência aparente seria expressa por:

$$S^2 = S_1^2 + S_N^2 \quad (13)$$

onde S_1 é a potência aparente fundamental e S_N é a potência aparente devido aos harmônicos. Observa-se que a potência aparente total pode ser maior que a fundamental.

A partir das equações apresentadas acima, realizou-se a análise do fator de potência com relação à injeção harmônica. O fator de potência pode ser calculado por (8) com a potência aparente dada por (12). Devido ao fato de a potência ativa e a potência aparente variarem com relação aos harmônicos, o fator de potência também variará. Para apresentar quantitativamente o fato exposto, adotou-se para as condições de simulação um sistema com $V_1 = 1$ pu e $I_1 = 1$ pu. Nestas simulações procedeu-se a inclusão de distorções harmônicas V_n e I_n somente em uma frequência e com defasagem zero ($\phi_n = 0$). As distorções harmônicas injetadas podem ser de qualquer ordem uma vez que os resultados apresentados sempre serão os mesmos. As amplitudes de V_n e I_n estão em porcentagem de V_1 e I_1 , respectivamente.

A Figura 1 apresenta curvas mostrando alguns valores do fator de potência total em função de THDv e THDi para um sistema onde o fator de potência fundamental é unitário. Observa-se que à medida em que THDv e THDi aumentam o fator de potência total diminui.

Verificou-se ainda que quanto menor o fator de potência fundamental, os níveis de harmônicos de tensão e de corrente necessários para fazer o fator de potência se tornar inferior a 0,92 se tornam menores. A Figura 2 apresenta quatro curvas, onde cada curva corresponde a um fator de potência fundamental, e os valores de distorções harmônicas necessárias para baixar o fator de potência total para abaixo de 0,92.

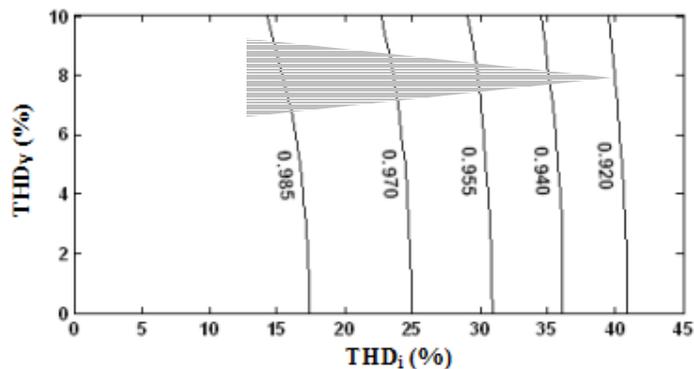


Figura 1 – Variação do fator de potência em função de THDv e THDi quando o fator de potência fundamental é unitário

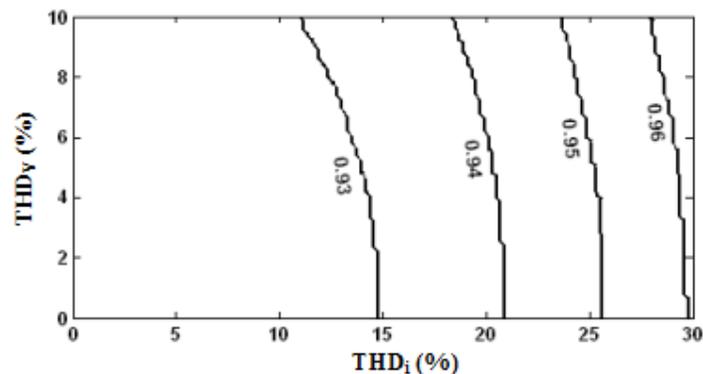


Figura 2 – Combinações de THDv e THDi necessários para reduzir o fator de potência para abaixo de 0,92 tendo como parâmetro o fator de potência fundamental

Pela Figura 2, se um consumidor possuir um fator de potência fundamental de 0,93, qualquer combinação de THDv e THDi que se posicione à direita da curva 0,93 (primeira curva à esquerda), o fator de potência total cairá para abaixo do limite 0,92. Neste caso, o consumidor poderá ser penalizado por causa da redução do seu fator de potência ocasionada pela presença de componentes harmônicos. O mesmo se aplica às outras curvas da figura. Observa-se que quanto maior o fator de potência fundamental, maiores THDv e THDi são necessários para baixar o fator de potência total para um valor abaixo do limite 0,92.

3.2 Técnica do Deslocamento de Noventa Graus

Esta técnica caracteriza-se pelo deslocamento de noventa graus de um dos sinais de entrada. O deslocamento pode ser realizado tanto no sinal de tensão quanto no sinal de corrente. Por convenção, neste trabalho as análises serão efetuadas com o deslocamento de 90° no sinal de tensão. Em seguida, o sinal deslocado é multiplicado pelo outro sinal, não deslocado, e a potência reativa é obtida integrando-se este resultado.

Calcula-se então a potência reativa a partir de:

$$Q = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v(\theta - \frac{\pi}{2}) i(\theta) d\theta, \quad (14)$$

onde $v(\theta - \pi/2)$ é o sinal de tensão deslocado em noventa graus.

O deslocamento de noventa graus pode ser realizado através de métodos distintos. Identificou-se na literatura [10] alguns métodos utilizados pelos medidores eletrônicos para a realização do deslocamento de noventa graus, dentre os quais deslocamento no tempo, filtragem linear e transformação de Hilbert. Os métodos podem ser implementados analogicamente, com circuitos baseados em amplificadores operacionais e também digitalmente. No caso digital, são realizados com microprocessadores ou DSP's ou ainda, atualmente, circuitos integrados dedicados são utilizados.

Utilizando-se a técnica do deslocamento de 90° no tempo para calcular a potência reativa, o fator de potência calculado segundo (9) pode sofrer variações positivas ou negativas dependendo da ordem dos componentes harmônicos presentes nos sinais de tensão e corrente. O valor da potência reativa apresentada por esta técnica é dado por:

$$Q = Q_1 + \sum_{n=2}^{\infty} Q_n, \quad (15)$$

onde Q_n é expresso por:

$$Q_n = V_n I_n \cos(\phi_n - n \frac{\pi}{2}). \quad (16)$$

Observa-se que o valor de Q_n pode ser maior ou menor que zero conforme o sinal do termo em cosseno. Este fato provoca impacto diverso sobre o fator de potência calculado pelo medidor.

A partir das variações da potência ativa apresentadas, efetuou-se o estudo do fator de potência tomando-se como ponto de partida o fator de potência fundamental de 0,92. Variando-se a amplitude de V_n entre 0% a 10% de V_1 e a amplitude de I_n entre 0% a 30% de I_1 , obtém-se o fator de potência, de acordo com (9), para o caso onde os componentes harmônicos estão em fase ($\phi_n = 0$). Foram realizadas simulações para os harmônicos de ordem $n = 2, 3$ e 4 , aplicados de forma individual. A Figura 3 apresenta os resultados obtidos para os componentes harmônicos de ordem $n = 2$, a Figura 4 para a ordem $n = 3$ e a Figura 5 para a ordem $n = 4$.

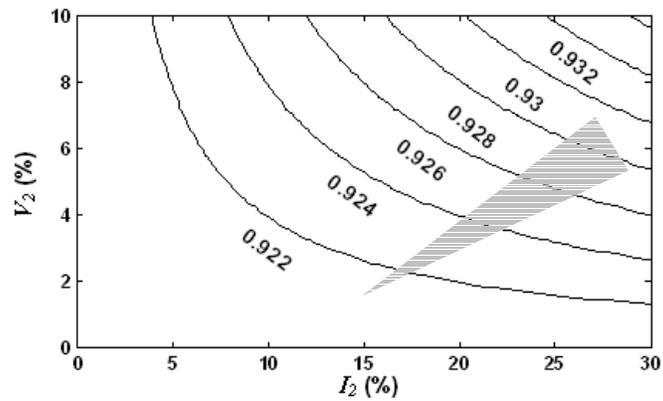


Figura 3 – Variação do fator de potência total a partir da injeção de componentes harmônicos de ordem 2

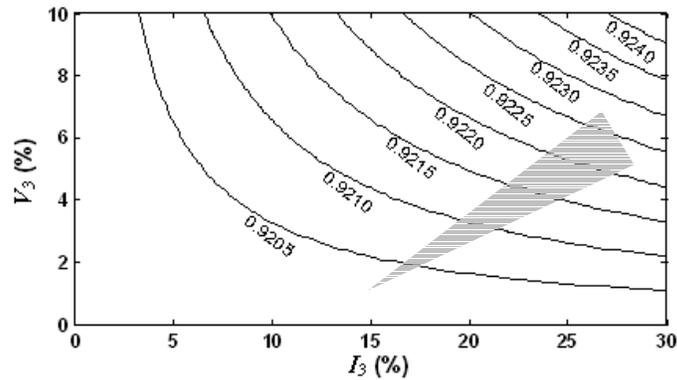


Figura 4 – Variação do fator de potência total a partir da injeção de componentes harmônicos de ordem 3

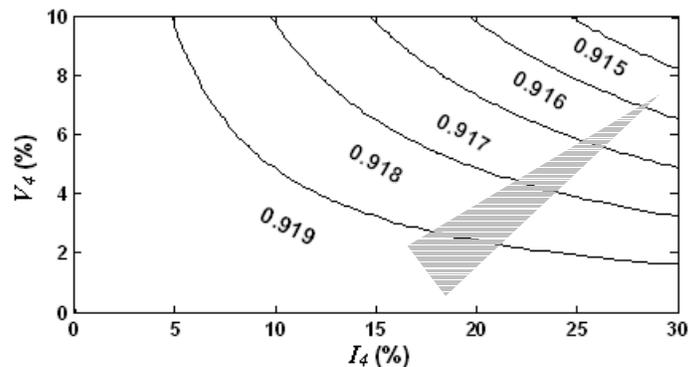


Figura 5 – Variação do fator de potência total a partir da injeção de componentes harmônicos de ordem 4

Observa-se que o fator de potência pode aumentar ou diminuir conforme a ordem do harmônico. No caso do harmônico de ordem 3, apesar do termo Q_n ser nulo, o fator de potência aumenta uma vez que o valor da potência ativa total aumenta a partir da contribuição dos componentes harmônicos em fase.

4. Resultados Experimentais

Alguns medidores de energia eletrônicos foram ensaiados com o objetivo de comparar seus resultados com as análises teóricas apresentadas. Os experimentos práticos estão divididos em duas etapas distintas.

- A primeira etapa consiste na aplicação de uma componente harmônica de ordem n nos medidores de energia eletrônicos ensaiados. O objetivo desta etapa é a verificação dos erros apresentados pelos medidores eletrônicos e quais os níveis de distorção harmônica que fazem com que os medidores ensaiados apresentem resultados fora de sua classe de exatidão.
- A segunda etapa de ensaios consistiu na aplicação de uma carga real, constituída de 20 lâmpadas fluorescentes compactas, e uma fonte de tensão do laboratório em dois medidores de energia eletrônicos. O objetivo desta etapa é verificar a variação dos resultados apresentados pelos medidores quando são utilizadas cargas com alta distorção harmônica.

Os medidores de energia ensaiados possuem a exteriorização de algumas grandezas elétricas como tensão e corrente eficazes, potências ativa, potência reativa, potência aparente, fator de potência, energia ativa e energia reativa. Uma vez que a utilização dos valores de energia reativa demandaria um longo tempo de utilização da bancada de testes, os ensaios foram realizados em regime permanente e os valores de potência foram utilizados. A estabilidade dos geradores de tensão e de corrente utilizados é muito melhor que a classe de exatidão dos medidores (0,02%), confirmando a validade desta abordagem. Caso necessário, os valores de energia poderiam ser obtidos integrando-se os valores de potências apresentados em um determinado período de tempo. Todos os medidores eletrônicos utilizados foram calibrados e apresentaram erros de potência ativa e reativa dentro de suas classes de exatidão para os ensaios descritos pelo RTM [19].

4.1 Erros Apresentados para Injeção de Harmônicos

A primeira etapa de ensaios consistiu na aplicação de componentes harmônicos nos sinais de tensão e corrente em medidores de energia eletrônicos. Compara-se o valor da potência reativa obtida com o valor esperado da potência reativa fundamental.

Três medidores foram utilizados:

- Medidor A: trifásico com classe de exatidão de 0,02 % para energia ativa;
- Medidor B: trifásico de medição indireta. A classe de exatidão é de 0,2% para energia ativa;
- Medidor C: trifásico de medição indireta. A classe de exatidão é de 0,2% para energia ativa.

A bancada de teste constitui-se de uma mesa de calibração de medidores de energia com exatidão equivalente a do medidor A. A mesa de calibração é formada por um padrão de potências e duas fontes independentes de tensão e corrente. Esta configuração permite a programação de formas de ondas diversas para a fonte de tensão e para a fonte de corrente.

O arranjo usado durante a primeira etapa dos ensaios é apresentado pela Figura 6. As fontes de tensão pertencem à mesa de calibração de medidores de energia e são sincronizadas entre si. No entanto, os valores de tensão e de corrente, tanto fundamental, como de harmônicos são independentes. Uma vez que os medidores eletrônicos ensaiados são de ligação indireta, as fontes de tensão e corrente da mesa de calibração são ligadas de forma independente. A fonte de corrente forma uma malha fechada com os circuitos de corrente dos medidores ligados em série e a fonte de tensão é ligada em paralelo com os circuitos de tensão dos medidores ensaiados.

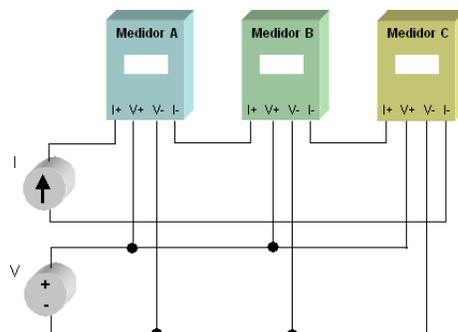


Figura 6 - Arranjo utilizado para o ensaio dos três medidores eletrônicos

Aplicou-se nos medidores eletrônicos componentes harmônicos, em apenas uma ordem, variando a amplitude dos componentes e o fator de potência fundamental. Os valores dos componentes harmônicos estão em porcentagem de seus respectivos componentes fundamentais. Os valores de fp , P e S são os valores de fator de potência, potência ativa e potência reativa apresentados pelos medidores. O valor de fp_1 é o valor do fator de potência teórico calculado a partir dos valores fundamentais de tensão e corrente. São analisados os erros entre os valores de fator de potência apresentados pelos medidores e os valores de fator de potência fundamentais. A Tabela 1 apresenta os fatores de potência apresentados pelos medidores A, B e C quando injetados componentes harmônicos, de qualquer ordem, na tensão e na corrente.

Tabela 3 – Fatores de potência apresentados pelos medidores A, B e C ensaiados

V_n (%)	I_n (%)	fp_1	fp A	fp B	fp C
3	15	0,93	0,92	0,920	0,9198
3	18	0,94	0,93	0,927	0,9260
3	24	0,94	0,91	0,913	0,9130

Verifica-se que os três medidores ensaiados apresentaram resultados compatíveis com as análises efetuadas uma vez que os fatores de potência apresentados foram menores que 0,92, para a situação onde o fator de potência fundamental é de 0,94 com uma distorção harmônica de 3% na tensão e de 24% na corrente.

4.2 Erros Apresentados para Carga Real

A primeira etapa de ensaios foi realizada através da geração das formas de ondas de tensão e corrente através de fontes independentes de tensão e corrente. Contudo, os ensaios de injeção de alguns componentes harmônicos, se de um lado permitem um fiel entendimento do problema, do outro não são suficientes para se chegar a uma conclusão sobre o comportamento dos medidores em uma situação real. Para tanto, uma segunda etapa de ensaios foi realizada com a aplicação de cargas reais.

A carga utilizada é composta de 20 lâmpadas fluorescentes compactas comuns encontradas normalmente no mercado. Todas as lâmpadas são do mesmo fabricante e o conjunto é formado por lâmpadas de diversos tamanhos e potências divididas pela seguinte forma: 2 Lâmpadas de 25W, 7 Lâmpadas de 20W, 7 Lâmpadas de 15W e 4 Lâmpadas de 11W.

A potência nominal total das lâmpadas é de 339 W. Dois medidores de energia foram utilizados neste ensaio: o medidor C da primeira etapa de ensaios e o medidor D. O medidor D possui as seguintes características: trifásico, medição indireta e uma classe de exatidão de 1%.

A Figura 7 apresenta o diagrama elétrico de ligação dos medidores ensaiados. A fonte de tensão utilizada foi uma tomada de alimentação genérica do laboratório.

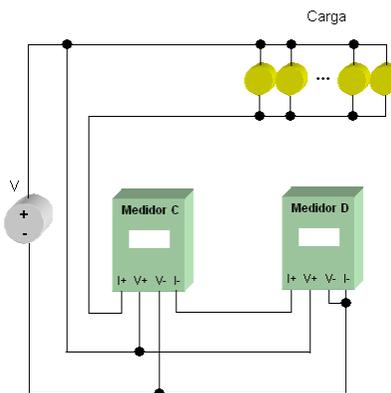


Figura 7 – Arranjo utilizado na segunda etapa de ensaios

A forma de onda dos sinais de tensão e corrente aplicados nos medidores de energia é apresentada na Figura 8.

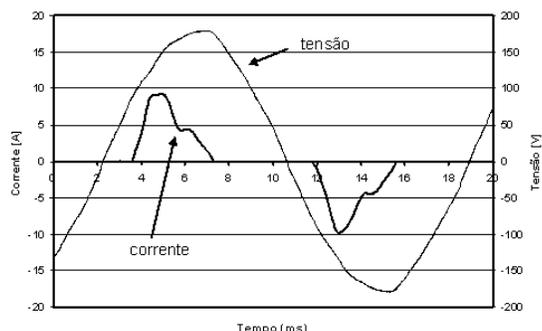


Figura 8 – Forma de onda da tensão e corrente aplicadas no ensaio

Procedeu-se uma decomposição harmônica das formas de onda de corrente e de potencial. Para isto usou-se um sistema de aquisição de dados baseado em osciloscópio digital. Estimou-se a incerteza das medidas em 2% após a calibração do sistema.

A Figura 9 apresenta a decomposição harmônica da forma de onda da corrente até a 13ª ordem. Calculou-se o THD_V de 2% para a tensão e a forma de onda da corrente apresentou um THD_I de 79%.

A partir da análise harmônica das tensões e correntes chegou-se ao resultado de que o fator de potência fundamental calculado do ensaio é 0,88 e a potência reativa fundamental é equivalente a 178 var. Como este último parâmetro é resultado da multiplicação de V_1 , I_1 e o seno do ângulo entre eles, com todas estas grandezas apresentando incerteza de 2%, estima-se que a incerteza do valor de potência reativa seja de 6%. A incerteza no fator de potência está relacionada à incerteza na base de tempo do osciloscópio e estima-se ser menor que 2%.

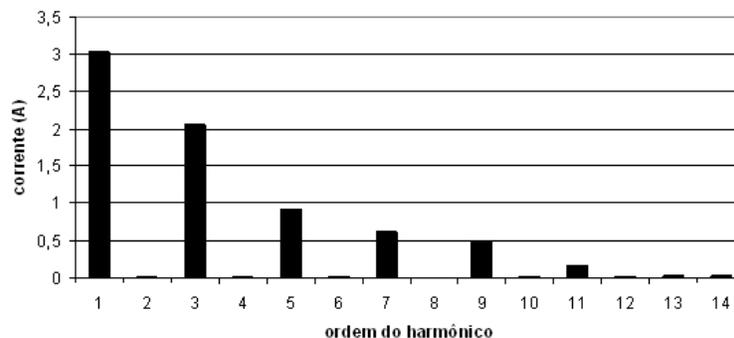


Figura 9 – Decomposição harmônica da corrente

Os resultados apresentados pelos dois medidores ensaiados estão listados na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados apresentados pelos medidores na segunda etapa de ensaios.

	P (W)	Q (var)	S (VA)	fp
Medidor C	328	186	501	0,66
Medidor D	320	370	500	0,65

Verifica-se que o fator de potência dos dois medidores está com um erro de -25% com relação ao fator de potência fundamental. Supondo que os medidores realizariam o cálculo do fator de potência a partir de (8), o valor obtido para medidores C e D seria 0,65 e 0,64, respectivamente, que está próximo

dos valores medidos com erro da ordem de 2%. Isto indica que estes medidores exteriorizam o fator de potência total e não o fundamental.

Devido às incertezas envolvidas, não é possível afirmar que o medidor C está fora da classe para potência reativa. Contudo é possível afirmar que o medidor D está fora da classe de exatidão para esta grandeza. Verifica-se também que ambos os medidores utilizam técnicas distintas para o cálculo da potência reativa, conseqüentemente os resultados apresentados são divergentes.

5. Conclusões

O presente trabalho apresentou um estudo sobre a medição do fator de potência por medidores eletrônicos em condições não-senoidais. Foram descritas as principais técnicas de medição utilizadas pelos medidores eletrônicos projetadas para trabalhar sob condições senoidais. Quando submetidos a condições harmônicas, os medidores podem divergir do fator de potência fundamental uma vez que estes não foram projetados para trabalhar sob tais condições. Analisaram-se os erros de medição do fator de potência em condições não-senoidais tomando-se como referência os componentes fundamentais de tensão e corrente.

Foram realizados experimentos práticos em alguns exemplares de medidores comerciais eletrônicos e verificaram-se os níveis de distorção harmônica necessários para que o fator de potência medido fosse inferior a 0,92. A partir dos resultados experimentais, verificou-se também que os medidores ensaiados utilizam os valores eficazes de tensão e corrente para calcular o fator de potência. A partir de experimentos com cargas reais de lâmpadas, verificou-se que os medidores ensaiados apresentaram valores diferentes entre si para a potência reativa, chegando a apresentar uma variação de mais de 100 % com relação à potência reativa fundamental. Verificou-se também que todos os medidores ensaiados apresentaram um fator de potência 25% menor que o fator de potência fundamental da carga real.

A presença de harmônicos nas redes de baixa tensão, somada à falta de padronização dos medidores eletrônicos de energia reativa e fator de potência, faz com que os consumidores de energia possam estar sendo medidos de forma diferenciada uma vez que diferentes medidores eletrônicos apresentam diferentes resultados para a mesma condição harmônica. Neste caso, um determinado consumidor pode estar sendo penalizado por um baixo fator de potência que está sendo causado pela distorção harmônica em sua rede.

Face aos resultados obtidos propõe-se o estudo teórico e prático sobre a influência das formas de ondas mais usuais sobre os medidores eletrônicos com o objetivo de prover subsídios para a criação de ensaios de normalização do comportamento dos medidores eletrônicos de potência reativa na presença de harmônicos.

5. Referências Bibliográficas

- [1] EDSON ELECTRIC INSTITUTE. Handbook for Electricity Metering. Washington DC, 2002.
- [2] ANEEL. Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica. Resolução ANEEL N. 456/2000, 2000.
- [3] MAMEDE FILHO, J. Proteção de Equipamentos Eletrônicos Sensíveis. Editora Érica Ltda., São Paulo, 1997.
- [4] EMANUEL, A. Energetical Factors in Power Systems with Nonlinear Loads. Archiv fur Electrotechnik, 1977, p. 59
- [5] LYON, W.V. Reactive Power and Unbalanced Circuits". Electrical World, vol. 75, no. 25, 1920, pp. 1417-1420
- [6] EMANUEL, A. Powers in Nonsinusoidal Situations – A Review of Definitions and Physical Meaning. IEEE Trans. Power Delivery, July 1991.

- [7] IEEE. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. IEEE Standard 519-1992, 1993.
- [8] IEC. Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 2: Environment – Section 6: Assessment of the Emission Levels in the Power Supply of Industrial Plants as Regards Low-Frequency Conducted Disturbances. IEC 61000-2-6 First edition, Geneva, 1995.
- [9] IEC. Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 3-2: Limits – Limits for Harmonic Current Emissions (Equipment Input Current < 16A per phase). IEC 61000-3-2, Geneva, 2001.
- [10] MOULIN, E. Measuring Reactive Power in Energy Meters. Metering International, issue 1, 2002, p. 54.
- [11] DE MEDEIROS, F. Sólon. Medição de Energia Elétrica. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora, Rio de Janeiro, 1997.
- [12] BALTHAZAR, M. Q. F. Medidores de Watt-hora Eletrônicos na Presença de Harmônicos: Análise e Testes Preliminares. Tese de Mestrado – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.
- [13] OLIVEIRA, José Gil, FAGÁ, Murilo Tadeu. Medidores de Energia Elétrica na Presença de Harmônicos. Eletricidade Moderna, 1999, pp. 312-324.
- [14] BAGGOT, A. J. The effects of waveshape distortion on the measurement of energy by tariff meters. International Conference on Sources and Effects of Power System Disturbances, 1974, pp. 261-267.
- [15] IEC. Static Meters for Reactive Energy – Classes 2 and 3. IEC Standard 62053-23, Janeiro, 2003.
- [16] ABNT. Medidores Eletrônicos de Energia Elétrica – Especificação. Norma NBR 14519, 2000.
- [17] ABNT. Medidores Eletrônicos de Energia Elétrica – Método de Ensaio. Norma NBR 14520, 2000.
- [18] ABNT. Medidores Eletrônicos de Energia Elétrica – Procedimentos. Norma NBR 14521, 2000.
- [19] INMETRO. Regulamento Técnico Metrológico. Portaria Inmetro N. 431, 2007.
- [20] STEVENSON JR., W.D., Elements of Power System Analysis, 4a Edição, Mc. Graw-Hill Book Company, 1982.
- [21] STANLEY, W. Phenomena of Retardation in Induction Coil. American Institute of Electrical Engineers, Vol. V, N. 4, 1888.
- [22] BUDEANU, C. I. Reactive and Fictitious Powers. Rumanian National Institute, N. 2, Bucharest, 1927.
- [23] FRYZE, S. Active, reactive, and apparent power in circuits with non-sinusoidal voltage and current. Elektrotechnische Zeitschrift, vol. 53, 1932.
- [24] IEEE. Trial-use Standard Definitions for the Measurement of Electrical Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions. IEEE Standard 1459-2000, 2000.
- [25] CZARNECKI, L., SWIETLICKI, T. Powers in Nonsinusoidal Networks: Their Interpretation, Analysis and Measurement. IEEE Trans. on Instr. and Meas., 1990.
- [26] SUHETT, M. R. Análise de Técnicas de Medição de Potência Reativa em Medidores Eletrônicos. Tese de Mestrado – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2008.
- [27] AGAKI, H., WATANABE, E. H., AREDES, M. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning. IEEE PRESS, Wiley-Interscience, Nova Jersey, 2007.