

SENDI 2004

XVI SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

CT 7: MEDIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Medidores de Watt-Hora Eletrônicos na Presença de Harmônicos: Análise e Testes Preliminares

M. Q. F Balthazar J. E. R. Alves Jr.
CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia
Elétrica
Caixa Postal: 68007
CEP 21944-970 - Rio de Janeiro - RJ - Brasil

E. H. Watanabe
Universidade Federal do Rio de Janeiro
Caixa Postal 68504
CEP 21941-972 - Rio de Janeiro - RJ -
Brasil

mqfb@cepel.br

alves@cepel.br

watanabe@ufrj.br

Palavras chave: cargas não lineares, harmônicos, medidores de energia elétrica para faturamento, medidores eletrônicos de energia elétrica, tecnologias de medição

RESUMO:

O presente trabalho apresenta análise preliminar teórica e ensaios práticos de medidores eletrônicos de energia elétrica para faturamento na presença de harmônicos. Analisaram-se os conceitos envolvidos para duas técnicas de multiplicação usadas nos medidores eletrônicos comerciais de energia elétrica, multiplicação por divisão no tempo (TDM) e multiplicação digital. Foram realizados experimentos práticos em alguns exemplares de medidores comerciais eletrônicos com a finalidade de verificar o efeito dos componentes harmônicos. Um dos métodos adotados de investigação consistiu na sobreposição sistemática à frequência fundamental, de harmônicos de uma mesma frequência na tensão e na corrente visando ter um mapeamento do comportamento de cada técnica. Estes ensaios realizaram-se tanto em bancada quanto em simulação por computador. Os ensaios confirmaram que os medidores eletrônicos são afetados pelos harmônicos individualmente em maior ou menor escala conforme a magnitude e a frequência injetada.

ABSTRACT

This work presents preliminary analysis and practical tests in static electrical energy revenue meters in the presence of harmonics. Analysis of two multiplication techniques used in static revenue meters: time division multiplication (TDM) and digital multiplication, was done. Practical experiments on commercial static watt-hour meters were conducted in order to check their performance under harmonic situations. One of the investigation methods used consisted on systematic injection of voltage and current harmonic components in addition to the fundamental frequency. These tests were performed in laboratory as well as using computer simulations. Tests have confirmed individual harmonic influence over static meters depending on the amplitude and frequency of the injected harmonic.

1. INTRODUÇÃO

A contínua difusão de cargas não lineares conectadas às redes de distribuição tem contribuído para o aumento da presença de correntes e tensões harmônicas nos sistemas elétricos. Estas cargas provocam mudanças nas formas de onda de tensão e corrente influenciando, em grau variável, o funcionamento dos equipamentos.

Já há uma preocupação a nível nacional com relação ao assunto, sobretudo com relação a reatores eletrônicos de lâmpadas tubulares. Por exemplo a norma NBR 14418¹ já limita a produção de harmônicos desses reatores eletrônicos para lâmpadas tubulares com potência acima de 60 watts.

Como exemplo de distorção harmônica encontrada nas redes de baixa tensão, a Figura 1 apresenta a forma de onda de corrente típica de lâmpadas fluorescentes compactas eletrônicas. Estas podem conter componentes harmônicas maiores que as especificadas por norma.

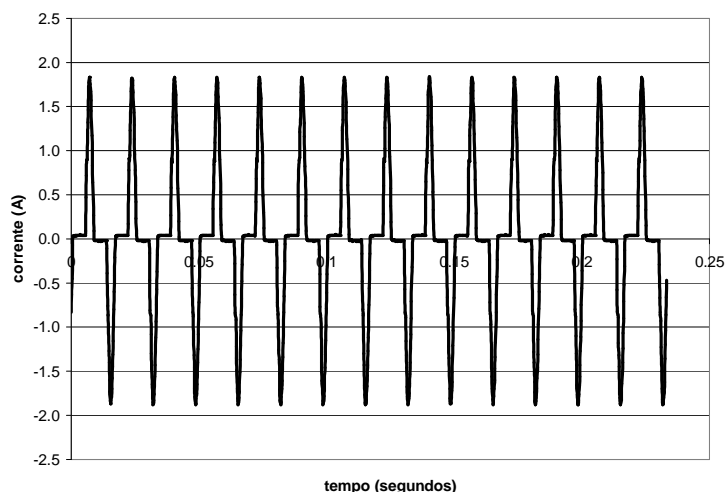


Figura 1 Forma de onda de corrente típica de lâmpadas fluorescentes compactas eletrônicas.

Algumas normas internacionais recomendam que o nível total de distúrbios em diferentes pontos de acoplamento devam ser limitados, entre elas a Norma IEEE 519-1992² que recomenda práticas e limites de distorção da corrente para o consumidor, com o objetivo de se limitar a máxima tensão individual harmônica em até 3%. Os limites são especificados em função do nível de tensão dos sistemas, de 120V a 68kV, até 161kV e maior que 161kV. Já as normas IEC 61000-3-2³ e IEC 61000-3-4⁴ especificam limites para harmônicos de corrente para equipamentos com consumo de até 16A e acima de 16 A, respectivamente.

Face à presença de harmônicos, um dos instrumentos que podem ser afetados pelas distorções harmônicas de tensão e de corrente são os medidores de energia elétrica e, principalmente, os resultados das medidas. As normas de especificação e de testes de tipo dos medidores de energia determinam a sua classe de exatidão nas condições de tensões e correntes puramente senoidais e é nesta condição que eles são

calibrados. No caso de harmônicos, as normas internacionais referentes aos requisitos mínimos de medidores eletrônicos de energia, IEC 62053-21⁵, IEC 62053-22⁶ e NBR 14520⁷, especificam também a sua exatidão somente para o 5º harmônico em uma condição muito específica.

O problema consiste, portanto, no fato de que os ensaios de normas nacionais e internacionais não contemplam de forma completa o comportamento dos medidores de energia na presença de harmônicos. Como consequência, os medidores comerciais de energia não tem seu comportamento completamente mapeado quando há presença de harmônicos na rede elétrica.

Embora exista uma gama razoável de trabalhos publicados estudando os efeitos dos componentes harmônicos de tensão e corrente nos medidores de energia, estes analisam o desempenho dos medidores assumindo-os como uma “caixa preta”, onde as tensões e correntes são as entradas e a energia a saída.

No trabalho de Balthazar⁸ pretendeu-se analisar detalhadamente o efeito dos componentes harmônicos nas medições de energia, porém levando-se em consideração a técnica utilizada dentro da “caixa preta”. Aqui será apresentado o resultado desta análise e dos ensaios práticos realizados em medidores eletrônicos de energia elétrica para faturamento na presença de harmônicos. O método adotado de investigação foi a sobreposição sistemática à frequência fundamental, de harmônicos de uma mesma frequência na tensão e na corrente visando ter um mapeamento do comportamento dos medidores.

Os ensaios confirmaram que os medidores eletrônicos são afetados pelos harmônicos individualmente em maior ou menor escala conforme a magnitude e a frequência injetada e também conforme o tipo de medidor testado.

2. PRINCÍPIOS DE MEDIÇÃO

2.1 Introdução

Um medidor de energia comercial pode ser esquematizado pelo diagrama de blocos como mostrado na Figura 2. Consiste de cinco blocos básicos: dois blocos de transdutores, multiplicador, integrador e registrador. Os transdutores de tensão e corrente adquirem e adequam os sinais a serem multiplicados. A potência instantânea é determinada através do bloco Multiplicador, realizando a multiplicação da medição da tensão e da corrente. A energia é obtida com o bloco Integrador. Finalmente, esta informação de energia é armazenada e registrada no bloco Registrador.

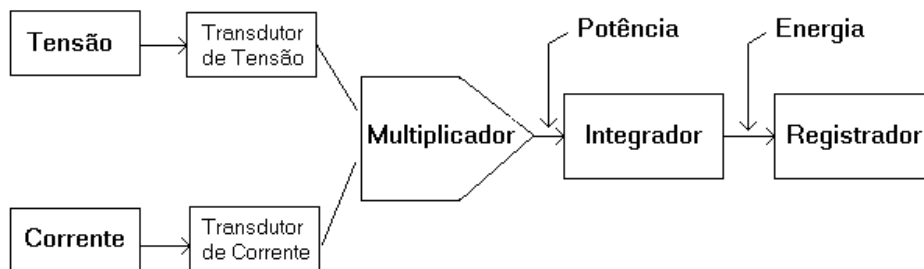


Figura 2 Diagrama em blocos geral de medidores de energia elétrica.

Os medidores comerciais de energia são calibrados para a frequência de rede de 60 Hz ou 50 Hz. Quando os sinais de corrente e/ou tensão possuem harmônicos, a resposta de cada componente do medidor de energia apresentado na Figura 2 pode ser afetada. A resposta em frequência dos mesmos, assim como a sua linearidade e resolução, podem determinar a sua exatidão em relação à contribuição do sinal e dos seus harmônicos no resultado final do cálculo da energia.

Os medidores podem ser eletromecânicos, eletrônicos ou híbridos. Este trabalho não tratará dos medidores eletromecânicos e híbridos (basicamente medidores eletromecânicos com registradores eletrônicos incorporados⁹), e, sim, dos medidores eletrônicos.

Neste trabalho foi verificada a influência dos harmônicos em duas técnicas usadas no bloco multiplicador dos medidores eletrônicos comerciais de energia elétrica: o Multiplicador por Divisão no Tempo (TDM) e o Multiplicador Digital. Estes dois métodos foram escolhidos devido serem os mais utilizados nos medidores de energia desenvolvidos atualmente⁹. Os blocos transdutores, integradores e registradores, embora possam ser também influenciados pelos harmônicos e portanto afetar a qualidade da medição de energia, não serão analisados neste trabalho.

Será feita uma breve apresentação das técnicas de multiplicação usados nos medidores eletrônicos de energia.

2.2 Multiplicadores por Divisão no Tempo

A multiplicação por divisão no tempo (TDM) foi a técnica usada nos primeiros medidores eletrônicos comerciais de energia⁹. Esta técnica apresenta melhor compromisso de exatidão versus custo e menor dificuldade de implementação quando comparada a outras técnicas analógicas de multiplicação. Ainda é usada atualmente para padrões de energia⁹.

A Figura 3 apresenta o diagrama em blocos deste multiplicador. A tensão é submetida ao bloco PWM que realiza modulação PWM e produz um trem de pulsos modulados na sua largura (sinal C). A corrente é multiplicada pelo sinal C, resultando no sinal V_p . Este é filtrado por um filtro passa-baixas e o resultado final é um sinal proporcional à potência ativa. Este sinal de tensão é contínuo e é integrado no bloco integrador (não mostrado na Figura 3), responsável pelo cálculo da energia.

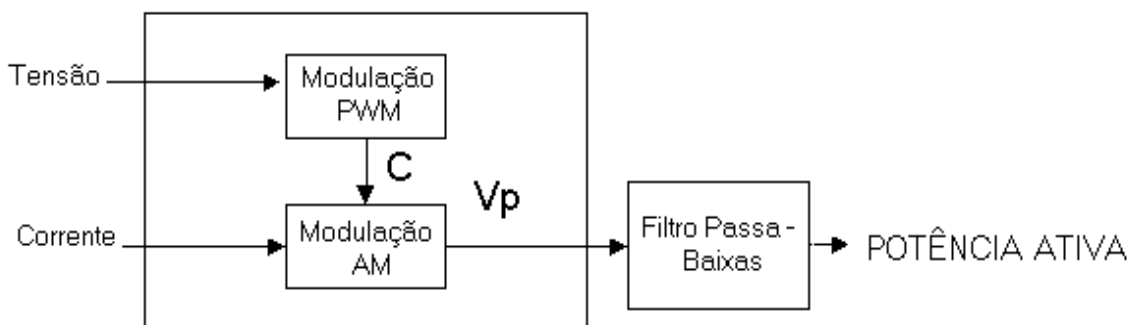


Figura 3 Diagrama em blocos do multiplicador por divisão no tempo (TDM)

A modulação PWM faz uso de comparador analógico e um gerador de onda triangular de amplitude constante. A Figura 4 apresenta o diagrama de blocos com esta técnica e as formas de onda típicas são encontradas na Figura 5. O sinal C corresponde à saída do comparador analógico, e é obtido por comparação direta do sinal correspondente à tensão com a onda triangular.

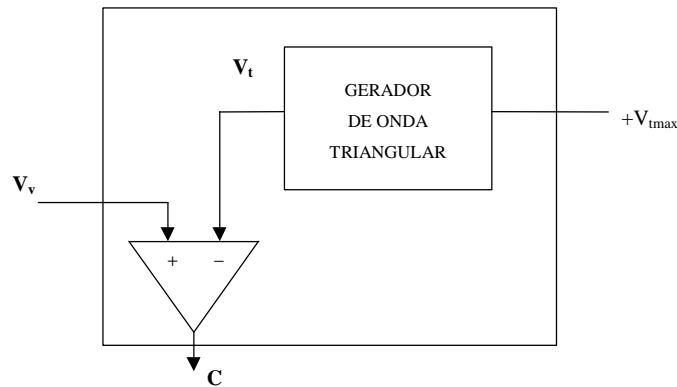


Figura 4 Diagrama em blocos do modulador PWM .

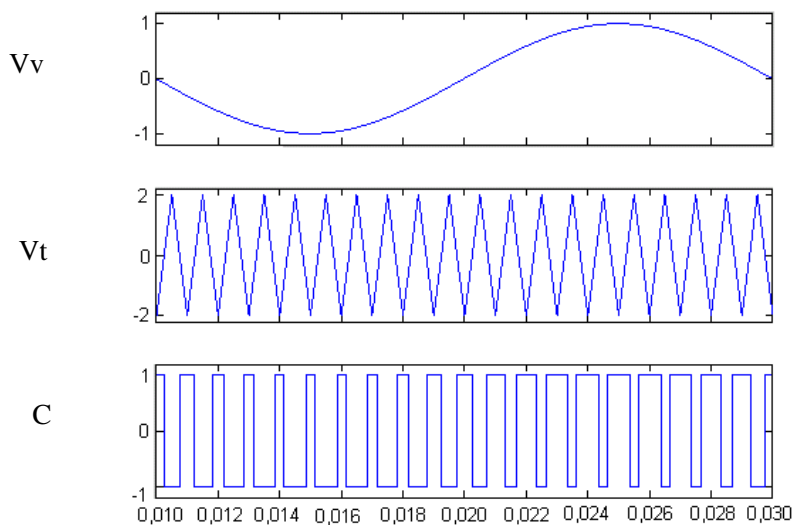


Figura 5 Formas de onda do modulador PWM

A Figura 6 mostra um exemplo da multiplicação TDM. Na Figura 6(a) está mostrado o sinal de uma tensão senoidal pura. O resultado da modulação PWM desta tensão, feita usando uma onda triangular de 1000 Hz, é mostrado na Figura 6(b). A corrente, também senoidal neste exemplo, está mostrada na Figura 6(c). O resultado da modulação AM corresponde ao sinal V_p mostrado na Figura 6(d). O valor médio do sinal V_p corresponde ao valor médio do produto instantâneo da tensão (da Figura 6(a)) com a corrente (da Figura 6(c)). No entanto, o sinal V_p contém muitos harmônicos devido à forma como a multiplicação é implementada.

Quando o sinal de entrada é senoidal as frequências resultantes na saída do sinal C, correspondentes à modulação PWM, são dadas por:

$$fh = (j * mf \pm k) * \text{frequência fundamental} \quad (1)$$

onde mf o índice de modulação, dado por:

$$mf = \frac{\text{frequência da onda triangular}}{\text{frequência fundamental}} \quad (2)$$

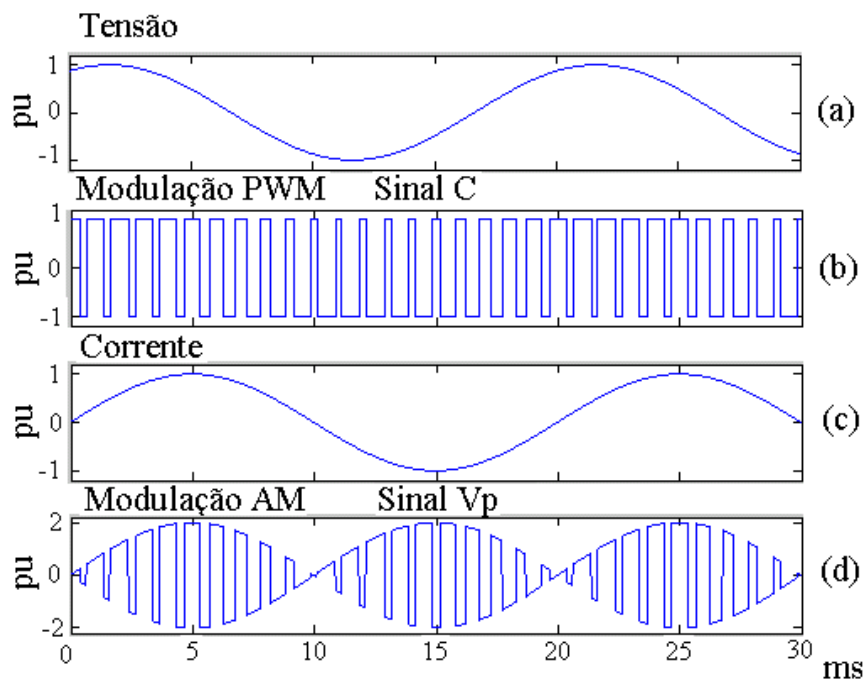


Figura 6 Formas de onda do multiplicador por divisão no tempo (TDM)

Na expressão (1), k e j são números inteiros. Para valores ímpares de j, os harmônicos existem somente para valores pares de k. Para valores pares de j, os harmônicos existem somente para valores ímpares de k. Entre os medidores comerciais a frequência da onda triangular pode variar entre 800 Hz a 10 kHz⁹. Neste trabalho apresentar-se-á uma discussão sobre a influência da frequência da onda triangular escolhida sobre o comportamento do bloco multiplicador face à presença de harmônicos.

Do estudo teórico realizado por Balthazar⁸ verificou-se que a escolha de uma frequência de onda triangular múltipla da fundamental pode apresentar erros em potência significativos. Conclui-se que a frequência da onda triangular para este método não deve ser múltipla da frequência fundamental. Foi realizada a simulação de uma carga representada por um retificador monofásico alimentando uma carga capacitiva onde este fato foi comprovado.

2.3 Multiplicadores Digitais

Como o próprio nome diz, os multiplicadores digitais realizam a multiplicação dos sinais de corrente e tensão convertidos para o formato digital. Para isto é necessário um amostrador e um conversor analógico-digital (CAD) para digitalizar estes sinais de corrente e tensão. Uma das implementações possíveis para o sistema de amostragem / conversão são apresentadas na Figura 7.

O bloco microprocessador na Figura 7 é responsável pelo cálculo do produto tensão x corrente para o cálculo da potência ativa e também pela integração da energia. Nos medidores de energia, este bloco normalmente pode ser implementado com microcontroladores¹⁰ ou DSPs (“digital signal processors” ou processadores digitais de sinais)¹¹. Atualmente, também circuitos integrados dedicados são utilizados^{12, 13, 14, 15}. Sistemas de aquisição controlados por computador^{16, 17} são utilizados normalmente para padrões de potência e energia.

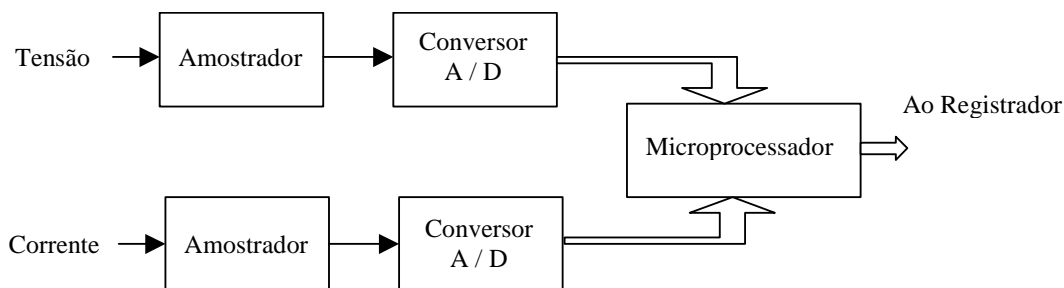


Figura 7: Diagrama em blocos do multiplicador digital

A seguir apresentam-se os principais conceitos relacionados com as técnicas de multiplicação digital.

Seja a potência média P de um sinal periódico dada por:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i(t) dt \quad (3)$$

onde $u(t)$ é a tensão instantânea, $i(t)$ é a corrente instantânea e T é um intervalo de tempo definido, usualmente é o período da frequência fundamental da tensão e corrente.

Uma forma de aproximar a potência é realizando-se N amostragens de tensão (u) e de corrente (i) simultaneamente. Estas amostras são realizadas com intervalo de tempo fixo entre si. Realizando-se o somatório do produto das amostras obtém-se aproximação para a potência média dada por:

$$W = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N u_j i_j \quad (4).$$

O erro E entre o valor correto P e o valor aproximado W é dado por:

$$E = P - W = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i(t) dt - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N u_j i_j \quad (5)$$

A multiplicação digital de valores instantâneos requer a discretização no tempo e no nível do sinal. Os erros devidos à multiplicação digital dependem, portanto, da combinação da razão de conversão (discretização no tempo) e da resolução (discretização do nível). A amostragem discretiza no tempo e a quantização discretiza em amplitude. Desta forma, dois critérios importantes na escolha dos conversores analógicos-digitais usados para a medição de potência e energia são o tempo de conversão e o número de bits de resolução do conversor. A estes parâmetros podem ser associados vários outros, como estabilidade com temperatura, linearidade na faixa dinâmica e finalmente a própria largura desta faixa dinâmica.

O estudo teórico mostrou que é necessário uma taxa de amostragem relativamente alta para que tenhamos um erro em potência pequeno. Verificou-se através de simulações que o erro cai à medida que aumenta-se o número de amostras. Apresenta-se na Tabela 1 a simulação de um multiplicador digital variando-se a taxa de amostragem.

Tabela 1: Simulação de um multiplicador digital – erro em função da taxa de amostragem (r).

| Taxa de amostragem (Hz) | Erro (%) |
|-------------------------|----------|
| 500 | 7,57 |
| 1000 | 1,94 |
| 5000 | 0,79 |
| 10000 | 0,20 |
| 100000 | 0,02 |

O degrau de quantização é o menor valor discreto dos processos de arredondamento ou truncamento. O erro devido à diferença entre o nível do sinal e o nível discretizado é chamado de erro de quantização. Este erro pode ser modelado estatisticamente.

O impacto maior destas considerações em medidores reflete-se mais fortemente na faixa dinâmica de variação da corrente do que na variação da tensão da rede, já que os medidores deverão permanecer dentro da sua classe de exatidão também na condição de 10% da corrente nominal.

Quando relacionamos o efeito de quantização com a amostragem verificamos que à medida que se aumenta o número de amostras (n), a variância da variável aleatória devido à quantização da potência média decresce. Desta forma, um outro benefício do aumento do número de amostragens é a redução do ruído de quantização na potência média.

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS COM MEDIDORES DE ENERGIA COMERCIAIS

3.1 Introdução

Os ensaios experimentais usando medidores comerciais tem como a finalidade verificar o efeito dos componentes harmônicos no desempenho dos medidores de energia. Foram realizados experimentos práticos em alguns exemplares de medidores comerciais eletrônicos.

A bancada de teste consistiu de uma fonte de tensão trifásica, cargas resistivas e padrão de energia eletrônico de classe 0,05%. A Tabela 2 apresenta a lista dos equipamentos usados nos experimentos. A bancada é trifásica mas pode ser operada monofasicamente.

Tabela 2: Lista dos equipamentos usados nos experimentos:

| Equipamentos | Fabricante | Modelo |
|--|----------------------------|-----------|
| Fonte de alimentação AC Trifásica | Hewlett Packard | HP6834B |
| Padrão de Eletrônico de Energia Elétrica - classe 0,05%. | Meter Test Equipment - EMH | PRS 121-3 |
| Chave de aferição | ABB | |
| Cargas Resistivas | Eletroteste | MOD CR-60 |

A Figura 8 apresenta o diagrama de blocos genérico da bancada de teste trifásica. Esta Figura é uma representação simplificada da bancada. Nela estão mostrados os principais instrumentos utilizados. Não está representada a chave de aferição do padrão e do medidor sob ensaio.

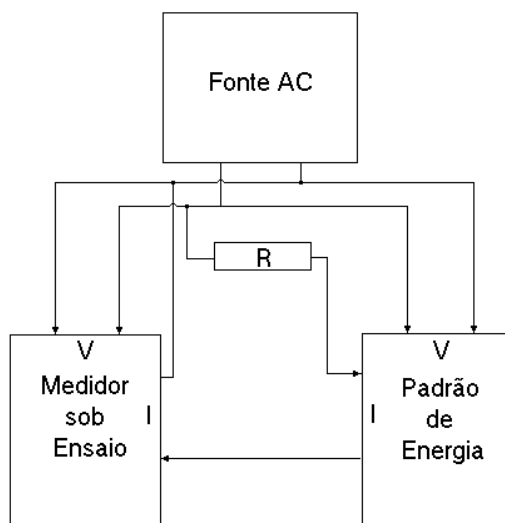


Figura 8: Diagrama em blocos genérico da bancada trifásica.

Nos ensaios realizados, para simular tensões distorcidas, foi feita a injeção paramétrica de harmônicos somados ao componente fundamental usando-se a fonte HP6834B (Fonte AC da Figura 8). Os recursos deste equipamento permitem que harmônicos possam ser introduzidos parametricamente em sua saída (pode-se acertar módulo do harmônico separadamente e o intervalo de tempo entre a passagem por zero da fundamental e a passagem por zero de cada componente harmônico). Esta adição de harmônicos é independente do valor RMS final do equipamento.

A verificação se o padrão de energia PRS 121.3 responde corretamente a harmônicos foi realizada comparando-o com um medidor de potência digital true-rms YOKOGAWA modelo 2503. Injetaram-se diversas composições harmônicas de tensão mantendo-se a tensão rms total injetada pela fonte HP6384B constante igual a 120Vrms em todos os casos. O padrão apresentou uma medição de potência cujo erro é inferior à sua classe de exatidão para todos os casos analisados.

3.2 Ensaios com medidores de energia elétrica eletrônicos

Ensaaiaram-se quatro medidores eletrônicos:

- (i) Medidor A: trifásico de classe de exatidão de 1%, medição indireta, corrente nominal de 2,5 A, sem informação sobre a técnica usada;
- (ii) Medidor C: monofásico de classe de exatidão de 1%, medição direta, corrente nominal de 15 A, sem informação sobre a técnica usada;
- (iii) Medidor D: protótipo que utiliza um Circuito Integrado dedicado (ADE-7754)¹⁹, trifásico de classe de exatidão de 0,5 %, medição indireta, corrente nominal de 2,5 A, possui filtro analógico “anti-aliasing” com frequência de corte em 2kHz. Características do Circuito Integrado: (a) classe 0,1% para potência ativa com faixa dinâmica de 1000 para 1, (b) taxa de amostragem: 833 kHz, (c) conversor A-D Sigma Delta, (d) filtro digital com frequência de corte em 10kHz, (e): Resolução para entrada de corrente: 23 bits (sendo 1 bit de sinal em complemento a 2), (f) Resolução para entrada de tensão: 15 bits (sendo 1 bit de sinal em complemento a 2).

Os testes podem ser divididos em três grandes grupos:

- (i) sobreposição sistemática de harmônicos na tensão e corrente nominal;
- (ii) sobreposição sistemática de harmônicos na tensão e corrente mínima;
- (iii) diante de uma carga de lâmpadas compactas.

A frequência da fundamental da tensão usada para os ensaios foi de 60Hz. Foi realizada a calibração dos medidores sob teste na tensão e na corrente nominal, 120 V e 2,5 A (exceção para o medidor C: 1A), isto é, foi realizada a determinação dos erros dos medidores sob teste em 60 Hz sem ajuste, e os mesmos estavam dentro da sua classe de exatidão. Destaca-se que os resultados apresentados representam a diferença percentual entre o valor de erro encontrado e o erro inicial da calibração.

3.2.1 Comportamento dos medidores eletrônicos ensaiados diante da sobreposição sistemática de harmônicos:

3.2.1.1 Injeção de 20% de harmônicos e corrente de 2,5A

O valor da amplitude do componente harmônico foi ajustado para 20% da amplitude da fundamental, tanto na tensão como na corrente. A tensão rms da fonte HP6834B foi ajustada em 120V para todos os casos e a corrente e as cargas foram ajustadas para 2,5A também para todos os casos, à exceção do medidor C que teve a corrente de ensaio ajustada para 1A. Do estudo experimental realizado pode-se concluir:

- a) O medidores eletrônicos podem ser afetados pelas distorções harmônicas.

- b) Para os medidores ensaiados, o erro cresce à medida que a ordem dos harmônicos aumenta. A Figura 9 ilustra este fato. Os medidores eventualmente podem sair de sua classe de exatidão, dependendo da magnitude dos harmônicos envolvidos. Nos casos apresentados, o medidor A saiu de sua classe de exatidão (1%) com a injeção de 20% do quadragésimo terceiro harmônico e o medidor D saiu de sua classe de exatidão (mais restrita, de 0,5%) com a injeção de 20% do vigésimo oitavo harmônico. O medidor C não saiu da classe com a injeção de harmônico superior. O erro com a injeção de 20% do quadragésimo nono harmônico ainda estava dentro da classe do medidor.

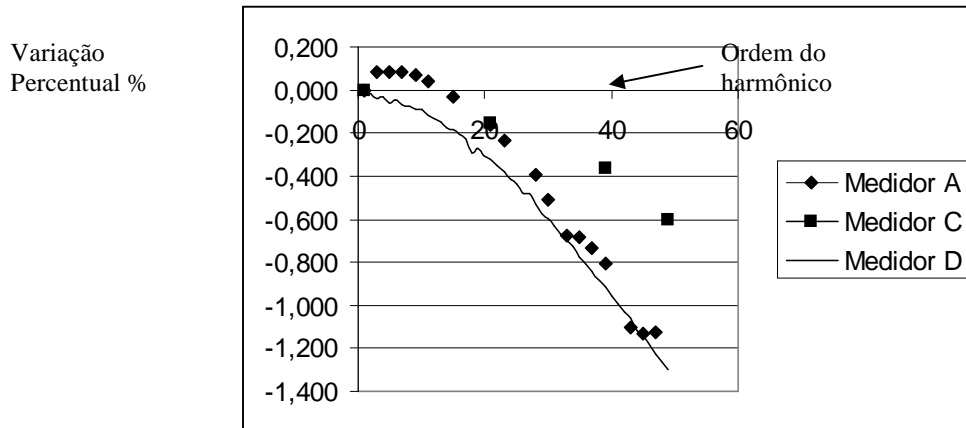


Figura 9: Variação percentual das medidas feitas com os medidores A, C e D em função da frequência.

3.2.1.2 Injeção de 20% de harmônicos e corrente de 0,175A no medidor A

O comportamento do medidor eletrônico diante da sobreposição sistemática de harmônicos quando a corrente de entrada está com o valor mínimo especificado pela norma de medidores^{7, 18} foi realizado no medidor A. A tensão rms da fonte HP6834B foi mantida em 120V para todos os casos e a corrente das cargas resistivas foi ajustada para 0,175A, próxima da corrente mínima do medidor (0,125A). Para efeito de comparação, apresentam-se na Tabela 3 o resultados obtidos com a corrente de 0,175A e para a corrente de 2,5A.

Pode-se observar que o medidor sai da classe de exatidão a partir do 39º harmônico com a corrente de 0,175A. Quando o mesmo percentual de harmônico (20%) era injetado, mas com a corrente de 2,5 A, o medidor saiu de sua classe de exatidão para o quadragésimo terceiro harmônico. Isto significa que a resposta do medidor para distorção harmônica é influenciada pelo nível de corrente. É importante destacar que os resultados representam a diferença percentual entre o valor de erro encontrado e o erro inicial da calibração em sua respectiva corrente, 0,175A ou 2,5A. Desta forma, a influência da calibração em 60Hz é anulada. A Figura 10 apresenta a comparação dos resultados obtidos para o medidor A.

Tabela 3: Resultado do ensaio no medidor eletrônico A, com a frequência da fundamental de 60Hz, e adição de um componente harmônico com 20% da amplitude da fundamental na tensão e na corrente. Corrente da fundamental com 0,175 A e 2,5A.

| Ordem do Harmônico adicionado | Erro Corrente (0,175A) | Erro Corrente (2,5A) |
|-------------------------------|------------------------|----------------------|
| 2 | 0,007 | |
| 3 | 0,022 | 0,087% |
| 4 | -0,022 | |
| 11 | -0,070 | 0,044% |
| 20 | -0,303 | |
| 21 | -0,316 | -0,162% |
| 22 | -0,310 | |
| 25 | -0,432 | |
| 27 | -0,476 | |
| 28 | -0,513 | -0,392% |
| 29 | -0,564 | |
| 31 | -0,666 | |
| 35 | -0,809 | -0,682% |
| 39 | -1,003 | -0,803% |
| 41 | -1,133 | |
| 45 | -1,362 | -1,133% |
| 49 | -1,612 | |

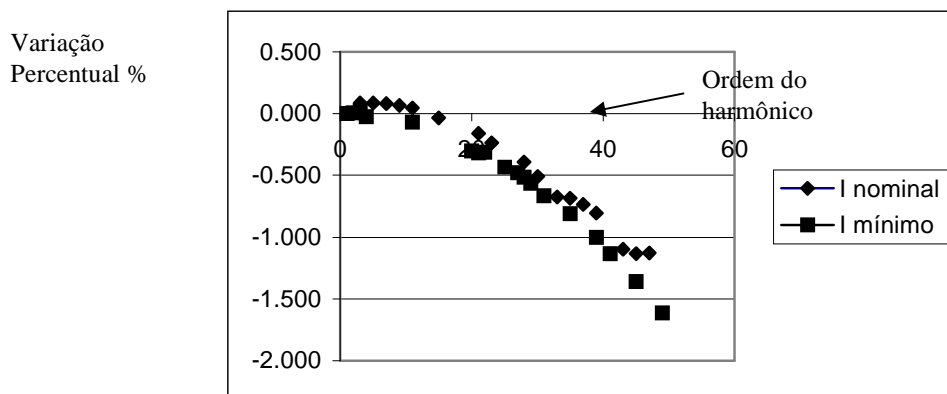


Figura 10: Variação percentual das medidas feitas com o medidor A na condição da corrente ser : (a) 2,5 A e (b) 0,175A.

3.1.2 Comportamento de medidores eletrônicos diante uma carga de lâmpadas compactas

Com o objetivo de realizar teste com cargas reais em medidores eletrônicos submetem-se os medidores A e C a um ensaio com a tensão nominal dos mesmos (120V) e uma carga de lâmpadas compactas em

paralelo, cuja potência total é de 79 watts. As cargas foram ligadas somente ao primeiro elemento do medidor A, que é trifásico.

Neste teste observa-se que o espectro harmônico da tensão só contém praticamente a componente fundamental (THD=0%). A forma de onda da corrente é não senoidal e apresenta uma composição harmônica contendo harmônicos ímpares significativos. O THD da corrente é de 116,85%.

Apresenta-se na Tabela 4 o resultado da diferença percentual entre o erro medido em relação ao padrão de energia e o erro obtido na calibração em 60 Hz.

Tabela 4- Resultado do comportamento dos medidores A e C diante uma carga de lâmpadas compactas.

| Medidor | Erro (%) | Classe |
|----------------|-----------------|---------------|
| A | 0,046 | 1 |
| C | 4,57 | 1 |

Observa-se que o medidor C saiu de sua classe de exatidão e o medidor A manteve-se dentro de sua classe de exatidão. Observou-se também que os resultados da injeção de harmônicos individuais apresentados não indicaram que o comportamento do medidor C iria ser pior do que o do medidor A. Isto está relacionado à não-linearidade já discutida anteriormente. É importante notar também que a tensão está isenta de harmônicos. Isto significa que somente com harmônicos na corrente já é possível fazer com que o medidor C seja afetado por harmônicos.

4. CONCLUSÕES

4.1 Conclusões

O presente trabalho apresentou o resultado da análise do princípio básico de funcionamento dos medidores eletrônicos de energia, no que se refere as técnicas de multiplicação usadas (multiplicação por divisão no tempo (TDM) e multiplicação digital), analisando as possíveis origens de erros de medição quando componentes harmônicos estão presentes na tensão ou corrente. Foram feitos também ensaios práticos de medidores eletrônicos de energia elétrica para faturamento na presença de harmônicos.

Inicialmente, identificou-se o problema gerado pela difusão de cargas não lineares conectadas à rede elétrica contribuindo para a presença de correntes e tensões harmônicas nos sistemas elétricos de distribuição e transmissão, que compromete a qualidade de energia ofertada. A presença de harmônicos na rede elétrica pode influenciar no comportamento de vários dos equipamentos elétricos conectados à mesma. E, isto não é exceção para os medidores de energia para faturamento. Apesar de já existirem estudos sobre esta influência, o estudo aqui apresentado diferencia-se dos demais pela preocupação em analisar as fontes de erros e quantificá-las.

As normas de especificação e de testes de tipo dos medidores de energia para faturamento determinam a sua classe de exatidão nas condições de tensões e correntes puramente senoidais e é nesta condição que eles são calibrados. No caso de harmônicos, as normas referentes aos requisitos mínimos de medidores

eletrônicos de energia, IEC 62053-21⁵, IEC 62053-22⁶ e NBR 14520⁷, especificam também a sua exatidão somente para o 5º harmônico em uma condição muito específica. O problema consiste, portanto, no fato de que os ensaios especificados nas normas nacionais e internacionais^{5, 6, 7, 18} não contemplam de forma completa o comportamento dos medidores de energia face aos harmônicos. Como consequência, os medidores comerciais de energia não têm seu comportamento completamente mapeado quando há presença de harmônicos na rede elétrica.

O objetivo do trabalho foi o de prover subsídios para estudos de normas de medidores eletrônicos para que contemplem de forma completa uma especificação detalhada dos medidores com relação aos efeitos que harmônicos podem provocar.

Foram realizados experimentos práticos em alguns exemplares de medidores comerciais eletrônicos com a finalidade de verificar o efeito dos componentes harmônicos. Estes ensaios confirmaram que os medidores eletrônicos são afetados pelos harmônicos individualmente em maior ou menor escala conforme a magnitude e a frequência injetada.

4.2 Trabalhos Futuros

Verificou-se que o comportamento dos medidores eletrônicos é dependente das formas de onda de corrente e de tensão. Propõe-se o estudo sobre a influência das formas de onda mais usuais sobre os medidores eletrônicos com o objetivo de prover subsídios para estudos de normas de medidores eletrônicos. Poder-se-ia então formular as normas de especificação de medidores com o objetivo de contemplar de forma mais completa o comportamento dos medidores eletrônicos na presença de harmônicos.

Propõe-se ainda o estudo sobre a influência de harmônicos sobre outros componentes dos medidores de energia, tais como os transdutores de entrada e os integradores.

O estudo sobre a influência de harmônicos não característicos sobre medidores de energia também é necessário para complementação do tema.

Metodologias de calibração de medidores de energia envolvendo não só os procedimentos como também os instrumentos envolvidos devem ser propostas para a especificação dos medidores de energia na presença de harmônicos.

5. REFERÊNCIAS

1 ANÔNIMO (1999) NBR 14418 *"Reatores Eletrônicos Alimentados em Corrente Alternada para Lâmpadas Fluorescentes Tubulares - Prescrições de Desempenho"*, Primeira edição. Rio de Janeiro, ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas.

2 ANÔNIMO (1993) IEEE Standard 519, *"IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems"*, IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers.

3 ANÔNIMO (2001), IEC 61000-3-2 Edition 2.1: "*Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 3-2: Limits - Limits for Harmonic Current Emissions (Equipment Input Current ≤ 16 A per phase)*" Geneva, IEC - International Electrotechnical Commission.

4 ANÔNIMO (1998), IEC/TS 61000-3-4: "*Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 3-4: Limits – Limitation of Emission of Harmonic Currents in Low-Voltage Power Supply Systems for Equipment with Rated Current greater than 16 A*" First edition, Geneva, IEC - International Electrotechnical Commission.

5 ANÔNIMO (2003). IEC 62053-21, First edition, "*Electricity Metering Equipment (A.C.) – Particular Requirements – Part 21: Static Meters for Active Energy (classes 1 and 2)*", Geneva, IEC - International Electrotechnical Commission.

6 ANÔNIMO(2003), IEC 62053-22: "*Electricity Metering Equipment (A.C.) – Particular Requirements – Part 22: Static Meters for Active Energy (classes 0,2 S and 0,5 S)*" First edition, Geneva, IEC - International Electrotechnical Commission.

7 ANÔNIMO (2000), NBR 14520: "*Medidores Eletrônicos de Energia Elétrica (Estáticos) - Método de Ensaio*", Primeira edição. Rio de Janeiro, ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas.

8 BALTHAZAR, M. Q. F.: "*Medidores de Watt-Hora Eletrônicos na Presença de Harmônicos: Análise de Multiplicadores e Testes Preliminares*", Tese de Mestrado – COPPE – UFRJ – Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Março 2004

9 EDSON ELECTRIC INSTITUTE, "*Handbook for Electricity Metering*", Washington D.C., 2002.

10 TEXAS INSTRUMENTS. Mixed Signal Products: MSP430C11x, Application Report SLAA075, Dallas, Texas, Outubro 1999.

11 Three Phase Power / Energy IC: AT73C500 with AT73C501 or AT73C502, ATMEL, Especificação Técnica REV.1035A, www.atmel.com, Agosto 1998.

12 Three Phase Power / Energy IC with SPI Interface: SA9904B, South African Micro-Electronic Systems (PTY) LTD, Especificação Técnica SPEC-0447 (REV.6), www.sames.co.za, Julho 2003.

13 Single Phase Bi-Directional Power / Energy IC: CS5460A, CIRRUS LOGIC, Inc., Especificação Técnica DS487F1, www.cirrus.com, Janeiro 2003.

14 Front-End CMOS Energy Metering Series: Three Phase Energy Metering with Pulse Output: CI-4010P, CISS, Especificação Técnica V 3.0, www.ciss.co.at, 1998.

15 Poly-phase Multi-Function Energy Metering IC with Serial Port: ADE7754, Analog Devices, Inc., Especificação Técnica Preliminar REV. PrG 01/03, www.analog.com, 2003.

16 SVENSSON, Stefan "*A Measuring System for the Calibration of Power Analysers*", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 44, No. 2, pp 316-317, Abril 1995.

17 CARULLO, Alessio., PARVIS, Marco "*Power Meter for Highly Distorted Three-Phase Systems*", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 46, No. 6, pp 1262-1267, Dezembro 1997.

18 ANÔNIMO(2000), NBR 14519: "*Medidores Eletrônicos de Energia Elétrica (Estáticos) – Especificação*", Primeira edição. Rio de Janeiro, ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas.

19 Poly-phase Multi-Function Energy Metering IC with Serial Port: ADE7754, Analog Devices, Inc., Especificação Técnica Preliminar REV. PrG 01/03, www.analog.com, 2003.