

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE UM SHUNT DE CORRENTE QUANDO SUBMETIDO A SINAIS NÃO-SENOIDAIIS

*Rosane Moreira Debatin*¹, *Ana Maria Ribeiro Franco*²

¹ Laboratório de Transformadores-Inmetro, Rio de Janeiro, Brasil, latra@inmetro.gov.br

² Laboratório de Potência e Energia-Inmetro, Rio de Janeiro, Brasil, lapen@inmetro.gov.br

Resumo: O objetivo deste trabalho é mostrar o estudo realizado no Laboratório de Potencia e Energia do Inmetro que teve como finalidade de verificação do comportamento de um Shunt, modelo 2775A, da Valhalla Scientific, Inc. quando submetido a sinais distorcidos.

Especificamente, objetivou-se analisar o não comprometimento das incertezas de medição adotadas pelo laboratório.

Palavras chave: harmônicos, sinais não senoidais, shunt.

1. INTRODUÇÃO

O laboratório de Potência e Energia tem realizado medições em ondas de tensão e corrente em regime não senoidal com o objetivo de determinar a Distorção Harmônica Total (THD) contida nestas ondas.

No sistema de medição de harmônicos [1] usado pelo laboratório, mede-se até a 64ª componente harmônica.

A geração de uma onda não senoidal a ser aplicada a um determinado medidor de distorção harmônica pode ser feita tanto criando a distorção individualmente em cada componente harmônica ou se pode compor uma onda com diferentes amplitudes aplicadas às distintas componentes harmônicas.

Os resultados das medições podem ser mostrados em THD, ou ainda, relatar o valor da distorção em cada componente harmônica.

Os equipamentos utilizados para o estudo de caso são: Padrão de Potência Elétrica 6100 A – 80 da Fluke, como fonte, um Shunt de Corrente, modelo 2575A da Valhalla Scientific, INC e o Software “Analisador de Potência”, desenvolvido pelo Laboratório, com o aplicativo LabWindows/CVI.

2. METODOLOGIA APLICADA

O processo de calibração de medidores de distorção harmônica consiste em se comparar o valor do sinal medido pelo padrão utilizado como referência com o valor do sinal indicado no equipamento sob teste, submetendo ambos à mesma forma de onda não senoidal. (Vide Figura1).

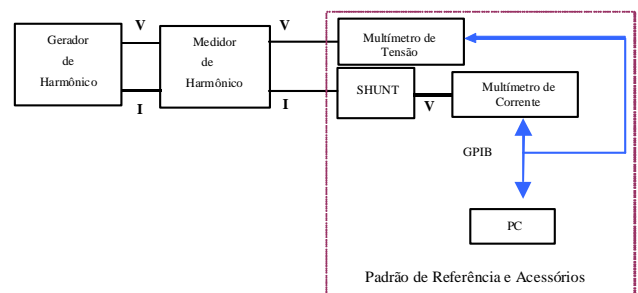


Fig. 1 - Diagrama de Blocos de Calibração de medidor de Distorção Harmônica

2.1. Distorção Harmônica em Ondas de Tensão e Corrente

A padronização da distorção harmônica é feita na forma de onda desejada, conforme as equações que se seguem.

Para calcular os harmônicos de uma tensão V:

$$V_o = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} v_n \quad (1)$$

$$V_{ci} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \sqrt{2} v_n \cos(i \cdot \omega_o \cdot n) \quad (2)$$

$$V_{si} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \sqrt{2} v_n \sen(i \cdot \omega_o \cdot n) \quad (3)$$

onde V_n é o valor da n-ésima amostra da tensão, V_{ci} é o valor eficaz do i-ésimo componente co-senoidal, enquanto V_{si} o valor máximo do i-ésimo componente senoidal e V_o pode ser interpretado como a componente de tensão contínua da tensão analisada.

O valor eficaz de um harmônico é calculado dos componentes do co-seno e seno, conforme a equação:

$$V_i = \sqrt{V_{ci}^2 + V_{si}^2} \quad (4)$$

O valor eficaz de uma tensão é calculado dos valores eficazes dos harmônicos:

$$V = \sqrt{\sum_{i=0}^N V_i^2} \quad (5)$$

onde se observa que a componente de ordem zero, isto é, a tensão contínua, também está incluída. Calcula-se o valor eficaz da corrente na mesma maneira.

$$I_o = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i_n \quad (6)$$

$$I_{ci} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \sqrt{2} i_n \cos(i \cdot \omega_o \cdot n) \quad (7)$$

$$I_{si} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \sqrt{2} i_n \text{sen}(i \cdot \omega_o \cdot n) \quad (8)$$

onde I_n é o valor da n-ésima amostra da corrente, I_{ci} é o valor eficaz do i-ésimo componente co-senoidal, enquanto I_{si} o valor máximo do i-ésimo componente senoidal e I_o é a componente de corrente contínua do sinal de corrente analisado.

O valor eficaz de um harmônico é calculado dos componentes do co-seno e seno, conforme a equação:

$$I_i = \sqrt{I_{ci}^2 + I_{si}^2} \quad (9)$$

O valor eficaz de uma corrente é calculado dos valores eficazes dos harmônicos:

$$I = \sqrt{\sum_{i=0}^N I_i^2} \quad (10)$$

3. MOTIVAÇÃO

Os valores de tensão da onda fundamental mais solicitados para calibração estão dentro da faixa de medição do multímetro de 1000 V. Sabemos que esta faixa de medição quando aplicadas ondas não senoidais não é a mais adequada, por provocar um aumento significativo na incerteza de medição à medida que aumentamos a ordem do harmônico. Neste caso, a utilização de um divisor resistivo é recomendada, de modo a levar o nível de tensão desejada na medição para a faixa de entrada do multímetro de 10V, onde a influência da aplicação de frequências mais altas não alteram a incerteza de medição significativamente como acontece em relação a faixa de 1000 V.

No caso da medição na onda de corrente, o aconselhável é a utilização de shunts de corrente que possuam larga faixa de trabalho em relação à frequência. No momento, esta opção não está disponível, então utilizamos um shunt de corrente, modelo 2575A, da Valhalla Scientific, Inc, que tem diferentes faixas de entrada para corrente e uma de suas saídas é de 2 V. O valor do nível de tensão utilizado pela saída do shunt satisfaz a condição de melhor faixa de entrada de tensão do multímetro 3458A, para o cálculo de

incerteza de medição quando utilizamos frequências mais elevadas, que no nosso caso pode atingir 3.840 Hz. Cabe ressaltar que, o próprio sistema de medição força o multímetro, que mede a onda de corrente, a realizar as leituras na faixa de 10V.

4. EXPERIMENTO ADOTADO

Para podermos analisar a influência da frequência no Shunt de Corrente, modelo 2575A, utilizamos como gerador a saída de corrente de um calibrador um Fluke 6100A, ora como saída de tensão, ou seja, sem a utilização do shunt, e ora como saída de corrente, passando o sinal pelo shunt.

Foram consideradas 3 faixas de corrente do shunt, a saber: 0,2 A, 2 A e 20 A. Nas três faixas foram aplicadas às suas entradas as correntes correspondentes a 10%, 50% e 75% da faixa do shunt, como amplitude da onda fundamental. Na saída do shunt as tensões correspondentes foram: 0,2 V, 1 V e 1,5 V, respectivamente. Estas mesmas tensões foram aplicadas diretamente ao multímetro para a obtenção de dados comparativos, ou seja, o quanto o uso do shunt interfere na medição de ondas não senoidais.

Com base na planilha completa para determinação do cálculo de incerteza de medição de THD nas ondas de tensão e corrente, convencionou-se a adoção da Tabela 1 para incerteza de medição em THD de corrente para facilitar os cálculos de uma medição e também a conferência das planilhas de medição.

A Tabela 1 mostra a incerteza declarada pelo sistema de medição quando aplicadas até 10% de distorção em todas as componentes harmônicas consideradas, e fator de abrangência $k=2$.

Tabela 1: Incerteza de Medição declarada pelo Lapen para THD no circuito de corrente

Componentes Harmônicas	Incerteza adotada para o Sistema (%)
2 a 10	0,022
2 a 20	0,033
2 a 30	0,043
2 a 40	0,056
2 a 50	0,073
2 a 60	0,096
2 a 64	0,11

Para cada ponto de teste foi considerado a aplicação fixa de 10% em todas as componentes consideradas, ou seja, primeiro ponto: 10% nas componentes harmônicas de 2 a 10, segundo ponto: 10% nas componentes harmônicas de 2 a 20, e assim sucessivamente.

Ressalta-se que, estes valores não refletem fielmente as solicitações de calibração, porém englobam todas as necessidades, com um grande grau de extrapolação. Esta observação poderá ser visualizada nos gráficos do experimento que serão apresentados mais adiante neste trabalho.

Cabe observar que, as incertezas adotadas não comprometem as medições de clientes, uma vez que a

maioria dos equipamentos calibrados pelo Lapen possui classe de exatidão de 2%, e para os equipamentos que têm melhor classe de exatidão as incertezas são calculadas utilizando-se uma planilha completa [2] para a estimativa de incerteza de medição. Ou ainda, nesta planilha, são introduzidos os valores de amplitude do pedido de calibração nas componentes harmônicas e a incerteza total é obtida.

Como ilustração, relata-se que os pontos de calibração mais solicitados são por exemplo: 2% no 5º harmônico, 5% no 3º harmônico, 3% do 7º harmônico, etc. Pontos de calibração bem definidos e formas de ondas com pouca distorção.

5. RESULTADOS

A Tabela 2 mostra as diferenças entre os resultados de medição considerando a aplicação de 10% do valor da faixa de corrente do shunt e o valor de tensão correspondente aplicado diretamente ao multímetro, ou seja, sem a utilização do shunt. A Figura 2 ilustra os resultados apresentados na Tabela 2, com a apresentação das incertezas estabelecidas na Tabela 1.

Tabela 2: Aplicando 10% do valor da faixa de corrente. Tensão na saída = 0,2 V.

Amplitude Aplicada (%) da fundamental	Componente Harmônica	Diferença do erro de Mediçãõ (com shunt - sem shunt)		
		Faixa de Corrente		
		0,2 A	2 A	20 A
10%	2 ao 10	0,0004	0,0003	0,0014
10%	2 ao 20	0,0012	0,0013	0,0021
10%	2 ao 30	0,0023	0,0038	0,0070
10%	2 ao 40	0,0038	0,0049	0,0087
10%	2 ao 50	0,0020	0,0003	0,0078
10%	2 ao 60	0,0060	0,0011	0,0000
10%	2 ao 64	0,0007	0,0031	0,0000

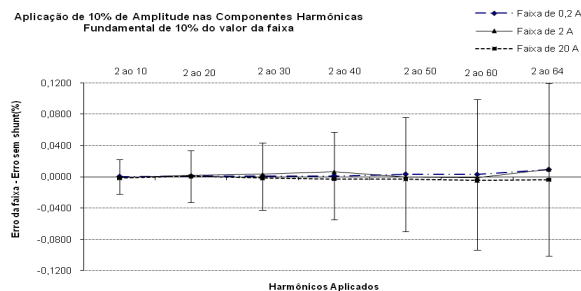


Fig. 2. Aplicando 10% do valor da faixa de corrente e suas respectivas incertezas

A Tabela 3 mostra as diferenças entre os resultados de medição considerando a aplicação de 50% do valor da faixa de corrente do shunt e o valor de tensão correspondente aplicado diretamente ao multímetro. A Figura 3 ilustra os resultados apresentados na Tabela 3, com a apresentação das incertezas estabelecidas na Tabela 1.

Tabela 3: Aplicando 50% do valor da faixa de corrente. Tensão na saída = 1 V.

Amplitude Aplicada (%) da fundamental	Componente Harmônica	Diferença do erro de Mediçãõ (com shunt - sem shunt)		
		Faixa de Corrente		
		0,2 A	2 A	20 A
10%	2 ao 10	0,0004	-0,0003	0,0014
10%	2 ao 20	-0,0012	-0,0013	0,0021
10%	2 ao 30	0,0023	0,0038	0,0070
10%	2 ao 40	0,0038	0,0049	0,0087
10%	2 ao 50	0,0020	-0,0003	0,0078
10%	2 ao 60	0,0060	0,0011	-
10%	2 ao 64	-0,0007	0,0031	-

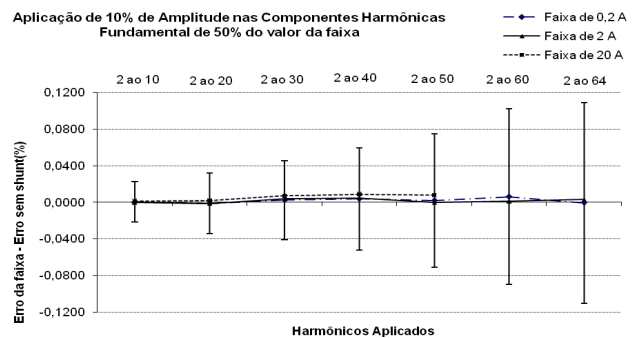


Fig. 3. Aplicando 50% do valor da faixa de corrente e suas respectivas incertezas

A Tabela 4 mostra as diferenças entre os resultados de medição considerando a aplicação de 75% do valor da faixa de corrente do shunt e o valor de tensão correspondente aplicado diretamente ao multímetro, ou seja, sem a utilização do shunt. A Figura 4 ilustra os resultados apresentados na Tabela 4, com a apresentação das incertezas estabelecidas na Tabela 1.

Tabela 4: Aplicando 75% do valor da faixa de corrente. Tensão na saída = 1,5 V

Amplitude Aplicada (%) da fundamental	Componente Harmônica	Diferença do erro de Mediçãõ (com shunt - sem shunt)		
		Faixa de Corrente		
		0,2 A	2 A	20 A
10%	2 ao 10	0,0011	0,0006	0,0006
10%	2 ao 20	0,0010	0,0001	0,0033
10%	2 ao 30	0,0033	0,0044	0,0075
10%	2 ao 40	0,0001	0,0018	0,0046
10%	2 ao 50	1,6228	1,5876	-
10%	2 ao 60	5,0077	4,9044	-
10%	2 ao 64	6,4210	6,3758	-

Uma vez que acima do 40 harmônico a diferença entre a medição com shunt e a medição sem shunt é muito grande, recomenda-se que distorções desta ordem não sejam aplicadas quando se usar uma fundamental com amplitude maior que 75% do valor da faixa.

Observa-se que a distorção harmônica se dá pela soma de sinais. Logo, quando o valor do sinal aplicado ultrapassa

o valor da faixa do shunt de corrente utilizado, os valores dos erros se tornam altos.

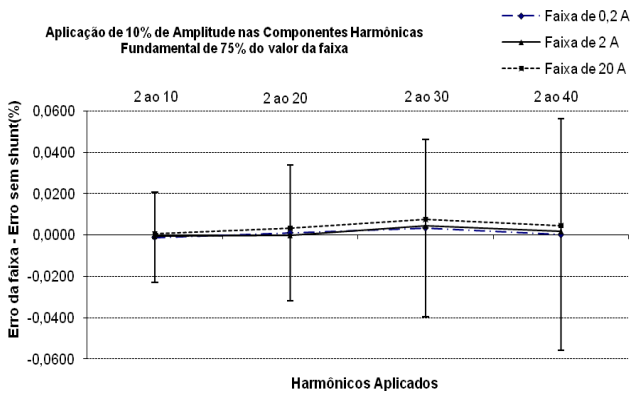


Fig. 4. Aplicando 75% do valor da faixa de corrente e suas respectivas incertezas

6. CONSIDERAÇÕES

Realizou-se também outros testes com a aplicação de valores menores de amplitudes harmônicas. Calculou-se o erro do valor obtido em relação ao valor teórico. Estes resultados são apresentados nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5: Aplicação de 1,5 A na componente fundamental na entrada de 2 A do shunt de corrente, com aplicação de harmônicos individuais

Amplitude da Componente Harmônica	Componente Harmônica	Erro (%)
10%	5	0,0000
10%	10	-0,0002
10%	20	-0,0005
10%	30	-0,0006
10%	40	-0,0004
10%	50	-0,0002
10%	60	-0,0004
10%	64	-0,0010

Tabela 6: Aplicação de 1,5 V na componente fundamental diretamente na entrada do multímetro, com aplicação de harmônicos individuais

Amplitude da Componente Harmônica	Componente Harmônica	Erro (%)
10%	5	-0,0001
10%	10	0,0001
10%	20	-0,0007
10%	30	-0,0006
10%	40	-0,0005
10%	50	-0,0003
10%	60	-0,0003
10%	64	-0,0011

Estes resultados podem ser visualizados com mais facilidade na Figura 5.

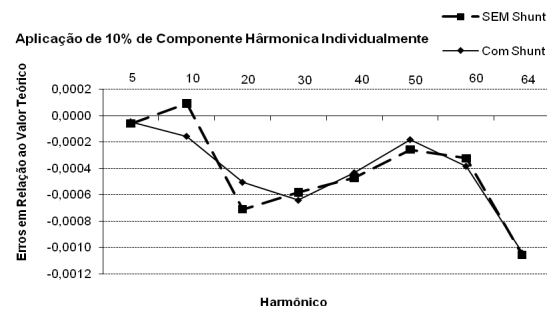


Fig. 5. Aplicando 10% individualmente na componente harmônica

Note-se que a maior diferença encontrada nas medições é de 0,0002%.

Acrescentamos ainda a aplicação de um conjunto de componentes harmônicas aplicados separadamente. Os erros obtidos em relação aos valores teóricos são apresentados nas tabelas 7 e 8.

Tabela 7: Aplicação de 1,5 A na componente fundamental na entrada de 2 A do shunt de corrente, com aplicação de um conjunto de harmônicos

Amplitude da Componente Harmônica	Componente Harmônica	Erro (%)
10%	2 ao 10	-0,0001
10%	11 ao 20	-0,0246
10%	21 ao 30	-0,0335
10%	31 ao 40	-0,0314
10%	41 ao 50	-0,0180
10%	51 ao 60	-0,0222
10%	60 ao 64	-0,0126

Tabela 8: Aplicação de 1,5 V na componente fundamental diretamente na entrada do multímetro, com aplicação de um conjunto de

Amplitude da Componente Harmônica	Componente Harmônica	Erro (%)
10%	2 ao 10	-0,0003
10%	11 ao 20	-0,0262
10%	21 ao 30	-0,0355
10%	31 ao 40	-0,0330
10%	41 ao 50	-0,0185
10%	51 ao 60	-0,0225
10%	60 ao 64	-0,0140

As diferenças entre os valores dos dois experimentos podem ser visualizadas na Figura 6.

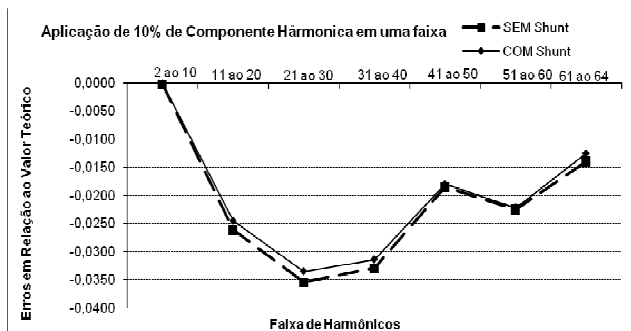


Fig. 6. Aplicando 10% em conjuntos de componentes harmônicas

7. CONCLUSÃO

Compondo as incertezas declaradas na calibração com as maiores diferenças em cada ponto de medição, pode-se achar uma variação máxima no valor de 0,010%, nos pontos de testes com componentes harmônicas acima da 21^a. Tal valor acrescido na incerteza total faz com que o valor de incerteza aumente em 0,0010%, o que é considerado irrelevante por ser uma condição que não é normal de pedido de cliente e porque todos os testes já foram realizados considerando situações de extrapolação.

Por fim, no que tange aos serviços realizados, constata-se que a utilização do shunt, modelo 2575A, não interfere significativamente nos resultados finais e nas incertezas declaradas.

REFERÊNCIAS

- [1] A.M.R. Franco, E. Toth, R.M. Debatin, *Analysis of Harmonics in the Power Measurements, Conference on Precision Electromagnetic Measurements Digest, 2004.*
- [2] Lapen, *Norma Interna Técnica de Incerteza de Medição.*