

# MEDIÇÃO DE HARMÔNICOS USANDO MICROCOMPUTADOR

Walmeran José Trindade Júnior

Escola Técnica Federal da Paraíba  
Av. 1º de Maio, 720 - Jaguaribe  
58.038-251 - João Pessoa - Paraíba - Brasil

## Resumo

*Neste trabalho é descrita a técnica de medição de harmônicos de tensão e de corrente que utiliza o microcomputador tipo PC como parte principal. Os componentes integrantes do medidor que aplica essa técnica são descritos, bem como o medidor implementado para as aplicações. Medições em laboratório utilizando como fonte de harmônicos equipamentos do tipo : inversor de frequência, controlador lógico programável, microcomputador e TV em cores, foram realizadas. Formas-de-onda de tensão e de corrente nos domínios do tempo e da frequência das aplicações acima são mostradas.*

## 1. Introdução

O objetivo de um sistema elétrico é fornecer energia elétrica a um grande número de consumidores. Idealmente este suprimento deve ser feito com uma tensão perfeitamente senoidal, com amplitude e frequência constantes. Porém, na realidade, a operação do sistema e o uso da energia elétrica pelos consumidores provocam distorções harmônicas na onda de tensão e/ou de corrente.[1][2][3]

A palavra harmônica foi originalmente usada em relação ao som e significava uma vibração de uma corda ou coluna de ar para um múltiplo da frequência fundamental. Na engenharia elétrica, uma onda de corrente ou de tensão distorcida e periódica é representada através do método de Fourier (Série de Fourier), como a soma de uma fundamental e uma série de componentes harmônicas.[1][3]

Os geradores produzem energia elétrica com tensão muito próxima da senoidal. Entretanto, existem cargas e dispositivos no sistema que têm características não-lineares e provocam distorções harmônicas de tensão e/ou de corrente.

A partir do gerador, o primeiro componente que afeta a forma de onda é o transformador. Um grande montante de distorção harmônica é usualmente provocada por retificadores eletrônicos. Reguladores AC são outra fonte de distorção. Cargas que contêm núcleos de ferro saturado também geram correntes distorcidas.

Valores significativos de distorção harmônica não são causados em grandes instalações, mas sim do efeito combinado de um grande número de pequenas instalações.

A monitoração (medição) das distorções harmônicas em um sistema elétrico é necessária devido as indesejáveis conseqüências por elas provocadas, quais sejam:[3]

- a) Aumento da corrente que circula pelos bancos de capacitores, quando em ressonância, diminuindo a sua vida útil;
- b) Aumento das perdas em motores e transformadores supridos por tensão distorcida (não-senoidal);
- c) Mau funcionamento de dispositivos eletrônicos que usam diretamente a tensão para controlar o chaveamento de tiristores;
- d) Formas-de-onda distorcidas afetam a precisão de medidores de energia do tipo indução;

e) Aumento das perdas elétricas no sistema devido à distorção harmônica.

A medição de distorção harmônica pode ser realizada através da sintonia de uma determinada frequência, através de filtros, e a componente selecionada é medida. Porém, um método bastante utilizado é aquele em que circuitos digitais armazenam valores instantâneos da forma-de-onda em intervalos sucessivos durante o ciclo (conversão A/D) e então é computada uma análise de Fourier (Transformada de Fourier).[2][4][6][7]

## 2. Medição de Harmônicos

A severidade dos problemas causados pela presença de harmônicos depende da sensibilidade dos equipamentos instalados no sistema e da magnitude da distorção na forma-de-onda (de tensão e/ou de corrente). Assim, não somente uma excessiva distorção harmônica é inaceitável, bem como a mesma não deve ser tolerada.[4]

Já são bem conhecidas as técnicas para corrigir problemas relativos à presença de harmônicos no sistema. Entretanto, as distorções harmônicas e as suas fontes devem ser criteriosamente identificadas antes da verificação da solução que pode ser adotada.[4]

Uma forma de se identificar a presença de harmônicos no sistema, de se quantificar as distorções presentes e verificar se as ações corretivas surtiram efeito é através da medição de harmônicos.[4]

### 2.1 Equipamento Necessário

A Figura 1 mostra o equipamento (hardware) básico necessário para a medição de harmônicos em sistemas de potência. Esse equipamento é composto por quatro elementos básicos:[2][4][6]

- Transdutores ou sensores para tensão e corrente;
- Condicionadores de sinal;
- Analizador de espectro;

d) Armazenamento de dados (memória de massa).

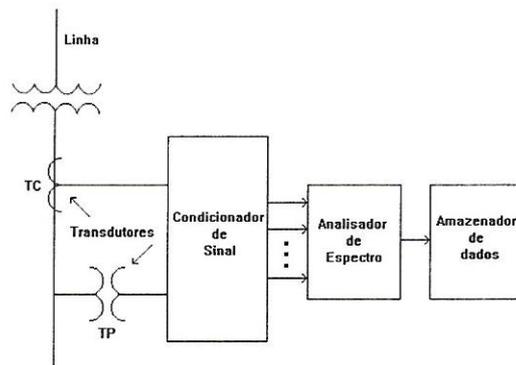


FIGURA 1 : Equipamento Básico

É possível combinar as funções do analisador de espectro e do armazenamento de dados usando um microcomputador pessoal (PC). Esse sistema faz diagnósticos rápidos e confiáveis dos problemas relacionados com harmônicos. Nele a aquisição dos dados (medição) é feita automaticamente por um conversor Analógico/Digital (A/D) e são tratados via software.

#### 2.1.1 Transdutores :

Os transdutores para medições de harmônicos em sistemas de potência são geralmente transformadores de potencial (TP) e de corrente (TC). Deles são exigidos isolamento e precisão. Os transformadores de potencial e de corrente devem apresentar precisão em torno de 3% para frequências próximas a 5 kHz.[5][6]

Alguns transformadores de corrente especiais são utilizados, como por exemplo os do tipo alicate. Inovações recentes nos transformadores de corrente permitem que o sinal seja transmitido por fibra ótica ou rádio, eliminando com isso a preocupação com o isolamento.[2]

Os transdutores de tensão também podem ser do tipo divisor capacitivo ou pontas de prova de osciloscópios que são

adequados para níveis de tensão secundária.[2][5]

### 2.1.2 Condicionador de Sinal

Os condicionadores de sinal tornam os sinais, de tensão e de corrente vindos dos transdutores, compatíveis com o analisador de espectro. Esses condicionadores são geralmente amplificadores e/ou filtros.[2]

### 2.1.3 Analisador de Espectro

O analisador de espectro é um dispositivo que faz a amostragem dos sinais de tensão e corrente (conversor A/D), determina as suas harmônicas e mostra esses resultados em forma de gráfico (espectro de frequência).

O espectro de frequências é obtido através da análise de Fourier para formas-de-onda digitalizadas, ou seja é utilizada a técnica da Transformada Rápida de Fourier (FFT).

A FFT é um algoritmo para o cálculo da transformada discreta de Fourier (DFT) de sinais discretos no tempo, ou seja, a forma-de-onda é amostrada (digitalizada) e armazenada na forma de pontos separados por intervalos de tempo iguais. Esse algoritmo é aplicado nesse conjunto de pontos que deve ser em número de potência de dois para simplificar a sua aplicação.[4][7]

O tempo entre as amostras (frequência de amostragem) é fornecido pelo critério de Nyquist. Esse critério diz que a frequência de amostragem deve ser pelo menos o dobro da maior frequência harmônica que se deseja medir. O critério de Nyquist evita a ocorrência de um fenômeno chamado "aliasing" durante a amostragem do sinal. Uma forma-de-onda sendo amostrada com uma frequência menor do que a frequência de Nyquist vai apresentar frequências baixas inexistentes, após a aplicação da FFT.[4][7]

### 2.1.4 Armazenamento de Dados

O armazenamento de dados amostrados (tensão e corrente) e processados (espectro de frequência) é feito utilizando-se os recursos disponíveis nos computadores pessoais, quais sejam : disquetes e/ou disco rígido.

## 3. Aplicações

Nas aplicações da técnica de medição de harmônicos foram feitas medições de tensão e de corrente utilizando o sistema computadorizado como descrito acima, porém com algumas modificações. Chamamos atenção, ainda, ao fato de que durante as medições não foi de objetivo principal a preocupação com a precisão dos resultados, mas sim, com a técnica propriamente dita, ou seja, a interligação dos módulos (etapas) do medidor.

As medições foram feitas em baixa tensão (380 V entre fases e 220 V fase-neutro) e como fontes de harmônicos foram utilizados os seguintes equipamentos: inversor de frequência trifásico, controlador lógico programável (CLP), microcomputador e um televisor em cores.

Um divisor de tensão resistivo e um resistor série foram utilizados como sensores de tensão e de corrente, respectivamente (ver Figura 2).

O condicionador de sinal foi feito com um circuito amplificador diferencial com opto-isolador, conforme Figura 3. A Figura 4 mostra a curva de resposta desse condicionador de sinal.

Um conversor A/D de 12 bits, juntamente com o programa computacional escrito em linguagem C foram utilizados para a aquisição (digitalização) das formas-de-onda de tensão e de corrente dos dispositivos acima mencionados, com frequência de amostragem de 4096 Hz. Um programa computacional de plotagem de curvas contendo o algoritmo FFT foi usado para converter as formas-de-onda amostradas no

domínio do tempo para o domínio da frequência.

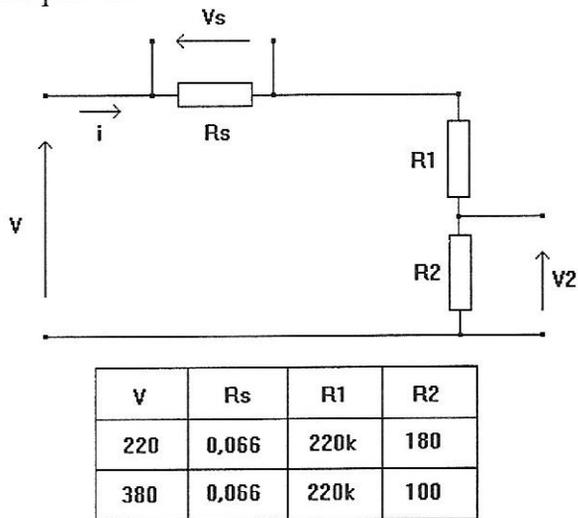


FIGURA 2 : Sensores de Tensão e de Corrente

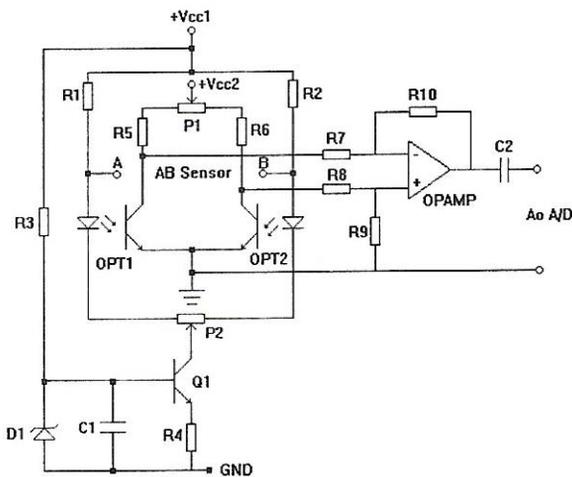


FIGURA 3 : Condicionador de Sinal

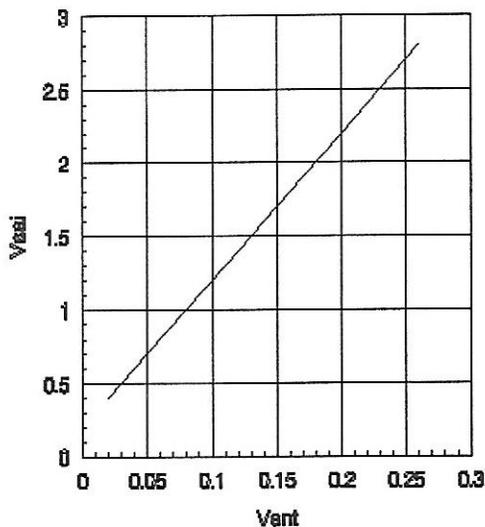


FIGURA 4 : Curva de Resposta do Condicionador de Sinal

Como a distorção de tensão praticamente não foi detectada nas medições, conforme mostra um exemplo abaixo, apenas as formas-de-onda de corrente nos domínios do tempo e da frequência para os dispositivos citados são mostradas adiante.

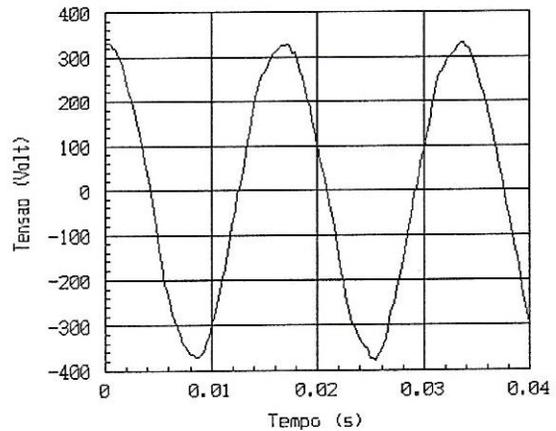


FIGURA 5 : Tensão Típica (Dom. Tempo)

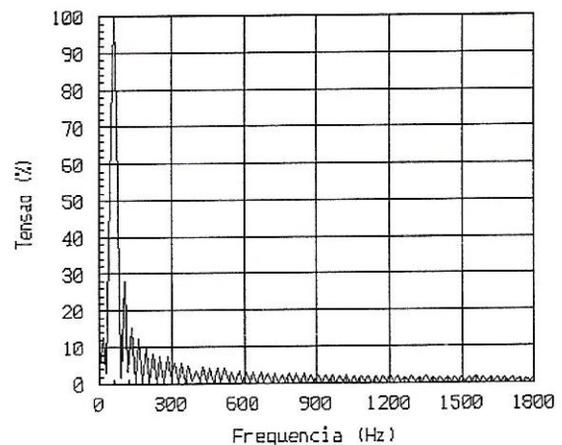


FIGURA 6 : Tensão Típica (Dom. Freq.)

a) Inversor de Frequência Trifásico :

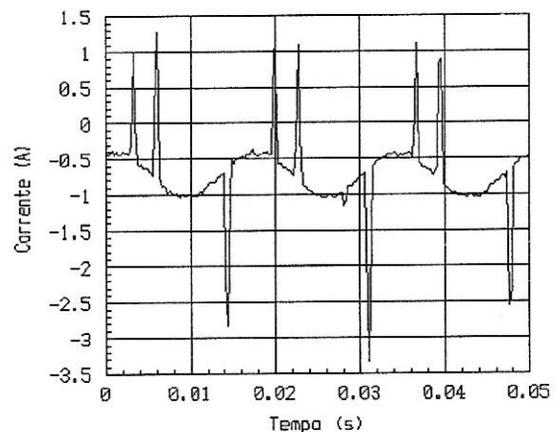


FIGURA 7 : Corrente no inversor (Dom. Tempo)

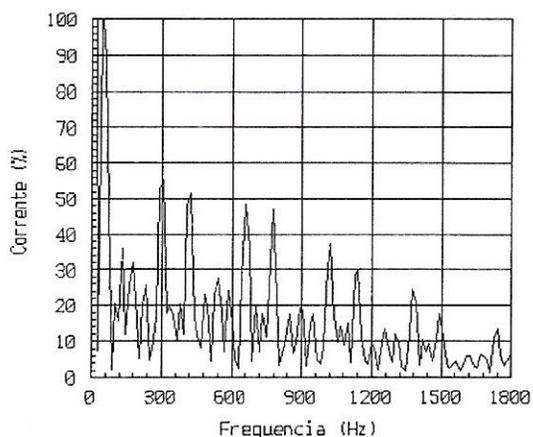


FIGURA 8 : Corrente no inversor (Dom. Freq.)

b) Controlador Lógico Programável (CLP) :

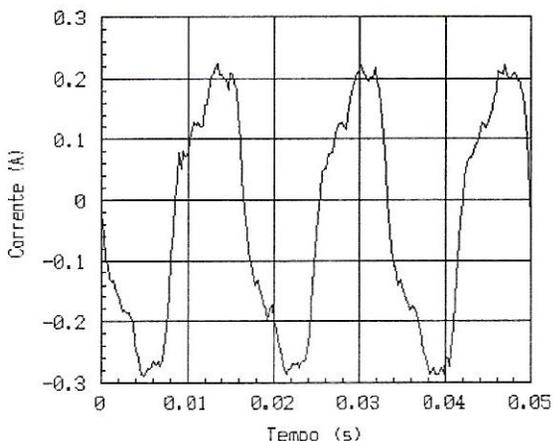


FIGURA 9 : Corrente no CLP (Dom. Tempo)

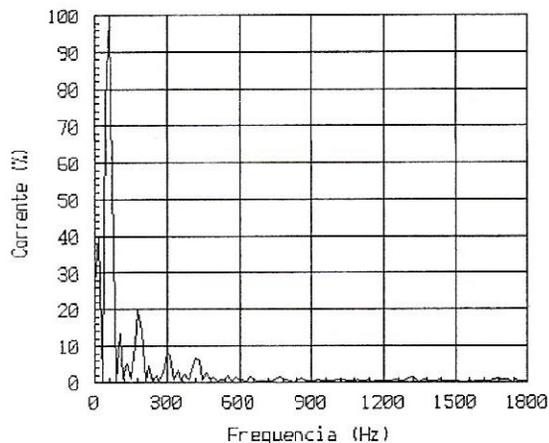


FIGURA 10 : Corrente no CLP (Dom. Freq.)

c) Microcomputador :

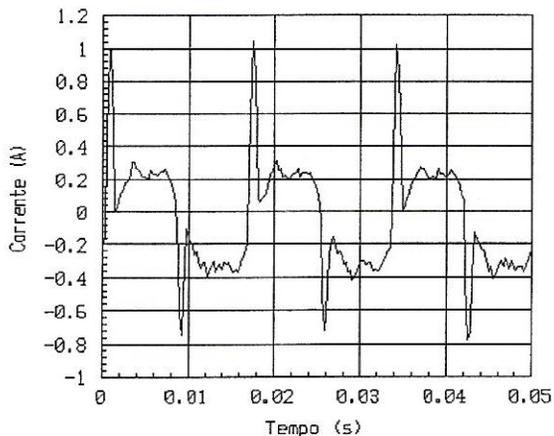


FIGURA 11 : Corrente no microcomputador (Dom. Tempo)

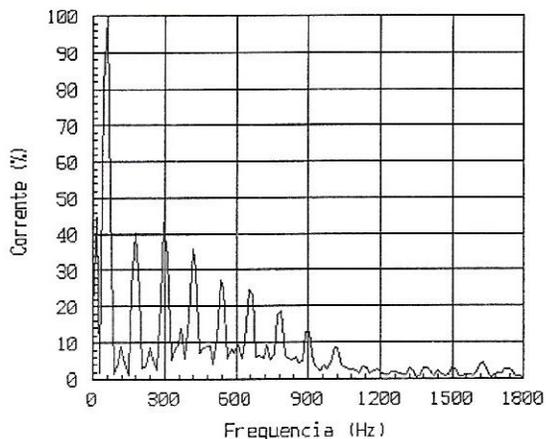


FIGURA 12 : Corrente no microcomputador (Dom. Freq.)

d) Televisor em Cores :

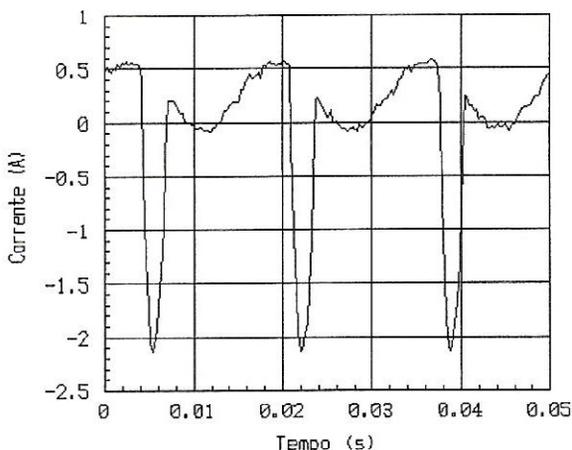


FIGURA 13 : Corrente no TV em cores (Dom. Tempo)

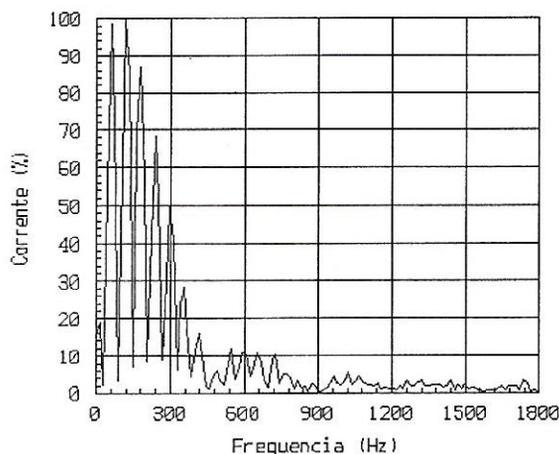


FIGURA 14 : Corrente no TV em cores  
(Dom. Freq.)

#### 4. Conclusão

Com a crescente utilização de equipamentos eletrônicos (retificadores, inversores, etc.) em sistemas elétricos industriais, os níveis de distorções harmônicas tendem a aumentar, tornando os seus efeitos prejudiciais e indesejáveis.

O conhecimento das fontes de harmônicos, bem como a localização delas no sistema, juntamente com a monitoração (medição) das distorções são condições essenciais para o diagnóstico e eliminação dos problemas causados por elas.

A medição de harmônicos utilizando microcomputador se mostra uma boa opção entre as técnicas existentes, pois a mesma dá resultados rápidos, precisos e confiáveis.

#### 5. Referências Bibliográficas

- [1] ARRILAGA, J. et al. **Power System Harmonics**. John Wiley, New York, 1985.
- [2] DUGAN, R. C. et al. **Electric Power Harmonics Design Guide**. McGraw-Edison Systems, 1990.
- [3] KENDALL, P. G. **A Review of Harmonics in Power Systems**. Int. J. Elect. Enging. Educ., vol. 19, pp. 101-109, Machester U. P., 1982.
- [4] SUBJACK, JR., J. S. et al. **Harmonic - Causes, Effects, Measurements, and Analysis : an Update**. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 26, n. 6, Nov./Dez., 1990.
- [5] SUTHERLAND, P. E. **Harmonic Measurements in Industrial Power Systems**. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 31, n. 1, Jan./Feb., 1995.
- [6] TOTH III, J. J. et al. **Benefits of an Automated On-line Harmonic Measurement**. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-22, n. 5, Sep./Oct., 1986.
- [7] WINN, J. K. et al. **Harmonic Measurements Using a Digital Storage Oscilloscope**. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 25, n. 4, Jul./Aug., 1989.