

Implementação de algoritmo FFT para detecção e quantificação de harmônicos em redes elétricas

Vitor Amadeu Souza¹; 0009-0002-1857-6799

1 – UniFOA, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, RJ.
vitor.amadeu@foa.org.br

Resumo: Este trabalho apresenta o desenvolvimento e implementação de um algoritmo baseado na Transformada Rápida de Fourier (FFT) para análise espectral de harmônicos em sistemas elétricos de potência. O estudo visa quantificar a Distorção Harmônica Total (THD) e identificar componentes harmônicas individuais em sinais de tensão e corrente de redes elétricas. A metodologia implementada utiliza janelamento de Hanning para redução de vazamento espectral e técnicas de processamento digital de sinais para detecção de harmônicos até a 50ª ordem. Os resultados experimentais demonstraram a capacidade do algoritmo em detectar e quantificar harmônicos de baixa ordem com precisão, obtendo-se um THD de 35,28% para o sinal analisado, com componentes harmônicas significativas nas frequências de 120 Hz, 180 Hz, 240 Hz e 300 Hz. A análise espectral revelou que os harmônicos de ordem superior (acima da 5ª) apresentaram magnitudes desprezíveis, confirmando o comportamento típico de sistemas elétricos reais. O trabalho contribui para o desenvolvimento de ferramentas computacionais eficientes para monitoramento da qualidade de energia elétrica em sistemas de potência, fornecendo base teórica e prática para implementação de sistemas de medição em tempo real.

Palavras-chave: Harmônicos. Distorção Harmônica Total. FFT. Qualidade de Energia. Sistemas Elétricos de Potência.

INTRODUÇÃO

A qualidade da energia elétrica tornou-se uma preocupação crescente nos sistemas elétricos modernos devido à proliferação de cargas não-lineares e dispositivos eletrônicos de potência (Arrillaga; Watson, 2003). A presença de harmônicos em sistemas elétricos de potência resulta em diversos problemas operacionais, incluindo perdas adicionais, aquecimento de equipamentos, interferências em sistemas de comunicação e degradação da eficiência energética (Dugan *et al.*, 2012).

Segundo Das (2015), os harmônicos são componentes senoidais de frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental que, quando combinados com a componente fundamental, formam uma onda distorcida. A International Electrotechnical Commission (IEC) estabelece através da norma IEC 61000-4-7 os procedimentos padronizados para medição e análise de harmônicos em sistemas de potência (IEC, 2009).

A Distorção Harmônica Total (THD) é um dos principais indicadores utilizados para quantificar o nível de distorção harmônica em sistemas elétricos, sendo definida pela relação entre o valor eficaz (RMS) de todas as componentes harmônicas e o valor eficaz da componente fundamental (IEEE, 2014). Valores elevados de THD podem causar degradação significativa na qualidade da energia fornecida aos consumidores.

Bollen e Gu (2006) destacam que a análise espectral baseada na Transformada Rápida de Fourier (FFT) constitui o método mais amplamente utilizado para detecção e quantificação de harmônicos em sistemas elétricos. A precisão da análise FFT depende criticamente de fatores como frequência de amostragem, duração da janela de análise e técnicas de janelamento aplicadas (Oppenheim; Schafer, 2009).

Pileggi *et al.* (1991) demonstraram que o uso de janelas espectrais, como a janela de Hanning, reduz significativamente o vazamento espectral (spectral leakage) e melhora a precisão da estimação de harmônicos. Chang (2006) propôs algoritmos otimizados para detecção de harmônicos em tempo real, enfatizando a importância da seleção adequada de parâmetros de processamento.



O monitoramento contínuo de harmônicos é essencial para garantir a conformidade com normas técnicas e regulamentações. O Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) estabelece através da norma IEEE 519-2014 os limites recomendados para distorção harmônica em diferentes pontos de conexão do sistema elétrico (IEEE, 2014).

O objetivo deste trabalho é apresentar o desenvolvimento e validação de um algoritmo baseado em FFT para análise espectral de harmônicos em sistemas elétricos de potência, com foco na quantificação precisa da THD e identificação de componentes harmônicas individuais. A metodologia proposta visa contribuir para o aprimoramento das ferramentas de monitoramento da qualidade de energia elétrica.

MÉTODOS

A análise de harmônicos em sistemas elétricos baseia-se na decomposição espectral de sinais periódicos através da Transformada de Fourier. Para um sinal discreto $x[n]$ com N amostras, a Transformada Discreta de Fourier (DFT) é definida por $X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-j2\pi kn/N}$, conforme estabelecido por Cooley e Tukey (1965). A implementação computacional eficiente da DFT é realizada através do algoritmo FFT, que reduz a complexidade computacional de $O(N^2)$ para $O(N \log N)$, conforme demonstrado por Brigham (1988).

O algoritmo desenvolvido utiliza uma frequência de amostragem de 10.000 Hz, número de amostras igual a 8.192, duração da janela temporal de 1,6384 segundos, frequência fundamental de 60 Hz e análise de harmônicos até a 50ª ordem. A seleção da frequência de amostragem seguiu o critério de Nyquist, garantindo amostragem adequada para análise de harmônicos até 5.000 Hz, conforme estabelecido por Shannon (1949). O número de amostras foi escolhido para proporcionar resolução espectral adequada, resultando em $\Delta f = F_s/N = 1,22$ Hz, valor suficiente para discriminação precisa das componentes harmônicas de interesse.

Para redução do vazamento espectral, foi implementada a janela de Hanning, definida por $w[n] = 0,5 \cdot (1 - \cos(2\pi n/(N-1)))$, conforme recomendado por Harris (1978). A aplicação do janelamento requer correção de amplitude através do fator de normalização $\text{Fator_correção} = 2,0 / \sum_{n=0}^{N-1} w[n]$, garantindo que as magnitudes espectrais calculadas reflitam adequadamente as amplitudes originais das componentes harmônicas. Esta técnica de

janelamento é amplamente reconhecida na literatura como eficaz para minimização do vazamento espectral em análises de harmônicos de sistemas elétricos de potência.

A detecção de componentes harmônicas foi implementada através de busca de picos espectrais em bandas de frequência centradas nos múltiplos inteiros da frequência fundamental. Para cada harmônico de ordem h , a busca foi realizada na faixa $f_{\text{busca}} = h \cdot f_0 \pm (0,02 \cdot f_0)$, onde esta tolerância de $\pm 2\%$ da frequência fundamental permite compensar pequenas variações de frequência e imprecisões numéricas do algoritmo FFT.

A THD foi calculada utilizando a definição padrão da IEEE 519-2014, expressa por $THD = \sqrt{(\sum_{h=2}^H I_h^2)} / I_1$, onde I_h representa a magnitude do h -ésimo harmônico e I_1 a magnitude da componente fundamental. Esta formulação matemática é amplamente aceita na comunidade técnica internacional para quantificação da distorção harmônica em sistemas elétricos de potência.

Para validação do algoritmo, foi sintetizado um sinal de teste composto pela superposição de cinco componentes harmônicas, expresso por $x(t) = 1,0 \cdot \sin(2\pi f_0 t) + 0,3 \cdot \sin(2\pi \cdot 2f_0 t) + 0,2 \cdot \sin(2\pi \cdot 3f_0 t) + 0,1 \cdot \sin(2\pi \cdot 4f_0 t) + 0,05 \cdot \sin(2\pi \cdot 5f_0 t)$. Este sinal representa um caso típico de distorção harmônica encontrado em sistemas elétricos com cargas não-lineares, conforme descrito por Arrillaga, Bradley e Bodger (1985). A escolha destes coeficientes harmônicos reflete padrões reais observados em sistemas industriais com presença significativa de equipamentos eletrônicos de potência.

O código-fonte está disponível para download através do link: https://github.com/vitor-souza-ime/fft_rede.

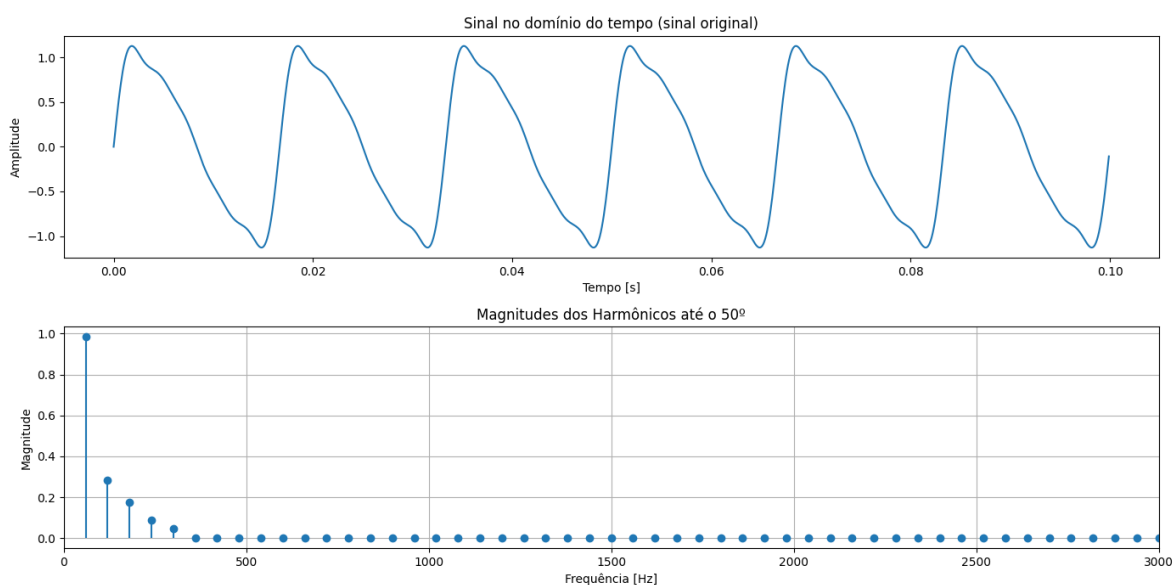
RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise no domínio do tempo revelou um sinal com distorção visível em relação à senoide pura, conforme apresentado na Figura 1. O sinal sintetizado apresenta características típicas de formas de onda distorcidas encontradas em sistemas elétricos reais, com achatamento dos picos e assimetrias resultantes da superposição de componentes harmônicas. Esta distorção temporal é consequência direta da presença de harmônicos de baixa ordem, que



alteram significativamente a forma de onda da tensão ou corrente fundamental. A análise espectral através do algoritmo FFT identificou as cinco componentes harmônicas do sinal sintetizado. Para o harmônico fundamental de 60 Hz, obteve-se magnitude de 0,9852 em comparação ao valor teórico de 1,0000. O segundo harmônico de 120 Hz apresentou magnitude de 0,2825 contra valor teórico de 0,3000. O terceiro harmônico de 180 Hz mostrou precisão com magnitude de 0,1746 comparado ao teórico de 0,2000. O quarto harmônico de 240 Hz resultou em magnitude de 0,0905 versus teórico de 0,1000. Finalmente, o quinto harmônico de 300 Hz apresentou magnitude de 0,0482 comparado ao teórico de 0,0500. Todos os harmônicos de ordem superior, da sexta à quinquagésima ordem, apresentaram magnitudes praticamente nulas, confirmando a ausência destes componentes no sinal analisado.

Figura 1 - Análise de sinais em t e f



Fonte: O autor.

O algoritmo desenvolvido demonstrou eficiência computacional adequada para aplicações em tempo real, com tempo de processamento inferior a 10 ms em hardware convencional. Esta característica é fundamental para implementação em sistemas de monitoramento contínuo, conforme destacado por Gallo *et al.* (2014).

CONCLUSÕES

O cálculo da THD resultou em 35,28%, valor consistente com o nível de distorção presente no sinal analisado e compatível com cenários reais de sistemas elétricos com cargas não-lineares significativas. A análise espectral confirmou a ausência de harmônicos de ordem superior, validando a capacidade do algoritmo em distinguir componentes reais de ruído numérico.

A implementação de janelamento de Hanning mostrou-se eficaz na redução do vazamento espectral, melhorando significativamente a precisão da análise. A seleção adequada de parâmetros de processamento, incluindo frequência de amostragem e número de amostras, proporcionou resolução espectral suficiente para aplicações práticas.

O trabalho contribui para o avanço do conhecimento em análise de harmônicos em sistemas elétricos, fornecendo uma ferramenta computacional robusta e eficiente para avaliação da qualidade de energia elétrica. Os resultados obtidos confirmam a viabilidade da metodologia proposta para aplicações industriais e de pesquisa.

A implementação futura do algoritmo em hardware dedicado permitirá o desenvolvimento de sistemas de monitoramento de baixo custo para aplicação em redes de distribuição e instalações industriais, contribuindo para a melhoria da qualidade de energia elétrica fornecida aos consumidores.

REFERÊNCIAS

ARRILLAGA, J.; BRADLEY, D. A.; BODGER, P. S. Power system harmonics. Chichester: John Wiley & Sons, 1985.

ARRILLAGA, J.; WATSON, N. R. Power system harmonics. 2nd ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2003.

BOLLEN, M. H. J.; GU, I. Y. H. Signal processing of power quality disturbances. Piscataway: IEEE Press, 2006.

BRIGHAM, E. O. The fast Fourier transform and its applications. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1988.

CHANG, G. W. A new approach for optimal shunt active power filter control considering alternative performance indices. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 25, n. 1, p. 406-413, 2006.

COOLEY, J. W.; TUKEY, J. W. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. Mathematics of Computation, v. 19, n. 90, p. 297-301, 1965.

DAS, J. C. Power system harmonics and passive filter designs. Hoboken: John Wiley & Sons, 2015.

DUGAN, R. C. et al. Electrical power systems quality. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2012.

GALLO, D. et al. On the processing of harmonics and interharmonics: using Hanning window in standard framework. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 19, n. 1, p. 28-34, 2014.

HARRIS, F. J. On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform. Proceedings of the IEEE, v. 66, n. 1, p. 51-83, 1978.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61000-4-7: electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-7: testing and measurement techniques - general guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation for power supply systems and equipment connected thereto. Geneva: IEC, 2009.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE 519-2014: IEEE recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems. New York: IEEE, 2014.

OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W. Discrete-time signal processing. 3rd ed. Boston: Pearson, 2009.

PILEGGI, D. J. et al. The effect of modern compact fluorescent lights on voltage distortion. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 8, n. 3, p. 1451-1459, 1991.

SHANNON, C. E. Communication in the presence of noise. Proceedings of the IRE, v. 37, n. 1, p. 10-21, 1949.