



Analizador harmônico para medidores de energia elétrica residenciais Harmonic analyzer for residential electricity meters

Michele Oliveira de Campos¹, Gabriel Tavore de Arruda², Thiago Kenzo Mori³,
Wesley Angelino de Souza⁴

RESUMO

A expansão da escala industrial favoreceu o surgimento de equipamentos mais eficientes e modernos, porém mais sensíveis a variações na qualidade de energia elétrica (QEE) fornecida. Junto a isto, houve o aumento rápido da carga nas linhas de energia, especialmente com o uso generalizado de equipamentos não lineares, provocando distúrbios nas redes e cargas elétricas. Considerando este panorama, este trabalho apresenta uma análise de dois métodos para o cálculo do indicador de distorção harmônica total da tensão. Para isto, foi realizado a aquisição dos sinais de tensão utilizando um microcontrolador ESP32, que recebe as grandezas e calcula o indicador de distorção harmônica com base no espectro de frequência utilizando a Transformada Rápida de Fourier e também utilizando um método de implementação digital de uma malha de captura de fase com análise no domínio do tempo, ambos implementados em linguagem C++. Os resultados mostram, que ambos os métodos utilizados possuem variações em suas medições, com valores baixos de desvio padrão quando comparados com medidor analisador de energia.

PALAVRAS-CHAVE: Harmônicos; Monitoramento de Energia; Qualidade de energia elétrica.

ABSTRACT

The expansion of the industrial scale has facilitated the emergence of more efficient and modern equipment, albeit more sensitive to variations in the supplied electric power quality. Alongside this, there has been a rapid increase in the load on power lines, especially with the widespread use of non-linear equipment, leading to disturbances in grids and electrical loads. Regarding this scenario, this study analyzes two methods for calculating the total harmonic distortion indicator of voltage. To achieve this, voltage signals were acquired using an ESP32 microcontroller, which receives the measurements and calculates the harmonic distortion indicator based on the frequency spectrum using the Fast Fourier Transform and a digital implementation method of a phase-locked loop, both implemented in the C++ language. The results show that both methods have measurement variations with low standard deviation values compared to the energy analyzer.

KEYWORDS: Harmonics; power energy monitoring; power quality.

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, houve uma expansão da escala produtiva industrial, favorecendo o crescimento da automação, utilizando e produzindo equipamentos modernos com aprimoramento no desempenho e eficiência. No entanto, tais equipamentos são mais sensíveis a variações na rede elétrica, fazendo com que não funcionem como esperado. Junto a isto, houve o crescimento da inserção de cargas não lineares no sistema elétrico, comprometendo seriamente a qualidade de energia elétrica (QEE) fornecida, pois podem distorcer a forma de onda da corrente e da tensão na rede elétrica (SANKARAN, 2017).

¹ Bolsista do PIVIC. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Brasil. E-mail: michelecampos@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 0582061260816236.

² Bolsista do PIVIC. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Brasil. E-mail: gabriel.2019@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 6133828718115699.

³ Bolsista do PIBIT. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Brasil. E-mail: thiagomori@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 4819625262739741.

⁴ Docente no Departamento Acadêmico de Elétrica (DAELE). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: wesleyangelino@utfpr.edu.br. ID Lattes: 8594457321079718.



Correntes distorcidas provenientes de cargas que produzem harmônicos também distorcem a tensão ao passar pela impedância do sistema. Assim, uma tensão distorcida pode ser fornecida aos usuários finais (residenciais e comerciais). Nesta circunstância, o interesse no estudo das harmônicas surge devido aos seus efeitos prejudiciais em dispositivos do sistema de energia, ocasionando uma severa diminuição da vida útil dos aparelhos eletrônicos, podendo danificá-los irreversivelmente. Portanto, compreender e mensurar componentes harmônicas dentro do sistema de energia é importante para prevenir falhas e evitar perdas econômicas (SANKARAN, 2017).

Para cumprir com essa necessidade, normas apresentam diversas recomendações e definições a serem consideradas para a avaliação da QEE, em qualquer tipo de instalação ou condição de fornecimento (ANEEL, 2021; IEEE, Std 519-2022). Para monitorar localmente ou a distância a energia elétrica, são utilizadas técnicas digitais de processamento de sinais, juntamente com medidores de QEE ou “qualímetros” (SOUZA et al., 2011). Um dos fenômenos abordados em QEE é a distorção harmônica, que está associada a deformações nas formas de onda de corrente e tensão quando comparado com a onda senoidal da frequência fundamental (ANEEL, 2021).

Neste contexto, este trabalho aborda duas técnicas de análise harmônica para medidores de energia elétrica com base na aquisição de sinais de tensão. Com a coleta dos dados da rede elétrica, foi implementado um algoritmo para a análise de espectro de frequência utilizando a Transformada Rápida de Fourier (FFT, do inglês – *Fast Fourier Transform*) pelo método borboleta (PRESS, 1996). A outra técnica apresentada é baseada na implementação digital de uma malha de captura de fase (PLL, do inglês – *Phase-Locked Loop*), sendo uma análise no domínio do tempo (MARAFÃO, 2004). Tal estudo tem como objetivo a comparação entre os dois modelos através do custo computacional e precisão na identificação do conteúdo harmônico do sinal da rede elétrica, de acordo com indicador presente em ANEEL (2021). Desta forma, as próximas seções apresentam o desenvolvimento da análise comparativa realizada.

MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção são apresentados dois métodos utilizados para a identificação do conteúdo harmônico presente no sinal de tensão, bem como aspectos da implementação e indicador de QEE.

TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER

Para este trabalho, é considerado a FFT com decimação no tempo pelo método *Radix 2*, conhecido também como método borboleta (PRESS, 1996; HAYES, 1999). A implementação computacional de uma DFT (do inglês – *Discrete Fourier Transform*) requer N^2 multiplicações e adições complexas. Diante disto, a FFT busca acelerar os cálculos utilizando as propriedades de periodicidade e simetria das exponenciais complexas, juntamente com uma estratégia de “dividir e conquistar”, dividindo sucessivamente o sinal amostrado $x(n)$ de tamanho N amostras em seqüências de tamanho $N/2$, separando o sinal em componentes de índice par e de índice ímpar, conforme base matemática encontrada em Hayes (1999). Tal divisão recursiva resulta em um padrão de “bit reverso” nos índices das amostras de entrada. Com isto, é possível armazenar as operações nos mesmos registradores do vetor de entrada de tamanho N .

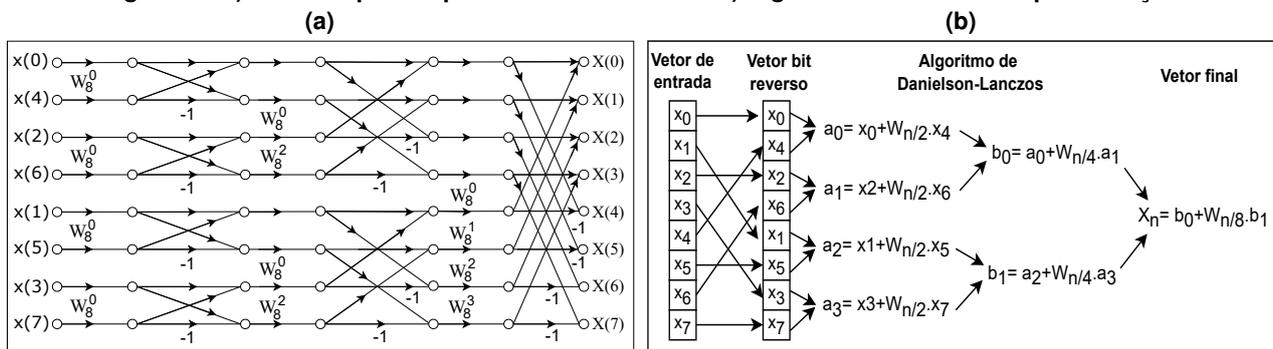
Com a divisão, são combinados pares adjacentes para obter uma DFT de dois pontos. Na seqüência, outra combinação de pares adjacentes é realizada para obter uma DFT de quatro pontos,

e assim recursivamente, decompondo uma DFT de N pontos em DFTs menores e calculando as subtransformadas, até que a primeira e a segunda metade de todo o conjunto de amostras sejam combinadas, obtendo o vetor final com as componentes do espectro de frequência (PRESS, 1996), este processo pode ser visualizado na Figura 1a.

A rotina para o cálculo da FFT possui duas seções. A primeira organiza o vetor de entrada $x(n)$ em ordem reversa de bits. E a segunda seção é dividida em um *loop* externo que é executado $\log_2 N$ vezes e realiza o cálculo sucessivo das transformadas de acordo com os números de pontos do vetor de entrada. Em cada estágio, tem-se dois *loops* internos aninhados que realiza os cálculos das subtransformadas e dos elementos de cada transformada, implementando o método borboleta. Tal algoritmo tem sua eficiência máxima quando são utilizadas sequências com comprimento de potência de 2 (PRESS, 1996).

Portanto, ao invés de N^2 operações complexas, são necessárias $N/2 \cdot \log_2 N$ multiplicações complexas e $N \cdot \log_2 N$ adições complexas, representando uma redução significativa com relação ao custo computacional (HAYES, 1999). A implementação deste algoritmo foi baseada na rotina abordada em Press (1996) e apresentada na Figura 1b. Tal método permite uma fácil implementação em microcontroladores, pois exige apenas cálculos de multiplicação, soma, subtração e abordagem de recorrência trigonométrica (PRESS, 1996).

Figura 1 – a) FFT de 8 pontos pelo método borboleta. b) Algoritmo utilizado na implementação.



Fonte: a) Adaptado de HAYES (1999). b) Elaborado pelos autores (2023).

MALHA DE CAPTURA DE FASE (PLL)

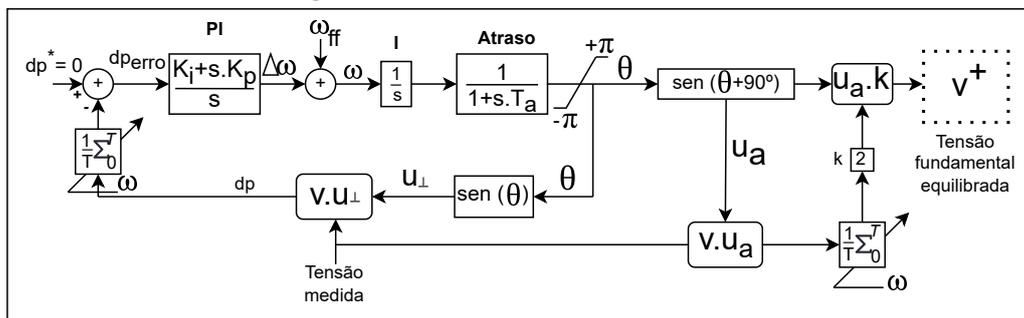
Vários indicadores de qualidade de energia se baseiam em algoritmos sensíveis a variações da frequência fundamental conforme abordado em ANEEL (2021). Neste contexto, com o objetivo de realizar uma análise harmônica no domínio do tempo, este trabalho utiliza um modelo de PLL digital monofásico proposto por Marafão (2004), que tem como fundamento propriedades de álgebra vetorial e na definição de ortogonalidade entre funções temporais, a base matemática pode ser encontrada em E. Kreyszig, H. Kreyszig e Norminton (2011). Tal algoritmo tem como finalidade identificar o ângulo de sincronismo e frequência fundamental do sinal de tensão na entrada do PLL.

O modelo de PLL monofásico digital tem como ideia principal sintetizar uma senoide de amplitude unitária que seja ortogonal à fundamental da tensão medida, em condição de regime permanente. Para isso, a média do produto escalar entre a tensão de entrada (um vetor “ v ”) e a senoide unitária (vetor “ u ”) gerada a partir de variáveis internas do PLL (ω, θ) deve convergir para zero. Esta operação é realizada através de uma soma discreta, que também pode ser interpretada como um filtro de média móvel (MARAFÃO, 2004; OPPENHEIM; SCHAFER; BUCK, 1999).

Um controlador proporcional-integral (PI) recebe o erro do produto escalar e converte em um sinal de ajuste da frequência ($\Delta\omega$), permitindo a identificação da frequência fundamental da tensão de entrada (ω) expressa em rad/s. A partir da saída do regulador PI, é obtido uma função temporal que define o argumento θ através de uma simples integração, tal argumento é atrasado em 90° em relação ao ângulo de fase da tensão de entrada e é utilizado para sintetizar a senoide gerada digitalmente (MARAFÃO, 2004). Para melhorar a resposta dinâmica inicial do PLL, é inserido uma variável de inicialização $\omega_{ff} = 2\pi f_n$, onde f_n é a frequência nominal do sistema e para este trabalho foi utilizado o valor de 60Hz conforme a frequência fundamental padrão da rede elétrica brasileira (ANEEL, 2021). A fim de representar o atraso entre a conversão analógico-digital, é utilizado uma função de atraso.

O sinal de saída do PLL ainda pode conter desequilíbrios, para resolver isso é realizado o avanço em 90° do sinal de saída (u_a) e multiplicado pelo sinal de tensão medida. O resultado é multiplicado por um fator de escala k que determina a amplitude do sinal de tensão equilibrado. Dessa forma, realizando a subtração do sinal da tensão medida pelo sinal de saída do PLL, que é equivalente a fundamental da tensão medida, obtém-se um sinal das componentes de distorção e na sequência é possível calcular o indicador $DTT\%$. A Figura 2 mostra a estrutura do PLL monofásico. Aspectos da implementação, como o projeto do controlador PI e demais itens são encontrados em Marafão (2004). Destaca-se que, o algoritmo do PLL pode ser implementado conforme Figura 2.

Figura 2 – PLL Monofásico – Modelo Geral



Fonte: Adaptado de Marafão (2004).

INDICADOR DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA E AQUISIÇÃO DOS DADOS

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) apresenta os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), que estabelecem regras a distribuição de energia elétrica (ANEEL, 2021), cujo módulo 8 apresenta indicadores e procedimentos relativos à qualidade do fornecimento de energia elétrica. Para este trabalho, é considerado o indicador de distorção harmônica total da tensão ($DTT\%$), considerando uma rede elétrica operando a 127 Volts. As distorções harmônicas são fenômenos associados a deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental 60Hz.

A aquisição dos dados foi realizada utilizando um ESP32 e um sensor de tensão AC ZMPT101B. Ao receber os dados, o ESP32 é o responsável por calcular o indicador de QEE utilizando os métodos FFT e PLL implementados em linguagem C++. A aquisição dos sinais de tensão foi realizada a 7,68kHz.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a validação dos algoritmos implementados conforme abordado nas seções anteriores, foram realizadas coletas dos sinais de tensão em diversos momentos do dia. Foi realizada a



XIII Seminário de Extensão e Inovação XXVIII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR

Ciência e Tecnologia na era da Inteligência Artificial: Desdobramentos no Ensino Pesquisa e Extensão
20 a 23 de novembro de 2023 - Campus Ponta Grossa, PR



SEI-SICITE
2023

comparação da decomposição harmônica entre o método borboleta calculado pelo sistema de medição deste trabalho e um analisador de energia comercial ISSO P200. Os resultados podem ser observados na Tabela 1. Com este estudo, pode-se perceber uma variação do algoritmo FFT em algumas casas decimais quando comparado com os valores obtidos a partir do analisador de energia.

Tabela 1 – Resultados comparativos do algoritmo FFT e Analisador de energia para a decomposição harmônica

Ordem Harmônica	Algoritmo FFT	Analisador de Energia	Erro Percentual
1	124,41	123,482	0,75%
3	2,348	2,376	1,18%
5	1,12	1,29	13,18%
7	1,112	0,998	11,42%
9	0,856	0,908	5,73%
11	0,332	0,292	13,70%
13	0,166	0,13	27,70%
15	0,382	0,468	18,38%
17	0,146	0,204	28,43%
19	0,112	0,14	20,00%
21	0,11	0,084	30,92%
23	0,042	0,164	74,39%
25	0,06	0,062	3,22%
27	0,08	0,04	100%
29	0,022	0,034	35,29%
31	0,014	0,022	36,36%

Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Conforme a Tabela 1, existem algumas discrepâncias em algumas harmônicas, porém o valor total do $DTT\%$ na comparação entre a técnica FFT e o do P200 se apresentam próximos. Para reforçar esta análise, foi efetuada a análise comparativa do $DTT\%$ utilizando os algoritmos da FFT pelo método borboleta e PLL, juntamente com o analisador de energia P200. Os resultados obtidos podem ser visualizados na Tabela 2. Os valores médios indicam que há uma aproximação entre os valores obtidos pela técnica FFT e o P200, com uma diferença maior entre a técnica PLL e o P200. Considerado os valores de desvio padrão baixos, pode-se perceber que os valores medidos tem pouca variação, tanto para o algoritmo utilizando a FFT quanto para o PLL.

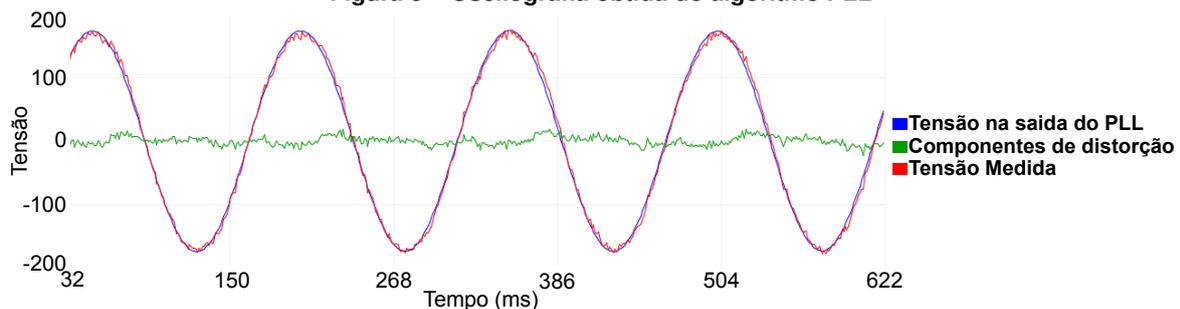
Tabela 2 – Resultados comparativos do algoritmo FFT e PLL para o indicador $DTT\%$

	Análise comparativa algoritmo FFT		Análise comparativa algoritmo PLL	
	Algoritmo FFT	Analisador de Energia	Algoritmo PLL	Analisador de Energia
Valor Médio $DTT\%$	3,19%	2,76%	4,96%	2,72%
Desvio Padrão	0,11	0,08	0,24	0,03

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Em relação à qualidade do resultado, recomenda-se a FFT como implementação, porém a técnica PLL se apresenta eficiente na identificação do sinal fundamental, conforme apresenta oscilografia da Figura 3, exibindo a sincronização da saída do PLL com a tensão medida.

Figura 3 – Oscilografia obtida do algoritmo PLL



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).



CONCLUSÃO

No desenvolvimento deste trabalho, foi realizado a comparação entre dois métodos, a transformada rápida de Fourier (FFT) com análise no domínio da frequência e a malha de captura de fase no domínio do tempo, com a finalidade do cálculo do indicador de distorção harmônica total da tensão.

Os resultados mostram, que ambos os métodos utilizados possuem variações em suas medições, com valores baixos de desvio padrão. Tal efeito, pode ser procedente da utilização do sensor de tensão, que pode ser aprimorado a fim de possibilitar melhores resultados. Considerando o tempo computacional, a FFT pode ser processada em $O(N \cdot \log_2 N)$ operações, enquanto para o PLL são dados instantâneos, com uma dinâmica mais rápida, representando uma velocidade computacional menor quando comparado com a FFT.

Agradecimentos

Os autores agradecem a fundação Araucária, o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e ao Centro Integrado de Pesquisa em Controle e Automação (CIPECA) pelo suporte financeiro ou estrutural para o desenvolvimento deste projeto.

Conflito de interesse

Os autores declaram que não há conflito de interesse neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- ANEEL, Procedimentos. **Módulo 8—qualidade da energia elétrica**. Agência Nacional de Energia Elétrica: ANEEL, 2021.
- HAYES, M. H. **Schaum's outline of theory and problems of digital signal processing**. New York: McGraw Hill, 1999. (Schaum's outline series).
- IEEE, Std 519-2022. **IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems**. USA: Revision of IEEE Std 519-2014, Std 519-2022.
- KREYSZIG, E.; KREYSZIG, H.; NORMINTON, E. J. **Advanced engineering mathematics**. 10th ed. Hoboken, NJ: John Wiley, 2011.
- MARAFÃO, F. P. **Análise e controle da energia elétrica através de técnicas de processamento digital de sinais**. Dez. 2004. Tese de doutorado em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.
- OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W.; BUCK, J. R. **Discrete-time signal processing**. 2nd ed. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall, 1999.
- PRESS, William H. (Ed.). **FORTRAN numerical recipes**. 2nd ed. Cambridge [England] ; New York: Cambridge University Press, 1996.
- SANKARAN, C. **Power quality**. Boca Raton: CRC Press, 2017. (The electric power engineering series).
- SOUZA, W. A. et al. Análise de Circuitos Elétricos com Formas de Onda não Senoidais e/ou Desequilibradas Através da Teoria de Potência Conservativa. In: BRAZILIAN POWER QUALITY CONFERENCE (CBQEE). Cuiabá - MT - Brasil: SBQEE, out. 2011. v. 9, p. 1–7.