

APLICAÇÃO DE SUBAMOSTRAGEM PARA ANÁLISE DE DISTORÇÕES SUPRAHARMÔNICAS

THAIS MARTINS MENDES*, CARLOS AUGUSTO DUQUE, *Senior Member, IEEE**, LEANDRO RODRIGO MANSO DA SILVA*, DANTON DIEGO FERREIRA†

**Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Juiz de Fora
Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil*

*†Departamento de Engenharia
Universidade Federal de Lavras
Lavras, Minas Gerais, Brasil*

Emails: martins.thais@engenharia.ufjf.br, carlos.duque@ufjf.edu.br,
leandro.manso@ufjf.edu.br, danton@deg.ufla.br

Abstract— Recently, emissions in the frequency range of 2 kHz to 150 kHz, which is also referred to as supraharmmonic range, became object of study by the Power Quality (PQ) research community. The majority of the commercial PQ monitors cannot access this high frequency without hardware and firmware update for more complex processor and Analog to Digital Converter. The central focus of this work is to present a technique to access the supraharmonics without significantly modification of the hardware and software of the PQ analyzers. The technique is based on analog filter banks and subsampling approach. The use of subsampling technique allows the reduction of the number of samples processed by the Fast Fourier Transform (FFT). Through a systematic analysis, it was verified that the proposed methodology reduces computational complexity.

Keywords— Analog Filter Banks, Multirate Processing, Power Quality, Subsampling, Supraharmonics.

Resumo— Recentemente, emissões na faixa de frequência de 2 kHz a 150 kHz, referida como faixa supraharmônica, tornou-se objeto de estudo da comunidade pesquisadora em Qualidade de Energia Elétrica (QEE). A maioria dos monitores de QEE comerciais não estão habilitados ao acesso desta alta frequência sem atualização de hardware e software para processadores mais complexos e conversor analógico digital. O foco deste trabalho é apresentar uma técnica de análise de distorções supraharmônicas que possibilita o uso dos monitores dos QEE existentes sem modificação significativa de hardware e software. A técnica é baseada na utilização de um banco de filtros analógicos e aplicação de subamostragem. O uso da técnica de subamostragem permite a redução do número de amostras processadas pela FFT (Fast Fourier Transform). Através de uma análise sistemática, verificou-se que a metodologia proposta apresenta reduzida complexidade computacional.

Palavras-chave— Banco de Filtros Analógicos, Processamento Multitaxa, Qualidade de Energia Elétrica, Subamostragem, Supraharmônicos.

1 Introdução

Existe um crescente interesse dos pesquisadores em emissões na faixa de frequência de 2 kHz a 150 kHz, denominadas emissões supraharmônicas (Angulo et al., 2016; Bollen et al., 2008; Larsson et al., 2010). Este tópico vem sendo discutido nas últimas décadas, mas a quantidade de conhecimento sistemático sobre o assunto é limitada, sendo que a grande maioria dos instrumentos aplicados na medição da Qualidade de Energia Elétrica não atingem essa faixa de frequência (Bollen and Gu, 2006; Kapisch et al., 2016).

Emissões de alta frequência (2 kHz-150 kHz) ganharam atenção significativa nos últimos anos (Ronnberg et al., 2017; Meyer et al., 2014; Bollen et al., 2014), especialmente por organizações de estabelecimento de padrões (Commission et al., 2002; Commission et al., 2003; Commission et al., 2006). Existem consideráveis atividades dentro da IEC (SC 77A), CENELEC (SC 205A) e IEEE para desenvolver padrões, como níveis de compatibilidade, limites de emissão, imunidade e métodos de teste adequados, abrangendo

esta faixa de frequência. Alguns métodos de medições na faixa de 2 kHz a 150 kHz estão na norma IEC 61000-4-30 Ed3 - *in situ* de emissões de 2-150 kHz, IEC 61000-4-7 - método de medição para a faixa de 2-9 kHz e CISPR-16 - equipamentos e métodos para medir distúrbios e imunidade em frequências acima de 9 kHz.

Com o objetivo de aumentar a eficiência energética, o número de dispositivos com circuitos de comutação de alta frequência está crescendo continuamente (Larsson and Bollen, 2009). Esses dispositivos podem gerar supraharmônicos significativos. Um fator que aumenta a relevância das distorções supraharmônicas é a popularização das redes elétricas inteligentes (*Smart Grids*) (Ribeiro et al., 2013), que incentiva o uso da *Powerline Communication* (PLC), bem como a implantação de geração distribuída (GD). As *Smart Grids* constituem uma nova rede elétrica, não só dedicada a distribuir energia. A tendência atual é uma convergência em que todas as linhas de distribuição também possam transportar diferentes tipos de informações através das PLCs. Trabalhos comprovam que PLCs desempenham um pa-

pel significativo na emissão de supraharmônicos (Yalcin et al., 2017). O efeito da GD sobre a QEE ocorre devido à injeção de correntes harmônicas e supraharmônicas pelos conversores de frequência (Klatt et al., 2016; Larsson and Bollen, 2009) que integram o sistema de geração. Assim, o número de unidades geradoras no sistema influencia as emissões na faixa de frequência estudada neste artigo (2 kHz-150 kHz).

A proposta deste trabalho é a aplicação de conceitos relacionados ao processamento de sinais, abrangendo o processamento de multitaxa, para análise de supraharmônicos. A ideia central é usar a subamostragem, onde o efeito de *aliasing* é usado para fins de análise de sinal. Utiliza-se uma estrutura de banco de filtros analógicos responsável por decompor o sinal analisado, separando-o em seus componentes supraharmônicos. Os dispositivos *down-sampler* (subamostragem) seguem o estágio de filtragem, resultando em uma taxa de amostragem reduzida. Uma equação simples é proposta para relacionar frequências aparentes, aquela gerada pela subamostragem, às frequências reais dos sinais analisados. Usando essa metodologia, é possível preservar quase todo o *hardware* e *firmware* dos monitores de QEE existentes.

O artigo está organizado da seguinte forma. A próxima seção apresenta a caracterização da emissões supraharmônicas. A Seção 3 discute o método proposto. Os resultados são apresentados na Seção 4 e conclusões na Seção 5.

2 Caracterização das Emissões Supraharmônicas

De acordo com Ronnberg et al. (2017), a faixa de frequência até 150 kHz apresenta diferentes classes de distorções com base nas frequências envolvidas. Os componentes múltiplos inteiros da frequência fundamental são referidos como harmônicos. Os componentes localizados em frequências não múltiplas da frequência fundamental são conhecidos como interharmônicos. A classe subharmônica compreende componentes de frequência menores do que a frequência fundamental. Além disso, os componentes em qualquer frequência entre 2 kHz e 150 kHz foram denominados como supraharmônicos.

Na literatura existem muitos trabalhos referentes às fontes emissoras de distorções supraharmônicas. O artigo (Montenegro et al., 2017) realiza simulações de emissões supraharmônicas originadas por Lâmpadas Fluorescentes Compactas (CFL - *Compact Fluorescent Lamps*) operando isoladamente. Gil-de Castro et al. (2013) propõe um estudo sobre a QEE de redes de iluminação de alta potência com base em lâmpadas de vapor de sódio e lâmpadas LED. As medições realizadas indicam a presença de correntes harmônicas na faixa de frequência até 150 kHz

para todas as tecnologias aplicadas em fontes de iluminação.

Inversores de potência também são considerados importantes fontes de emissões supraharmônicas. A referência (Koufopoulos and Vokas, n.d.) discute as emissões supraharmônicas de três inversores fotovoltaicos em condições de laboratório. Resultados experimentais de emissões de supraharmônicos originados de sistemas fotovoltaicos são mostrados por Darmawardana et al. (2018). Em Gil-de Castro et al. (2017) afirma-se que a redução de emissões harmônicas em frequências mais baixas resultam no aumento de emissões supraharmônicas pelo equipamento. Também afirma que os conversores eletrônicos de potência têm sido uma importante fonte de distorções em sinais elétricos.

Greverner et al. (2017) apresenta uma discussão sobre a caracterização da emissão de supraharmônicos por dispositivos. Uma análise exploratória revelou que a emissão supraharmônica é na maioria dos casos não estacionária, mas varia em frequência e/ou magnitude em relação ao ciclo do componente fundamental. Também em alguns casos, a emissão não é permanente, mas limitada a uma fração de meio ciclo. Portanto, a análise da emissão supraharmônica na representação de frequência não é suficiente, esta análise deve ser estendida à representação de tempo-frequência.

Além das contribuições destacadas acima, alguns artigos apresentam uma visão geral sobre as emissões na faixa de frequência de 2 kHz a 150 kHz. Uma revisão sobre técnicas de medições para emissões não intencionais acima de 2 kHz é fornecida por Angulo et al. (2016). Ronnberg et al. (2017) indica os desafios de pesquisa associadas às distorções supraharmônicas, com ênfase na emissão, propagação, interferência, medições, padronização, modelagem e simulação. O trabalho proposto em Klatt et al. (2014) mostra uma comparação de métodos de medição para a faixa de frequência supraharmônica.

A norma IEC 61000-4-30 edição 3, contém informações sobre métodos de medição para emissões na faixa de 2 kHz a 150 kHz. No anexo informativo C, uma referência à IEC 61000-4-7: 2002 é feita para a faixa de frequência de 2 kHz a 9 kHz. Para o intervalo de frequência de 9 kHz a 150 kHz, um método de análise é proposto. No método proposto pela norma, com o objetivo de reduzir a quantidade de dados a serem processados e armazenados, para cada janela de 10 ou 12 ciclos do componente fundamental (para sistemas de 50 Hz ou 60 Hz, respectivamente), 32 intervalos de medição de 0,5 ms são capturados com uma frequência de amostragem sugerida de 1024 kHz. Essas amostras devem ser processadas através da Transformada de Fourier Discreta (DFT) ou equivalente, resultando em uma resolução de frequência de 2 kHz.

3 Método Proposto

O teorema de Nyquist (Mitra and Kuo, 2006) afirma que um sinal com frequência máxima F_{MAX} (Hz) pode ser representado por suas amostras, desde que a taxa de amostragem (F_s) obedeça o critério Nyquist, $F_s > 2F_{MAX}$. Existem situações em que o sinal a ser amostrado é um sinal de alta frequência cujo espectro é limitado em banda, onde $F_{MIN} < |F| < F_{MAX}$, sendo $F_{MIN} > 0$. Esse sinal geralmente é obtido por modulação de um sinal de largura de banda de baixa frequência. Nesse caso, a frequência necessária para evitar *aliasing* seria $F_s > 2F_{MAX}$. No entanto, se a frequência F_{MAX} for muito alta, a taxa de amostragem também será muito alta, tornando-a impraticável em algumas situações. Em Porat (1996), uma abordagem é descrita, onde a largura de banda é dada por $\Delta F = F_{MAX} - F_{MIN}$. Para este caso, o critério Nyquist estendido pode ser usado. O critério de Nyquist estendido afirma que, se um sinal tiver um espectro limitado em banda, a taxa de amostragem pode apenas obedecer a seguinte condição:

$$F_s = 2\Delta F \quad (1)$$

Este critério pode ser referido como técnica de subamostragem uma vez que utiliza o efeito *aliasing* como vantagem na transformação um sinal de banda limitada para um sinal de banda base. A figura 1 ilustra o que ocorre quando um sinal limitado em banda é subamostrado. A figura 1 - (a) mostra o espectro original e a figura 1 - (b) mostra o espectro resultante após a subamostragem. O sinal de tempo discreto equivalente tem o mesmo espectro que o sinal de subamostragem, a única alteração é de sua frequência que se localiza na banda base (denominada frequência aparente) e deve ser convertida para a frequência real.

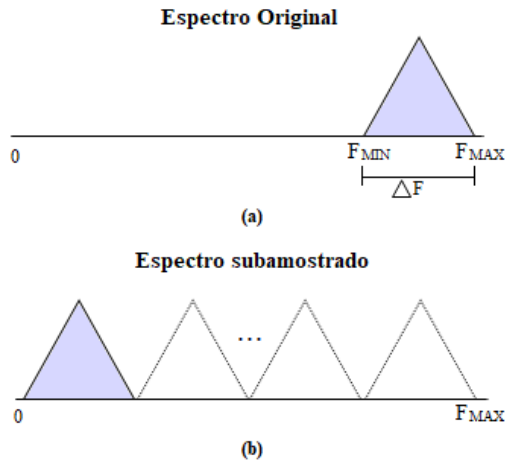


Figura 1: Técnica de subamostragem.

Para a decomposição do sinal em diferentes bandas, é utilizado um banco de filtros analógi-

cos. A figura 2 ilustra um banco de filtros analógico utilizado para decompor o sinal. Por meio do banco de filtros, a faixa de frequência de até 150 kHz é dividida em dez segmentos de largura de banda de 15 kHz cada. Somente o primeiro filtro possui uma largura de banda diferente, na faixa de 2 kHz a 15 kHz. Os conversores A/D (Analógico/Digital) de QEE usuais podem operar facilmente a uma taxa de amostragem de 32 kHz, mas muitas vezes não conseguem processar a uma frequência de amostragem de 1024 kHz.

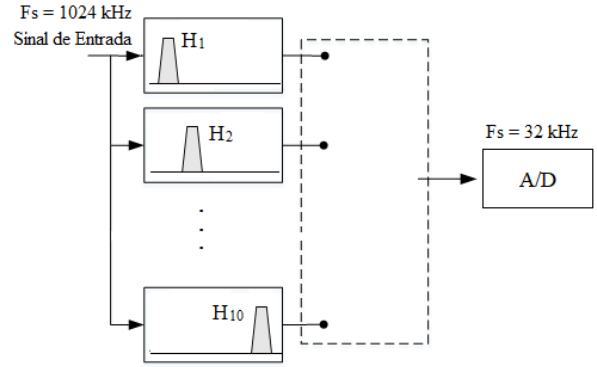


Figura 2: Estrutura do banco de filtros analógicos.

O banco de filtros analógicos proposto com característica Elíptica é de ordem 8 e atenua 3 dB na frequência de passagem e 45 dB na frequência de parada. A sobreposição dos filtros é de 500 Hz. Cada um dos canais de saída do banco de filtros é um espectro limitado em banda cuja largura (ΔF) é de 15 kHz.

A figura 3 ilustra a metodologia de teste desenvolvida neste artigo. A principal ideia é o uso da subamostragem de um sinal em tempo contínuo, de forma equivalente a utilização de filtros analógicos com alta taxa de amostragem, por exemplo 1024 kHz, sendo que a subamostragem de cada banda é realizada através de um dispositivo denominado *down-sampler*, conforme apresentado na figura 3. Tal dispositivo é responsável por gerar um sinal de saída com taxa de amostragem 2^5 vezes inferior à taxa do sinal de entrada. A Transformada de Rápida de Fourier (FFT) aplicada ao sinal de subamostragem estimará a magnitude, porém as frequências apresentadas pela FFT precisam ser corrigidas. Neste caso, pode-se dizer que um sinal de entrada de frequência real F_R aparece na saída do dispositivo com uma frequência aparente de F_a , de modo que $F_a < F_R$.

As equações (2) e (3) podem ser usadas para obter a frequência real (F_R) a partir da aparente (F_a). Nas equações, M refere-se ao número do filtro, e F_s é a frequência da amostragem. Os dez filtros analógicos projetados são numerados em ordem ascendente. A equação (2) é usada quando M é igual a um número par e (3) quando M é um

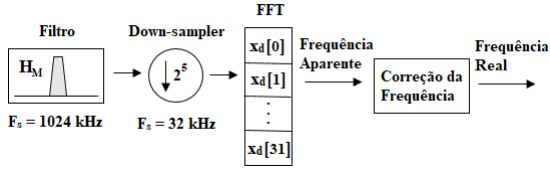


Figura 3: Método proposto.

número ímpar.

$$F_R = \frac{F_s}{2}(M - F_a) \quad (2)$$

$$F_R = \frac{F_s}{2}(M + F_a - 1) \quad (3)$$

4 Resultados

4.1 Exemplo de Aplicação

Um exemplo simples do uso da subamostragem para análise de componentes supraharmônicas é descrito abaixo. Considere um sinal descrito por,

$$x(t) = A_{sh1} \cos(2\pi f_{sh1}t + \theta_{sh1}) + A_{sh2} \cos(2\pi f_{sh2}t + \theta_{sh2}) \quad (4)$$

Este sinal é composto por duas supraharmônicas de frequências f_{sh1} igual a 50 kHz e f_{sh2} igual a 70 kHz. As amplitudes, A_{sh1} e A_{sh2} , são 1 e 0,8, respectivamente, e as fases são zero para ambos. O sinal gerado consiste em 512 amostras colhidas a uma taxa de amostragem de 1024 kHz, com frequência fundamental igual a 2 kHz. Um filtro passa-faixa (veja figura 4) filtra o sinal. O fator de subamostragem utilizado é 2^5 , resultando em uma frequência de amostragem de 32 kHz e um vetor de apenas 16 amostras o cálculo de cada FFT.

As figuras 5 - (a) e 6 - (a) apresentam a FFT do sinal subamostrado. O eixo x é rotulado com a frequência aparente F_a normalizada de 0 a 1. As figuras 5 - (b) e 6 - (b) apresentam o espectro do sinal subamostrado com o eixo x representado pela frequência real F_R em kHz.

4.2 Resultados para sinais reais

Para avaliar o desempenho do método proposto para sinais reais, uma forma de onda contendo distorções supraharmônicas originadas por um inversor fotovoltaico (PV) foi processada. Este sinal foi fornecido pelo projeto PANDA (equiPment hArmoNic Database), uma plataforma global utilizada para troca de medidas de emissões harmônicas de equipamentos domésticos. O banco de dados pode ser acessado em todo o mundo através de uma plataforma disponível na web (<http://www.panda.et.tu-dresden.de>). A forma de onda do sinal de emissão do inversor PV no

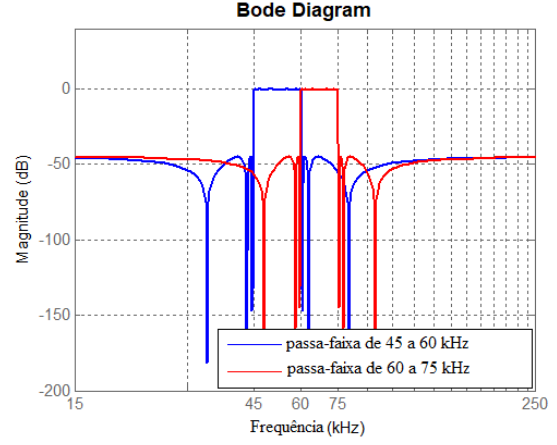


Figura 4: Resposta em Magnitude dos filtros analógicos.

domínio do tempo é mostrada na figura 7. O sinal possui uma taxa de amostragem de 1000 kHz, com frequência fundamental igual a 50 Hz. A janela de medição básica do sinal analisado tem um comprimento de 200 ms (10 ciclos em um sistema de 50 Hz).

Uma comparação do método proposto e do método aplicado pela norma IEC 61000-4-30 para a estimativa supraharmônica é mostrada na figura 8. As curvas representam a média do cálculo da FFT de 32 medições em 10 ciclos do sinal analisado. Em cada medição, o método proposto utiliza 10 FFTs de apenas 16 amostras para o cálculo do espectro (um para cada saída do banco de filtros), enquanto o padrão IEC 61000-4-30 emprega 512 amostras. O espectro estimado pelo método proposto é similar ao calculado diretamente usando a norma IEC.

4.3 Complexidade Computacional do Método Proposto

Nesta seção, a reduzida complexidade computacional do método proposto neste artigo quando comparado ao método proposto pela norma IEC 61000-4-30 Ed3 é comprovada. Uma vantagem do método proposto é o uso do banco de filtros analógicos, pois este não adiciona custo computacional.

O número de operações matemáticas realizadas e o número de operações repetidas durante a execução do algoritmo definem a complexidade de um algoritmo. Para um sinal $x[n]$ com N pontos, a Transformada Rápida de Fourier pode ser calculada com $N \log_2 N$ operações.

A Tabela I mostra uma análise da complexidade computacional do método proposto. Para a aplicação do método proposto, o cálculo de 10 FFTs do sinal com N é igual a 16 é realizado. O padrão IEC 61000-4-30 Ed3 sugere para cada janela de tempo de 10 ciclos, 32 medições, cada

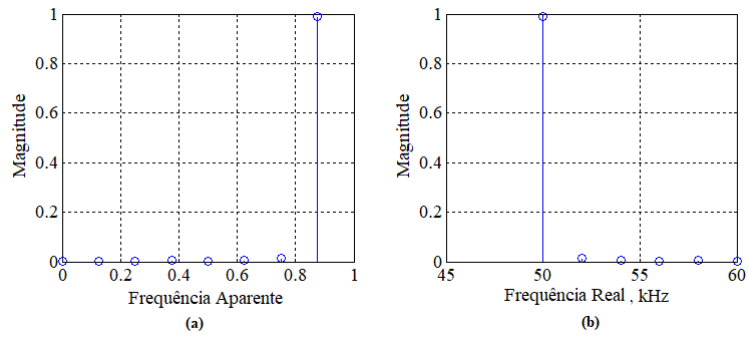


Figura 5: Estimação de supraharmônicos usando subamostragem FFT ($M = 4$): (a) frequência aparente normalizada; (b) frequência real.

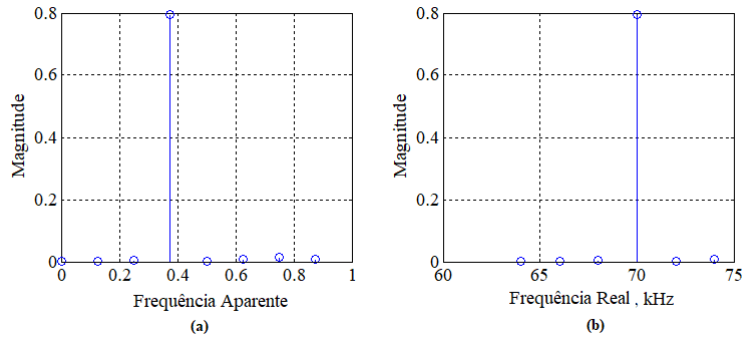


Figura 6: Estimação de supraharmônicos usando subamostragem FFT ($M = 5$): (a) frequência aparente normalizada; (b) frequência real.

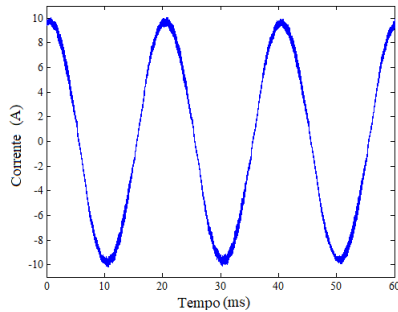


Figura 7: Forma de onda do inversor PV contendo supraharmônicos.

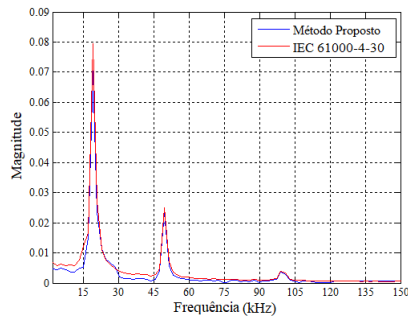


Figura 8: Comparação do Método Proposto com a norma IEC 61000-4-30 para a estimação de supraharmônicos.

Tabela 1: Análise comparativa de complexidade computacional.

Método	Tamanho do Sinal (N)	Número de operações
Método Proposto	16	20.480
IEC 61000-4-30 Ed3	512	147.456

uma consistindo em 512 amostras transformadas pelo algoritmo FFT. Por meio desta informação, estima-se que o número de operações do método proposto seja aproximadamente igual a 20.480. Em contraste, o método sugerido pelo referido padrão executa cerca de 147.456 operações. O método proposto neste trabalho apresenta, portanto, uma redução de complexidade computacional de aproximadamente 86,1%.

Em resumo, o uso de um banco de filtros analógicos junto com a ferramenta de subamostragem permitiu a redução do número de amostras processadas pela FFT. Através de uma análise sistemática, levando em consideração as características específicas da metodologia proposta, verificou-se que esse método reduz a complexidade computacional.

5 Conclusões

Neste artigo, foi descrito um método baseado em um sistema de banco de filtros analógicos para a estimativa de componentes supraharmônicas. A partir desta análise no domínio da frequência, torna-se evidente a poderosa ferramenta que representa um dispositivo de *down-sampler* em operações de estimação de parâmetros. Ao realizar a subamostragem de sinais, a estimativa dos parâmetros reais de um sinal pode então ser realizada através do conhecimento da frequência aparente. A principal vantagem da abordagem proposta é a redução da complexidade computacional devido ao uso da subamostragem do sinal de alta frequência. Além disso, o uso desta estratégia permite a redução da taxa de amostragem, permitindo a análise de supraharmônicos através dos monitores existentes de QEE. A metodologia foi testada com um sinal real apresentando bons resultados.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG).

Referências

- Angulo, I., Arrinda, A., Fernández, I., Uribe-Pérez, N., Arechalde, I. and Hernández, L. (2016). A review on measurement techniques for non-intentional emissions above 2 khz, *Energy Conference (ENERGYCON)*, 2016 *IEEE International*, IEEE, pp. 1–5.
- Bollen, M. H. and Gu, I. (2006). *Signal processing of power quality disturbances*, Vol. 30, John Wiley & Sons.
- Bollen, M. H., Ribeiro, P. F., Larsson, E. A. and Lundmark, C. M. (2008). Limits for voltage distortion in the frequency range 2 to 9 khz, *IEEE Transactions on Power Delivery* **23**(3): 1481–1487.
- Bollen, M., Olofsson, M., Larsson, A., Rosennberg, S. and Lundmark, M. (2014). Standards for supraharmônicos (2 to 150 khz), *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine* **3**(1): 114–119.
- Commission, I. E. et al. (2002). 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, *Technical report*, IEC 61000-4-7, Second Edition, 2002 08.
- Commission, I. E. et al. (2003). Electromagnetic compatibility (emc)-part 4-30: Testing and measurement techniques-power quality measurement methods, *IEC 61000-4-30*.
- Commission, I. E. et al. (2006). Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods-part 1-2: Radio disturbance and immunity measuring apparatus-ancillary equipment-conducted disturbances, *CISPR16-1-2*.
- Darmawardana, D., Perera, S., Robinson, D., Ciufu, P., Meyer, J., Klatt, M. and Jayatunga, U. (2018). Investigation of high frequency emissions (supraharmônicos) from small, grid-tied, photovoltaic inverters of different topologies, *Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, 2018 *18th International Conference on*, IEEE, pp. 1–6.
- Gil-de Castro, A., Moreno-Munoz, A., Garrido, J., Rönnberg, S. K., Palacios-Garcia, E. J. and Morales, T. (2017). Supraharmônicos reduction in npc inverter with random pwm, *Industrial Electronics (ISIE)*, 2017 *IEEE 26th International Symposium on*, IEEE, pp. 1792–1797.
- Gil-de Castro, A., Moreno-Munoz, A., Larsson, A., De La Rosa, J. and Bollen, M. (2013). Led street lighting: A power quality comparison among street light technologies, *Lighting Research & Technology* **45**(6): 710–728.
- Grevener, A., Meyer, J., Rönnberg, S., Bollen, M. and Myrzik, J. (2017). Survey of supraharmônicos emission of household appliances, *CIGRE-Open Access Proceedings Journal* **2017**(1): 870–874.
- Kapisch, E. B., Silva, L. R. M., Cerqueira, A. S., de Andrade Filho, L. M., Duque, C. A. and Ribeiro, P. F. (2016). A gapless waveform recorder for monitoring smart grids, *Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, 2016 *17th International Conference on*, IEEE, pp. 130–136.
- Klatt, M., Meyer, J. and Schegner, P. (2014). Comparison of measurement methods for the frequency range of 2 khz to 150 khz, *Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, 2014 *IEEE 16th International Conference on*, IEEE, pp. 818–822.
- Klatt, M., Meyer, J., Schegner, P. and Lakenbrink, C. (2016). Characterization of supraharmônicos emission caused by small photovoltaic inverters.

- Koufopoulos, G. K. and Vokas, G. A. (n.d.). 8th mediterranean conference on power generation, transmission, distribution and energy conversion (medpower 2012).
- Larsson, E. A., Bollen, M. H., Wahlberg, M. G., Lundmark, C. M. and Ronnberg, S. K. (2010). Measurements of high-frequency (2–150 khz) distortion in low-voltage networks, *IEEE Transactions on Power Delivery* **25**(3): 1749–1757.
- Larsson, E. and Bollen, M. (2009). Emission and immunity of equipment in the frequency range 2 to 150 khz, *PowerTech, 2009 IEEE Bucharest*, IEEE, pp. 1–5.
- Meyer, J., Bollen, M., Amaris, H., Blanco, A. M., de Castro, A. G., Desmet, J., Klatt, M., Kocewiak, L., Rosennberg, S. and Yang, K. (2014). Future work on harmonics-some expert opinions part ii-supraharmonics, standards and measurements, *Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2014 IEEE 16th International Conference on*, IEEE, pp. 909–913.
- Mitra, S. K. and Kuo, Y. (2006). *Digital signal processing: a computer-based approach*, Vol. 2, McGraw-Hill Higher Education New York.
- Montenegro, D., Gonzalez, J. and Dugan, R. (2017). 2017 3rd iee workshop on power electronics and power quality applications, pepqa 2017-proceedings.
- Porat, B. (1996). *A course in digital signal processing*, John Wiley & Sons, Inc.
- Ribeiro, P. F., Duque, C. A., Ribeiro, P. M. and Cerqueira, A. S. (2013). *Power systems signal processing for smart grids*, John Wiley & Sons.
- Ronnberg, S. K., Bollen, M. H., Amaris, H., Chang, G. W., Gu, I. Y., Kocewiak, L. H., Meyer, J., Olofsson, M., Ribeiro, P. F. and Desmet, J. (2017). On waveform distortion in the frequency range of 2 khz–150 khz - review and research challenges, *Electric Power Systems Research* **150**: 1–10.
- Yalcin, T., Ozdemir, M., Kostyla, P. and Leonowicz, Z. (2017). Analysis of supraharmonics in smart grids, *Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe), 2017 IEEE International Conference on*, IEEE, pp. 1–4.