

Caracterização de Supraharmônicos Utilizando a Transformada Wavelet

C. E. M. Rodrigues, T. M. Soares

Universidade Federal do Pará

Carloseduardo.pa@hotmail.com, thiagosoares@ufpa.br

M. E. L. Tostes, W. D. de Oliveira

Universidade Federal do Pará

tostes@ufpa.br, wdoliveira@ufpa.br

Resumo — A crescente utilização de equipamentos que empregam conversores eletrônicos com altas frequências de chaveamento, além de equipamentos que realizam compensação reativa, tem levado ao aparecimento de componentes harmônicas de ordens mais elevadas do que as normalmente observadas nos sistemas elétricos. Tal fenômeno, denominado supraharmônico, ainda não é totalmente compreendido e várias questões com relação às suas características estão sendo levantadas por diversos grupos de pesquisa. Dentro desse contexto, este trabalho apresenta um estudo de caso de medição de supraharmônicos em uma instalação comercial e mostra a análise desenvolvida por meio da utilização da Transformada Wavelet para a extração de informações que possam caracterizar de forma eficiente o fenômeno.

Palavras-chaves — Supraharmônicos, Transformada Wavelet, Análise de Multirresolução.

I. INTRODUÇÃO

A proliferação cada vez maior de equipamentos eletrônicos domésticos e industriais que, em sua operação, empregam altas frequências de chaveamento, além daqueles que realizam compensação reativa, tem causado a geração de harmônicos com frequências bastante elevadas em relação àqueles harmônicos normalmente encontrados em sistemas elétricos (abaixo de 2 kHz). Para tais sinais de distorção de forma de onda em alta frequência foi empregado o termo “supraharmônicos” para designar harmônicos com frequências na faixa de 2 a 150 kHz em sistemas elétricos de 50 Hz [1].

Entre os principais equipamentos que contribuem para a geração de harmônicos nessa faixa de frequência estão as lâmpadas de descarga que empregam reatores eletrônicos que melhoram o fator de potência (*Active Power Factor Correction* – APFC), *nobreaks* empregados em computadores (*Uninterruptible Power Supply* - UPS), carregadores de veículos elétricos, inversores empregados em sistemas fotovoltaicos e filtros ativos [2]. Deve-se considerar também a presença de sinais de comunicação na mesma rede elétrica (*Power Line Communication* – PLC), que introduzem componentes de frequência na faixa de 9 – 95 kHz, em sistemas elétricos de 50 Hz [3].

Diversos trabalhos já foram publicados no intuito de ampliar o conhecimento a respeito das características dos supraharmônicos, como suas fontes, forma de propagação na rede elétrica, técnicas de medição que podem ser empregadas, entre outros aspectos.

Medições realizadas em lâmpadas LED [4]-[5] e de descarga mostraram a contribuição de tais equipamentos na geração de distorção harmônica em alta frequência, devido às técnicas de compensação reativa empregadas. Tais técnicas, se por um lado elevam o fator de potência devido à compensação de componentes harmônicas em baixa frequência, por outro lado aumentam a emissão de harmônicos de alta frequência devido às altas frequências de chaveamento aplicadas [6].

As fontes de geração distribuída, em sua maioria, aplicam conversores eletrônicos na interface com a rede elétrica, levando também à geração de supraharmônicos. As emissões de componentes harmônicos nesta faixa de frequência foram observadas em usinas fotovoltaicas em [7]-[8]. A geração eólica também apresenta contribuição para a emissão de supraharmônicos, como apresentado em [9] para um gerador síncrono conectado à rede por meio de um retificador e um inversor, resultando os supraharmônicos do chaveamento por modulação por largura de pulso (*Pulse Width Modulation* – PWM). Um estudo da emissão de harmônicos de uma maior variedade de geradores eólicos é apresentado em [10], mediante medições realizadas em geradores eólicos síncronos, de indução e do tipo DFIG (*Doubly Fed Induction Generator*).

O presente trabalho discorre a respeito do estudo de caso de supraharmônicos identificados em uma instalação elétrica de uma empresa do setor bancário e apresenta uma análise dos sinais obtidos por meio da Transformada Wavelet.

Na seção II, são apresentados alguns aspectos a respeito dos supraharmônicos, enquanto que a seção III foca-se em aspectos relacionados a sua propagação bem como a interação com outros equipamentos. Na seção IV, descreve-se as características da transformada Wavelet e análise multirresolução. Na seção V, são apresentados os resultados das decomposições das medições por meio da transformada wavelet. E na seção VI, são apresentadas as conclusões do trabalho.

II. SUPRAHARMÔNICOS

Os supraharmônicos se originam em cargas que empregam técnicas de chaveamento, que têm se tornado cada vez mais comuns devido à eficiência e comodidade que proporcionam.

A fig. 1 apresenta uma forma de onda de corrente distorcida obtida por meio de medição de um aparelho televisor. Podem ser observados dois tipos de distorção: o primeiro tipo consiste em oscilações amortecidas que surgem após cada passagem da corrente pelo “zero”, denominado então “*zero-crossing distortion*” [11], sendo tais distorções normalmente

encontradas em equipamentos que empregam APFC; o segundo tipo de distorção observado consiste em pequenas oscilações de alta frequência presentes em todo o sinal, resultantes da frequência de chaveamento empregada no conversor.

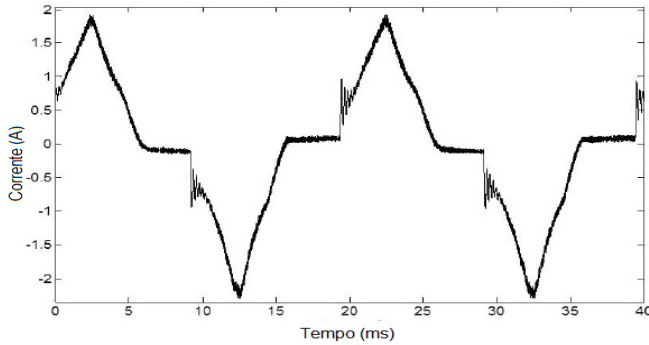


Fig. 1: forma de onda de corrente com distorções em alta frequência [12].

O espectro de frequências da forma de onda distorcida da Fig 1 é apresentado na Fig. 2. Na parte superior, pode ser vista a faixa de harmônicos de baixa frequências (50 Hz – 2 kHz), com destaque para a componente de terceira ordem. Na faixa intermediária, é apresentado o espectro de frequências proveniente do “zero-crossing distortion”, que se situa predominantemente entre 2 e 9 kHz. Por fim, na parte inferior, é apresentado o espectro de frequência da distorção resultante da frequência de chaveamento empregada no conversor (9 – 150 kHz).

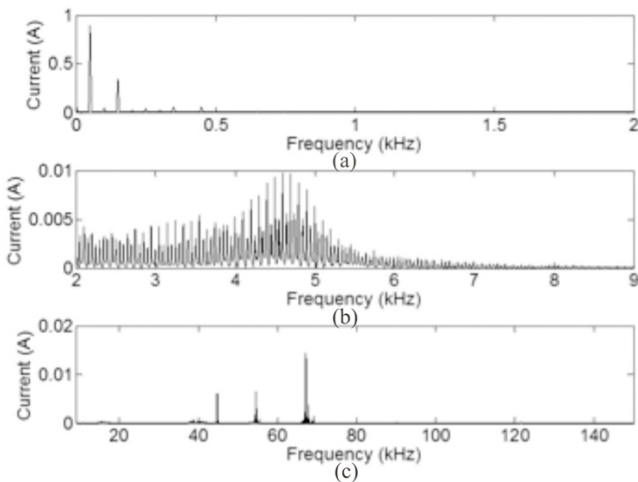


Fig. 2: espectro de corrente da forma de onda distorcida [12].

III. PROPAGAÇÃO

Os supraharmônicos apresentam particularidades em sua propagação por meio da rede elétrica em relação aos harmônicos de baixa frequência. Como mostrado em [13], harmônicos de baixa ordem com mesmo ângulo de fase tendem a se somar vetorialmente no Ponto de Acoplamento Comum (PAC), o que resulta em uma maior distorção nesse ponto da rede, se comparado com os sinais medidos nos terminais dos equipamentos.

Para a abordagem das características da propagação dos supraharmônicos, se faz necessária a definição dos termos

“emissão primária” e “emissão secundária”. A emissão primária é a parte da corrente distorcida injetada na rede pelo próprio equipamento em análise. Por outro lado, a emissão secundária é a corrente distorcida proveniente de outros equipamentos conectados ao PAC, bem como a distorção proveniente da rede [13].

Para a distorção harmônica em alta frequência proveniente do “zero-crossing distortion”, é observado uma característica de propagação semelhante àquela para harmônicos de baixa frequência, com a soma vetorial das componentes no PAC, como observado por meio de medições [14]. No entanto, para supraharmônicos provenientes da frequência de chaveamento, que apresentam ordem mais elevada, como apresentado na Fig 2, foi observado que a corrente distorcida flui entre os equipamentos conectados [14].

Nesse contexto, a emissão secundária assume um papel mais significativo dado que, apesar de não ser detectada uma distorção significativa nos sinais de tensão e corrente da rede, uma distorção elevada será detectada nos terminais dos dispositivos, proveniente de outros equipamentos. Simulações mostraram que a distorção presente nos terminais dos equipamentos foi acrescida à medida que novos equipamentos foram conectados à instalação, ao passo que a distorção observada na rede sofreu um decréscimo [15].

IV. TRANSFORMADA WAVELET

A Transformada Wavelet é uma ferramenta matemática que apresenta a característica de decompor um sinal em diferentes escalas, com diferentes níveis de resolução a partir de um sinal analisado, o que é bastante útil para sinais não estacionários, como os distúrbios de Qualidade de Energia Elétrica (QEE), nos quais estão incluídos os componentes harmônicos de tensão e corrente [21].

Diante disso, é implementada uma análise no tempo e na frequência, de modo que alterações em sinais não estacionários sejam melhor caracterizados.

A formulação matemática da Transformada Wavelet Contínua é dada por:

$$WT(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (1)$$

em que:

a – parâmetro de escala;

b – parâmetro de deslocamento;

f(t) – função analisada;

$\psi(t)$ – função wavelet-mãe.

O parâmetro $\psi(t)$ representa uma *wavelet*-mãe (análoga aos senos e cossenos da série de Fourier), denominada deste modo pelo fato de que todas as funções usadas no processo da transformada são versões deslocadas e dilatadas ou comprimidas dessa mesma função [16].

A operação de escalamento é feita por meio da alteração dos valores do parâmetro “a”, o que implica na dilatação ($a > 1$) ou compressão ($a < 1$) do sinal. A operação de deslocamento, por sua vez, é feita alterando-se o parâmetro “b”, o que implica na translação da função $\psi(t)$ [16].

A Transformada Wavelet Contínua pode ser implementada computacionalmente por meio da Análise de Multirresolução

(AMR), uma técnica que objetiva a construção de *wavelets* ortogonais a partir de uma função escala $\phi(t)$, e uma wavelet-mãe, $\psi(t)$. Esse processo se dá por meio da análise do sinal através de uma combinação da função escala, que aqui representa um filtro passa-baixa, e uma wavelet-mãe, representada por filtro passa-alta. Com isso, o sinal é "particionado" ao meio após cada iteração, na qual o filtro passa-alta fornece os detalhes (altas frequências) e o filtro passa baixa fornece as aproximações (baixas frequências). Essa técnica pode ser melhor visualizada por meio da fig. 3, que ilustra o processo de decomposição do sinal em altas e baixas frequências.

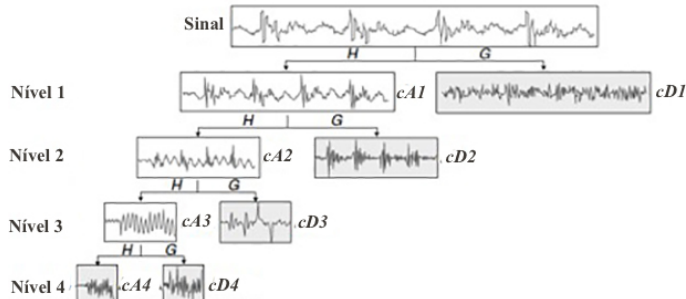


Fig. 3: AMR, em 3 níveis, aplicada ao sinal S [22].

Na Fig. 3, os coeficientes $cA1$, $cA2$, $cA3$ e $cA4$ representam as aproximações (baixas frequências do sinal decomposto) e os coeficientes $cD1$, $cD2$, $cD3$ e $cD4$ representam os detalhes (altas frequências do sinal decomposto). Vale notar que o parâmetro C representa a reconstrução do sinal através de seus coeficientes, no caso os detalhes $cD1$, $cD2$, $cD3$ e $cD4$, e a aproximação $cA4$.

Tal técnica permite a análise de componentes harmônicos por meio dos detalhes obtidos após cada particionamento do sinal.

V. MEDIÇÕES E RESULTADOS

No presente estudo de caso, realizou-se uma campanha de medição nas instalações elétricas do site backup de um banco na cidade de Belém devido à queima de dispositivos eletrônicos. Na Fig 4, são apresentados os resultados das medições de corrente nas três fases da Sala de *Data Center*, na saída do *nobreak*, da instalação comercial previamente mencionada.

O aspecto geral do sinal é aproximadamente senoidal, o que indica que não estão presentes de forma significativa componentes harmônicas ímpares de baixa frequência, normalmente observadas nos sistemas de distribuição e instalações elétricas de baixa e média tensão. No entanto, as formas de onda de corrente são compostas por pequenas distorções em amplitude observadas de forma periódica ao longo de toda a janela de análise. Tais distorções se dão em frequências bastante elevadas e acabam conferindo um aspecto "serrilhado" ao sinal. A forma de onda de tensão medida no mesmo ponto, como esperado, não apresentou distorção significativa, portanto serão avaliados apenas os sinais de corrente.

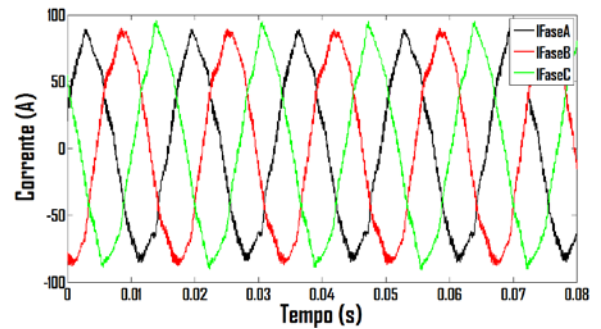


Fig. 4: corrente medida nas três fases na saída no *nobreak*.

A figura 5 apresenta o espectro de frequência das correntes medidas nas três fases, com a amplitude das respectivas componentes harmônicas plotadas em função da amplitude da componente fundamental.

Pode ser observado que os componentes harmônicos mais significativos estão contidos na faixa entre 3,5 e 4,5 kHz e apresentam uma característica típica dos harmônicos provenientes da frequência de chaveamento em conversores eletrônicos conforme [18], embora, no estudo de caso apresentado, tal frequência não se situe na faixa de dezenas de kHz, como observado nas medições realizadas em [7]-[11] e [12]. Também são observados harmônicos de menor amplitude na faixa de 2 a 3,5 kHz e na faixa de 7,5 a 8 kHz.

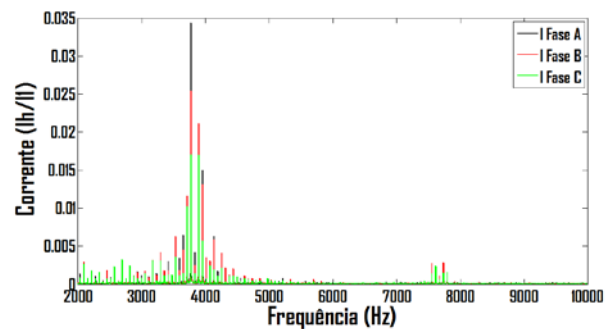


Fig. 5: faixas de frequência observadas nas medições.

Para fins da análise via Transformada Wavelet, vale destacar que, nas medições, foi empregada uma frequência de amostragem de 20 kHz, capaz de captar uma máxima frequência contida no sinal de 10 kHz, de acordo com o teorema da amostragem [16].

A partir da semelhança entre os espectros de frequência das correntes das três fases, a análise posterior a ser realizada via Transformada Wavelet levará em conta apenas a fase "A", com resultados que podem ser estendidos para as demais fases.

A transformada Wavelet é implementada computacionalmente por meio do emprego de um filtro passa-alta, que fornece os detalhes e por meio de um filtro passa-baixa, que fornece as aproximações. Tais filtros são espelhados em quadratura pois possuem simetria em torno de uma frequência de corte de $\pi/2$ rad/s, considerando uma máxima frequência contida no sinal de π rad/s, mediante uma frequência de amostragem de 2π rad/s [19]. Deste modo, a frequência de corte dos filtros em cada nível de decomposição está relacionada com a frequência de amostragem empregada na medição do sinal de acordo com [20]:

$$f_c = \frac{B}{2^n} \quad (2)$$

Onde:

f_c – Frequência de corte;

B – Máxima frequência contida no sinal e igual à metade da taxa de Nyquist ou frequência de amostragem;

n – Nível de decomposição.

Deste modo, considerando a frequência de 20 kHz empregada na amostragem do sinal, a tabela 1 fornece os níveis de decomposição realizados na análise do sinal e suas respectivas faixas de frequência.

Tomando como base o espectro de frequência da corrente medida, apresentada na figura 5, e as faixas de frequência contidas nos níveis de decomposição, detalhados na tabela 1, pode-se afirmar que os supraharmônicos mais significativos foram captados pelos dois primeiros níveis de decomposição, enquanto que a componente fundamental, em 60 Hz, por sua vez, está contida no oitavo nível de decomposição.

TABELA I. FAIXAS DE FREQUÊNCIA CONTIDAS EM CADA NÍVEL DE DETALHES.

Nível de decomposição	Faixa de frequências
1	5 – 10 kHz
2	2,5 – 5 kHz
3	1,25 – 2,5 kHz
4	625 – 1,25 Hz
5	312,5 – 625 Hz
6	156,25 – 312,5 Hz
7	78,12 – 156,25 Hz
8	39,06 – 78,12 Hz
9	19,53 – 39,06 Hz
10	9,76 – 19,53 Hz
11	4,88 – 9,76 Hz
12	2,44 – 4,88 Hz
13	1,22 – 2,44 Hz
14	0,61 – 1,22 Hz
15	0,3 – 0,61 Hz
16	0,15 – 0,3 Hz
17	0,07 – 0,15 Hz

Nas subseções A, B e C, serão apresentados os resultados da filtragem do sinal original em seus dois primeiros níveis de decomposição e a Curva de Desvio Padrão (CDP) de todos os dezessete níveis de decomposição. O desvio padrão é considerado como uma medida da energia contida em um determinado nível de decomposição que contém as componentes de frequências harmônicas obtidas pelos filtros passa-alta (detalhes) após cada filtragem do sinal original [21].

Serão consideradas na análise três famílias de *wavelets* ortogonais: *Daubechies*, *Coiflet* e *Symlet*.

A. *Daubechies*

A figura 6 apresenta as formas de onda do sinal filtrado em seus dois primeiros níveis de detalhes, utilizando as cinco primeiras ordens das *wavelets* da família *Daubechies*. Por meio da análise da Fig 6 pode ser evidenciado um dos aspectos mais relevantes da Transformada Wavelet: a análise do sinal no domínio do tempo e da frequência. Tal característica é exemplificada pelo fato de o nível de detalhe analisado ser capaz de apresentar as componentes de frequência presentes em uma determinada faixa e o instante em que tais frequências estão ocorrendo.

Como estão sendo analisadas distorções de forma de onda que possuem uma característica periódica, os detalhes irão conter aproximadamente as mesmas componentes de frequência durante todo o intervalo de tempo em estudo. Tais níveis de detalhes diferem consideravelmente de acordo com os distúrbios de qualidade de energia a serem analisados via Transformada Wavelet, conforme apresentado em [21].

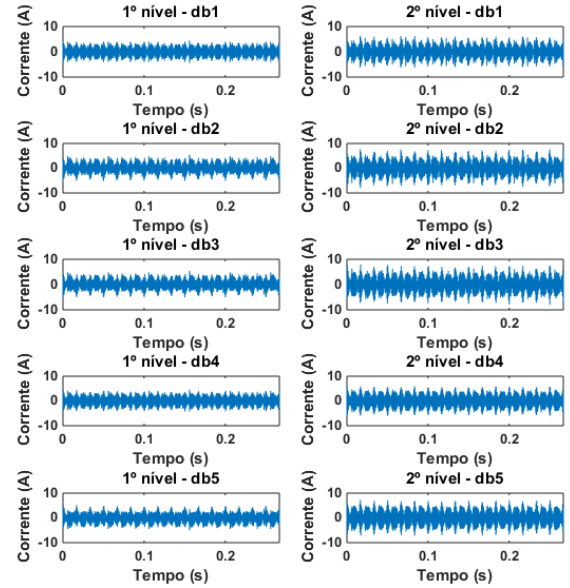


Fig. 6: segundo nível de detalhe para a família *Daubechies*.

A Fig 7 apresenta a CDP considerando os dezessete níveis de decomposição realizados na análise utilizando as cinco primeiras ordens da família *Daubechies*. Como visto, a energia nos níveis de decomposição apresenta leves diferenças de acordo com a ordem da *wavelet* utilizada. Tais diferenças se dão de forma mais acentuada nas *wavelets* de mais baixa ordem, com destaque para as funções *db1*, *db2* e *db3*. Isto se deve à característica das *wavelets* de mais alta ordem de apresentarem uma maior suavidade, em contraponto às *wavelets* de ordem mais baixa, que apresentam variações mais bruscas em sua forma.

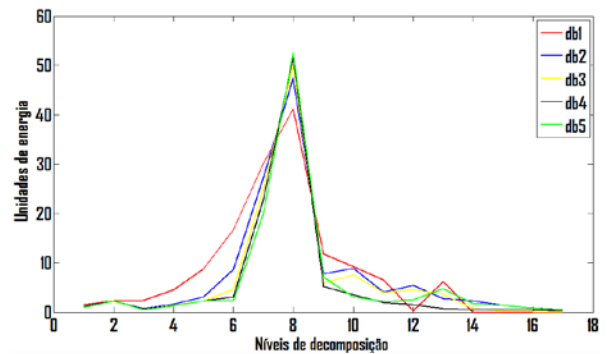


Fig. 7: CDP para as cinco primeiras ordens da família *Daubechies*.

Embora [20] expresse que a faixa de frequência em cada nível será dada de acordo com a tabela I, na prática serão observadas pequenas diferenças entre as quantidades de energia em cada nível de decomposição, como visto na Fig 6.

Tal fato se devem às diferenças da resposta em frequência de cada filtro, dada a respectiva ordem da família *wavelet*.

Apesar de a frequência de corte dos filtros em cada nível de decomposição ser uma função da frequência de amostragem, as formas da resposta dos filtros diferem, dado que os mesmos não são ideais. Consequentemente, tais diferenças afetam as componentes de frequência que serão filtradas. Tal característica é exemplificada por meio da Fig 8, na qual são mostrados os filtros passa-alta (vermelho) e passa-baixa (azul), sinais associados à respectiva *wavelet* e utilizados no processo de decomposição e reconstrução do sinal.

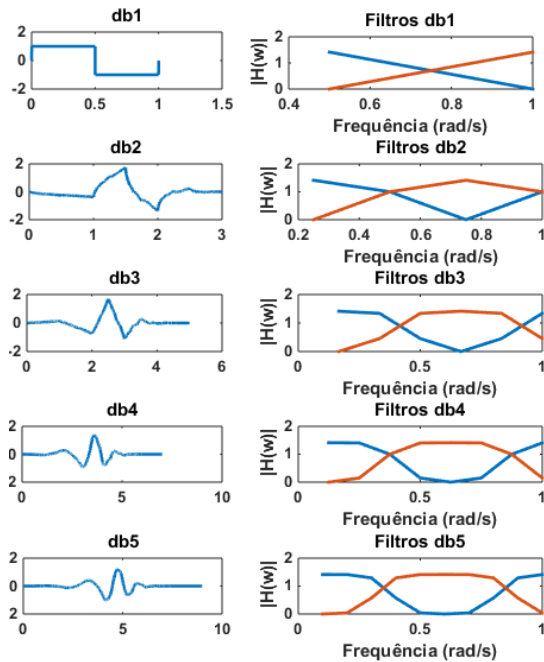


Fig. 8: Wavelets da família *Daubechies* e respectivos filtros passa-alta e passa-baixa.

Deste modo, pode-se concluir que as *wavelets* de mais alta ordem, que apresentam uma maior suavidade em sua forma, são mais adequadas para captar de forma mais factível as componentes de frequência em cada nível de decomposição.

B. Coiflet

A análise desenvolvida a partir da família *Daubechies* pode ser estendida à família *Coiflet*.

A Fig 9 apresenta a forma de onda dos dois primeiros níveis de detalhes contendo as frequências na faixa de 5 a 10 kHz, para o primeiro nível e de 2,5 a 5 kHz para o segundo nível. A amplitude dos níveis de detalhes se apresentam conforme o esperado, dado que os supraharmônicos mais significativos se encontram na faixa de 3,5 a 4,5 kHz, de acordo com o espectro de frequência da figura 5, sendo captados pelo segundo nível de decomposição.

A Fig 10 apresenta a CDP para os dezessete níveis de decomposição efetuados. Pode ser observado que, de forma semelhante à família *Daubechies*, as *wavelets* de mais baixa ordem da família *Coiflet* (sobretudo a versão *coif1*), por apresentarem variações mais bruscas em sua forma, não são as

mais adequadas para a filtragem do sinal, apresentando níveis de energia que se diferem de forma sensível em relação aos níveis de energia captados pelas *wavelets* de ordem mais elevada.

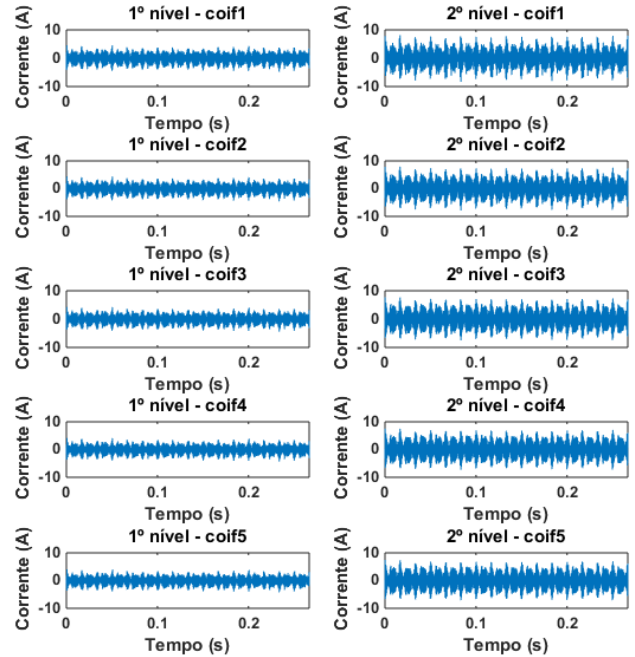


Fig. 9: segundo nível de detalhe para a família *Coiflet*.

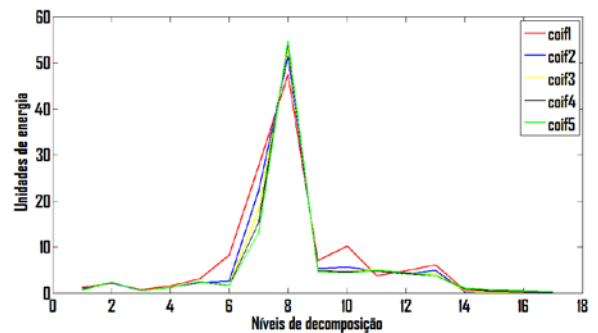


Fig. 10: CDP para as cinco primeiras ordens da família *Coiflet*.

As formas das *wavelets* da família *Coiflet* e as respostas dos respectivos filtros não estão apresentados nesse trabalho, mas a análise das formas das funções se dá de maneira semelhante à do primeiro caso.

C. Symlet

Segundo a análise desenvolvida para as duas famílias anteriores, a Fig 11 apresenta os dois primeiros níveis de decomposição para as cinco primeiras *wavelets* da família *Symlet*.

De forma similar ao observado para as famílias *daubechies* e *Coiflet*, a amplitude dos detalhes se deu de forma mais significativa em seu segundo nível de decomposição, conforme o espectro de frequência dos supraharmônicos e as faixas de frequência da tabela I.

A Fig 12 apresenta a CDP para os dezessete níveis de decomposição realizados, na qual pode ser visto um comportamento semelhante das *Symlets* de mais baixa ordem

em relação às *Daubechies* e *Coiflets* em suas primeiras ordens. Mais uma vez os níveis de energia das *wavelets* de mais baixa ordem diferem de forma sensível em relação às *wavelets* de mais alta ordem, estando tal fato ligado à característica da forma da função *wavelet*.

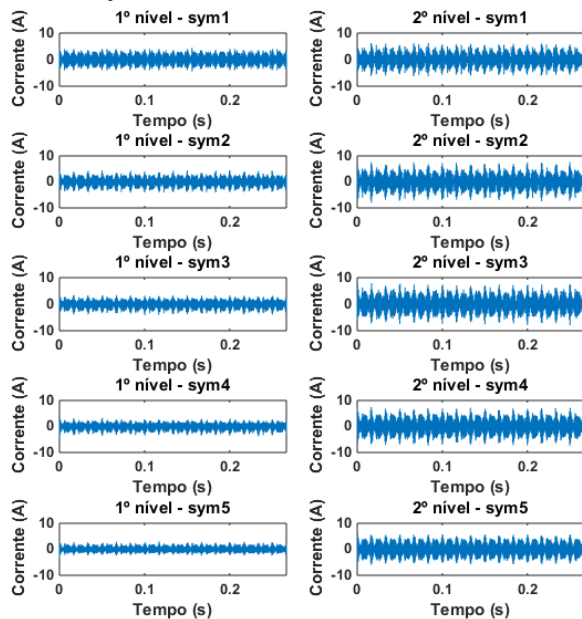


Fig. 11: segundo nível de detalhes para a família *Symlet*.

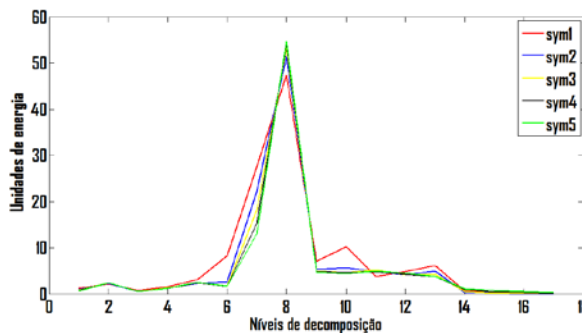


Fig. 12: CDP para as cinco primeiras ordens da família *Symlet*.

VI. CONCLUSÃO

Por meio das campanhas de medição realizadas foi possível observar a ocorrência de supraharmônicos em equipamentos eletrônicos que tipicamente empregam altas frequências de chaveamento em seu funcionamento.

O emprego da Transformada Wavelet foi capaz de fornecer informações significativas no intuito de realizar a caracterização dos supraharmônicos observados, sendo possível a determinação das faixas de frequência nas quais estão contidos, além de determinar a sua significância em relação à faixa de frequências que abrange a componente fundamental.

Vale destacar, no entanto, as limitações inerentes à análise via Transformada Wavelet.

A limitação mais significativa consiste na impossibilidade da mudança do parâmetro da frequência de corte dos filtros, que está associada à frequência de amostragem. Deste modo, a análise se dá de uma forma relativamente rígida, com os

valores das faixas de frequência de cada nível de decomposição dependentes da frequência de amostragem.

VII. REFERÊNCIAS

- [1] A. McEachern, "Electric Power Definitions: a Debate", IEEE Power and Energy Society General Meeting, Vancouver, Canada, 2013.
- [2] M. Klatt, J. Meyer, P. Schegner, "Comparison of measurements methods for the frequency range of 2 kHz to 150 kHz", IEEE 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2014.
- [3] S. K. Rönnberg, M. Wahlberg, E. O. A. Larson, M. H. J. Bollen, C. M. Lundmark, "Interaction between equipment and Power Line Communication: 9-95 kHz", IEEE Bucharest, PowerTech, 2009.
- [4] Sarah K. Rönnberg, Math H. J. Bollen, "Emission from Four Types of LED Lamps at Frequencies up to 150 kHz", IEEE 15th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2012.
- [5] M. H. J. Bollen, S. K. Rönnberg, E. O. A. Larsson, M. Wahlberg, C. M. Lundmark, "Harmonic Emission from Installations with Energy-Efficient Lighting", 11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU), 2011.
- [6] E. O. A. Larsson, C. M. Lundmark, M. H. J. Bollen, "Measurement of current taken by fluorescent lights in the frequency range 2 – 150 kHz", IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2006.
- [7] R. Torquato, W. Freitas, G. R. T. Hax, A. R. Donadon, R. Moya, "High Frequency Harmonic Distortions Measured in a Brazilian Solar Farm", 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2016.
- [8] G. Chicco, A. Russo, F. Spertino, "Supraharmonics: Concepts and Experimental Results on Photovoltaic Systems", International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation (ISNCC), 2015.
- [9] A. Reis, J. C. de Oliveira, "Uma análise dos fatores de influência na geração de distorções harmônicas em unidades eólicas", XI Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica (CBQEE), 2015.
- [10] S. T. Tentzerakis, S. A. Papathanassiou, "An Investigation of the Harmonic Emissions of Wind Turbines", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 22, 2007.
- [11] S. K. Rönnberg, A. G. Castro, M. H. J. Bollen, A. M. Munoz, E. R. Cadaval, "Supraharmonics from Power Electronics Converters", 9th International Conference on Compatibility and Power Electronics (CPE), 2015.
- [12] M. H. J. Bollen, M. Olofsson, A. Larsson, S. Rönnberg, M. Lundmark, "Standards for Supraharmonics (2 to 150 kHz)", IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine, vol. 3, 2014.
- [13] A. G. Castro, S. K. Rönnberg, M. H. J. Bollen, "A study about harmonic interaction between devices", IEEE 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2014.
- [14] E. O. A. Larsson, M. H. J. Bollen, "Measurement result from 1 to 48 fluorescent lamps in the frequency range 2 to 150 kHz", 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2010.
- [15] S. Rönnberg, A. Larsson, M. H. J. Bollen, "A Simple Model for Interaction Between Equipment at a Frequency of Some Tens of kHz", 21th International Conference on Electricity Distribution, 2011.
- [16] H. M. Oliveira, "Análise de Sinais para Engenheiros: Uma Abordagem via Wavelets", Editora Brasport, Rio de Janeiro, 2007.
- [17] M. Misiti, Y. Misiti, G. Oppenheim, J. M. Poggi, "Wavelet Toolbox: User's Guide", MathWorks, 2015.
- [18] J. Arrillaga e N. R. Watson, "Power System Harmonics, 2th edition", editora John Wiley & Sons, 2003.
- [19] T. K. Sarkar, M. S. Palma e M. C. Wicks, "Wavelet Applications in Engineering Electromagnetics", editora Artech House, Norwood, Ma, USA, 2002.
- [20] A. B. Wiltschko, G. J. Gage e J. D. Berke, "Wavelet Filtering Before Spike Detection Preserves Waveform Shape and Enhances Single-Unit Discrimination", Journal of Neuroscience Methods, volume 173, pages 34-40, 2008.
- [21] E. F. Arruda, "Análise de Distúrbios Relacionados com a Qualidade da Energia Elétrica Utilizando a Transformada Wavelet", dissertação, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 2003.
- [22] R. X. Gao, R. Yan. "Wavelets: Theory and Application for Manufacturing". Springer. 2011.