

Identificação do Comportamento da Carga Utilizando Processamento Digital de Sinais com Harmônicos Variantes no Tempo

R. O. Gomes¹, J. M. da Silveira¹, P. F. Ribeiro¹, C. A. Duque², F. N. Belchior³

Universidade Federal de Itajubá¹, Universidade Federal de Juiz de Fora², Universidade Federal de Goiás³

Resumo — Este trabalho apresenta a utilização de métodos de análise de tempo-frequência como a *Short-Time Fourier Transform*, *Wavelets* e *Wavelet Packet* para identificar o comportamento da carga utilizando os harmônicos variantes no tempo. As técnicas foram aplicadas a uma medição de corrente em um prédio universitário, ao qual foi realizada o acionamento de um carga (elevador) em conjunto com as demais cargas típicas do prédio, e assim possibilitar a identificação de seu comportamento como a subida e descida por meio da assinatura harmônica da carga.

Palavras-chaves — STFT, wavelet, wavelet packet, harmônicos;

I. INTRODUÇÃO

Com o aumento de dispositivos de eletrônica de potência ocorre uma grande inserção de cargas não-lineares no sistema elétrico, as quais geram distorções harmônicas nas ondas de tensão e corrente, o que pode danificar diversas cargas sensíveis, causar perdas térmicas, impedir o funcionamento correto de dispositivos de proteção e controle, e deteriorar a qualidade da energia da rede [1][2].

Esses equipamentos não-lineares ligados à rede apresentam uma assinatura harmônica, que pode ser utilizada para realizar um monitoramento não invasivo das cargas [3], permitindo a identificação do equipamento ligado e o instante em que foi operado.

Para sinais estacionários, os harmônicos podem ser analisados utilizando a Transformada Discreta de Fourier (*Discrete Fourier Transform* – DFT) [4][9], otimizada computacionalmente pela Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* – FFT), porém esse método não é muito eficiente quando aplicado a uma onda com frequências variantes no tempo, ou quando o sinal é não estacionário, sendo incapaz de determinar o instante em que ocorrem mudanças no sinal. Para contornar esse problema, é possível utilizar a Transformada de Fourier de Janela Deslizante (*Short-Time Fourier Transform* – STFT), na qual a FFT é aplicada em uma certa quantidade de ciclos, descrevendo uma janela de tempo, a qual é deslizada para um novo cálculo de FFT. Dessa forma, se determina o conteúdo harmônico para cada janela de tempo, sendo possível determinar os instantes das variações de frequência no sinal [5].

Os autores agradecem à FAPEMIG, CNPq e CAPES pelo suporte às pesquisas.

Outro método muito utilizado para análise de harmônicos no sistema de potência é a Transformada *Wavelet*, que consiste na utilização de uma *wavelet* mãe de alguma família de *wavelets*, sendo então janelada em diferentes escalas [6], onde as janelas menores são utilizadas para analisar altas frequências, e as janelas maiores as baixas frequências. No método discreto (*Discrete Wavelet Transform* – DWT), são utilizados filtros que dividem o sinal em duas componentes, de baixa e alta frequência, este processo é repetido para a componente de baixa frequência, novamente dividindo o sinal em dois, até que se atinja o nível de divisões desejado, resultando em bandas de frequência no tempo, possibilitando a análise das componentes variantes no tempo.

Uma variação da Transformada *Wavelet*, é a *Wavelet-Packet*, a qual é calculada da mesma forma que a DWT, porém, ambas as componentes de baixa e alta frequência são subdivididas em duas [7][8], dessa forma, obtêm-se bandas de frequência uniformes, cujo tamanho depende da amostragem utilizada na medição do sinal.

Este trabalho se propõe a realizar a identificação da assinatura harmônica de um elevador instalado em um prédio localizado na Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) e a determinação dos momentos de sua ativação, através da análise da distorção harmônica de corrente no transformador da subestação do prédio, além de realizar uma comparação qualitativa das técnicas utilizadas.

II. ANÁLISE DE FREQUÊNCIA E TEMPO-FREQUÊNCIA

A. DFT

A transformada de Fourier é utilizada para analisar as formas de onda no domínio do tempo no domínio da frequência e vice versa. É um procedimento matemático para determinar o conteúdo harmônico contido em um dado sinal. Quando a forma de onda é periódica, a série de Fourier pode ser utilizada para calcular as magnitudes e fases da fundamental e das componentes harmônicas. A transformada de Fourier de tempo discreto (DFT) é a versão digital da transformada de Fourier sendo possível realizar a análise, manipulação e síntese de um sinal [9].

$$X(m) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{-i2\pi n \frac{m}{N}} \quad (m = 0, 1, \dots, N) \quad (1)$$

Onde N é o número de faixas de frequência.

B. STFT (Short-Time Fourier Analysis)

Na maioria das aplicações o espectro de frequência dos sinais varia com o tempo. Com a aplicação da FFT são obtidas as componentes de frequências do sinal, porém, a informação no tempo é perdida, ou seja, não é possível observar quando uma variação no conteúdo espectral ocorreu. Uma solução para este tipo de análise foi proposta por Gabor [10], sendo uma adaptação da transformada de Fourier, onde um sinal é multiplicado por uma função janelada cuja posição varia no tempo, comumente chamado de janela deslizante.

O sinal no tempo é subdividido em janelas de tamanho fixo e de curta duração, onde é calculada uma nova FFT para cada janela (Fig. 1.(a)). Assim, obtém-se um resultado em duas dimensões, tempo e frequência [11], como ilustrado na Fig. 1.(b), permitindo observar a evolução das componentes harmônicas no decorrer do tempo e possibilitando realizar análises e detecção de eventos em sistemas de potência.

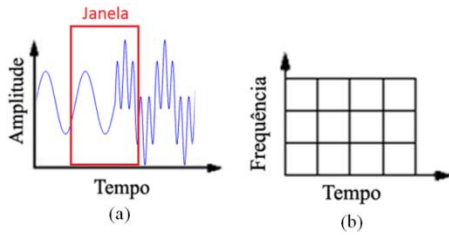


Fig. 1. (a) Sinal com janela deslizante (b) Gráfico frequência x tempo.

A transformada de Fourier de tempo curto (STFT) é utilizada em sinais não estacionários. É definida como:

$$X_n(e^{j\omega_k}) = \sum_m x(m) \cdot w[n-m] \cdot e^{-j\omega_k m} \quad (2)$$

Onde $\omega_k = 2\pi k/N$ é frequência em radianos ($k = 0, 1, \dots, N-1$), N é o número de faixas de frequência, $w[m]$ é uma janela limitada de tamanho L (ex: Hamming), onde $L \leq N$.

C. Wavelets

A principal característica da transformada *wavelet* é a análise em multi-resolução, que consiste na decomposição do sinal em sub-sinais de diferentes níveis de resoluções, sendo versões escalonadas e transladadas das funções *wavelets*.

A STFT fornece informação temporal, porém como utiliza uma janela fixa para toda a análise, é difícil se obter um tamanho de janela que forneça boa informação no tempo e na frequência. Na transformada *wavelet* essa limitação foi resolvida permitindo a visualização do sinal em diferentes escalas de frequências.

Existem diferentes famílias de *wavelets* como Haar, Morlet, Daubechies entre outras. A escolha da *wavelet* mãe depende da aplicação, por exemplo, a família Daubechies pode ser utilizada para detecção de eventos em sistemas de potência [12][13].

Na Transformada *Wavelet* Discreta utiliza-se o cálculo por meio de filtros, sendo uma filtragem sucessiva de um sinal discreto $x[n]$. Nas filtrações sucessivas os sinais são subamostrados em um fator de 2, preservando o teorema de Nyquist.

$$y_{high}[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k) \cdot h(2n-k) \quad (3)$$

$$y_{low}[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k) \cdot g(2n-k) \quad (4)$$

O filtro $g[n]$ (passa-baixas) decompõe o sinal resultando em componentes chamadas de aproximação do sinal (baixas frequências) e o filtro $h[n]$ (passa-altas) resulta em componentes chamadas de detalhe (altas frequências). Apenas a componente de aproximação é subdividida. A Fig. 2 ilustra a decomposição de 3 níveis utilizando os filtros:

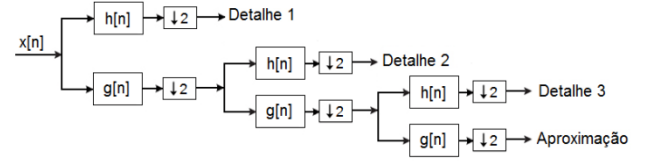


Fig. 2. Decomposição da Transformada *Wavelet* Discreta.

As faixas de frequências são ilustradas na Fig. 3:

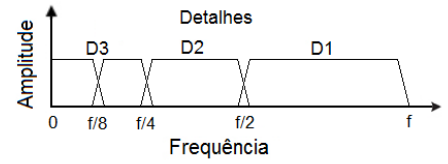


Fig. 3. Faixas de frequência da DWT. (Detalhe 1 – D1, Detalhe 2 – D2 e Detalhe 3 – D3).

D. Wavelet Packet

A Transformada *Wavelet* por Pacotes (WPT - *Wavelet Packet Transform*) utiliza a mesmas equações de filtros da DWT, a diferença está no fato de tanto os coeficientes de aproximação quanto os coeficientes de detalhe serem decompostos. Assim, resulta em uma decomposição completa, como poder ser visualizado na árvore de coeficientes da Fig. 4.

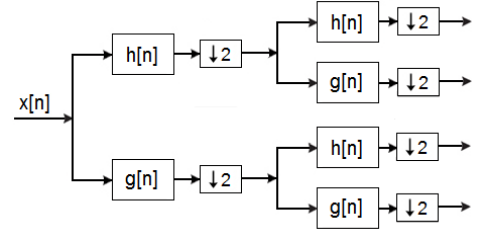


Fig. 4. Decomposição da Transformada *Wavelet* por Pacotes.

Na decomposição usando transformada *wavelet* por pacotes as faixas de frequências são uniformes em comparação a transformada *wavelet* discreta, o que para análise de harmônicos é de grande importância.

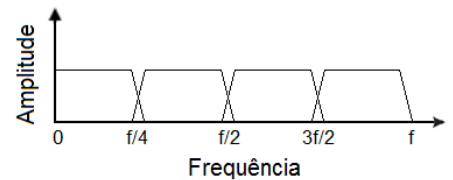


Fig. 5. Faixas de frequência da WPT.

Para este trabalho foi utilizado uma decomposição de 8 níveis, de acordo com a frequência de amostragem do sinal de entrada (15360Hz), a faixa de saída do banco de cada filtro correspondeu a 30Hz (Fig. 6).

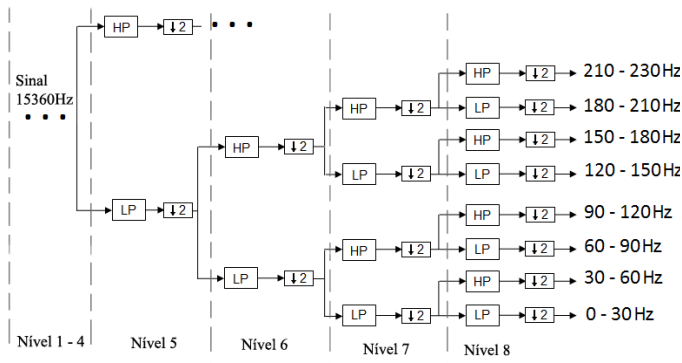


Fig. 6. Decomposição da WPT para 8 níveis.

Na análise de harmônicos para redes de 60Hz, a saída da fundamental e de seus respectivos harmônicos estariam localizadas no final da banda de passagem de dois filtros adjacentes, desta maneira ocorrerá o espalhamento do sinal entre estes filtros. Para solucionar este problema, foi utilizada uma técnica de *wavelet packet* para decomposição de harmônicos [14]. Nesta técnica a saída no filtro é centralizada na banda de passagem do filtro sintonizado no harmônico desejado. Para isso o resultado da reconstrução do sinal (síntese) de dois filtros adjacentes são somados, como pode ser visualizado na Fig. 7.

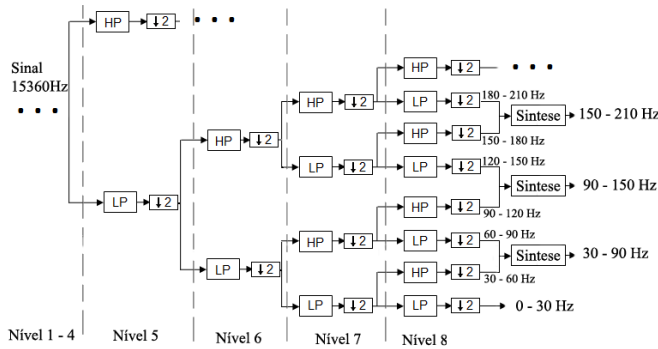


Fig. 7. Adaptação dos filtros da WPT para as frequências harmônicas.

III. METODOLOGIA

Os dados utilizados neste trabalho referem-se a um prédio universitário, localizado na Universidade Federal de Itajubá, Brasil. Está conectado a média tensão trifásica (13.8 kV) por meio de um transformador de distribuição de 150 kVA.

As cargas típicas consistem em computadores, impressoras, iluminação, refrigeradores, RTDS (*Real Time Power System Simulation*), UPS (*Uninterruptible Power Supply*), elevador, entre outras.

A medição da corrente foi realizada no secundário do transformador do prédio, com seu funcionamento em um dia típico. Foram realizadas seis acionamentos do elevador no intervalo de 5 minutos de medição.

A taxa de amostragem utilizada foi de 15360Hz (256 pontos por ciclo), para a frequência da rede elétrica 60Hz. A forma de onda para as três fases é mostrada na Fig. 8. Para a aquisição de dados utilizou-se o sistema NI USB-9162/9215 100 kS/s, 16 bits, em conjunto com um filtro *anti-aliasing*.

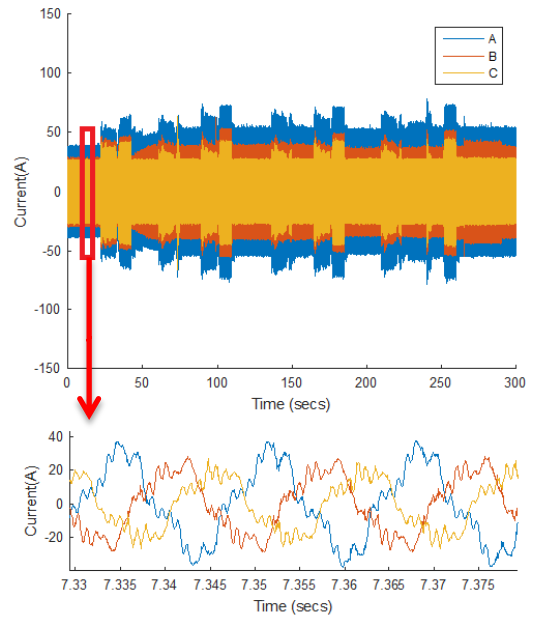


Fig. 8. Correntes nas fases A, B e C.

As técnicas citadas anteriormente foram aplicadas a fim de se encontrar o comportamento e características nas correntes harmônicas causadas pelo evento de acionamento do elevador. A partir dos resultados, foram realizadas as análises para a identificação dos acionamentos por meio da assinatura harmônica da carga e uma comparação qualitativa das técnicas utilizadas.

IV. RESULTADOS

Quando ocorre o acionamento da carga do elevador o inversor de frequência que controla seu acionamento injeta diferentes harmônicos na rede, que variam com o tempo, como pode ser visualizado na Fig. 9. A figura exibe a forma de onda da corrente na fase A, detalhes antes e durante um acionamento.

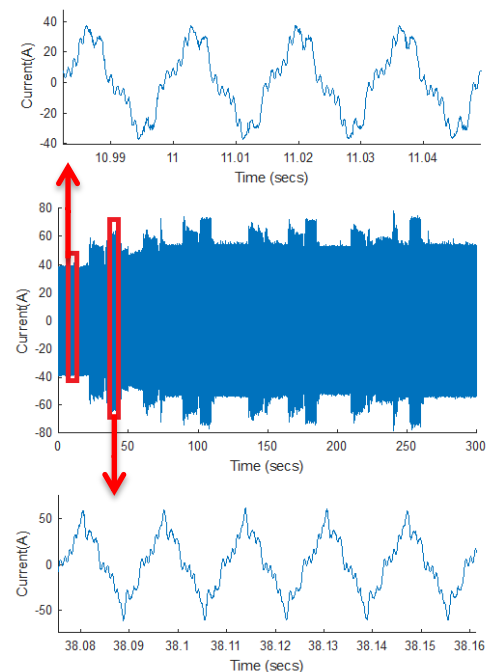


Fig. 9. Corrente nas fases A, detalhes antes e durante um acionamento.

A. DFT

Como o sinal analisado possui frequências que variam no tempo a FFT não é recomendada para esta análise, porém, pode ser utilizada para mensurar quais as componentes harmônicas estão presentes no sinal antes dos acionamentos (regime estacionário). Desta maneira, foi realizada uma FFT utilizando 12 ciclos do sinal. A Fig. 10 mostra o espectro de frequências harmônicas.

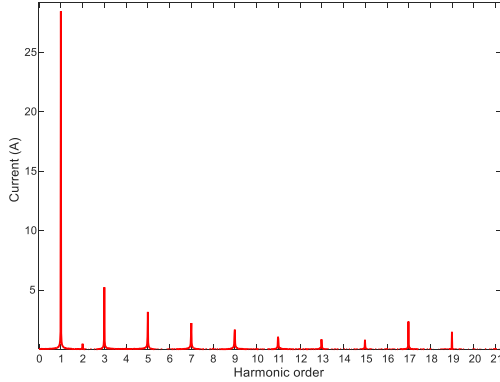


Fig. 10. FFT para 12 ciclos.

Como esperado há predominância de harmônicos ímpares, comuns para os tipos de cargas presentes no sistema analisado.

B. STFT

Utilizando a STFT, para diferentes janelas, não se observou alterações significativas em seu espectrograma, pois a partir da FFT realizada, percebe-se que as harmônicas ímpares estão presentes durante todo o tempo, assim, com o acionamento da carga em questão, a injeção dos harmônicos não foram suficientemente relevantes para causar alterações no espectrograma representado na Fig. 11.

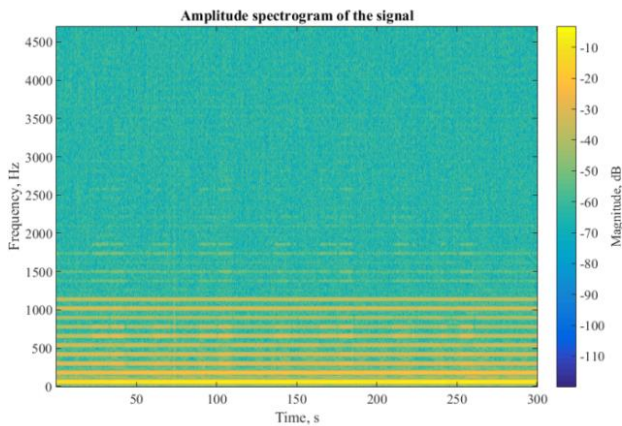


Fig. 11. Espectrograma utilizando a STFT.

C. WAVELET

A transformada *wavelet* fornece bons resultados para detecção de mudanças de frequências e detecção de distúrbios [13]. A DWT foi aplicada utilizando a *wavelet* mãe db4 para 5 níveis de decomposição. Tal como mostrado na Fig. 12.

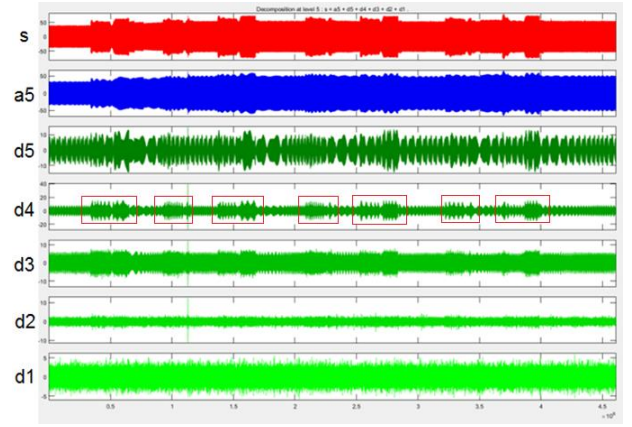


Fig. 12. Decomposição wavelet de 5 níveis.

Os níveis de detalhes d3 e d4 fornecem informações sobre o comportamento da variação de frequência durante os acionamentos. Os acionamentos podem ser visualizados com maiores detalhes no nível d4 (destacado em vermelho), detectando o exato momento das ativações. Neste caso específico não foi possível à distinção entre os diferentes tipos de acionamento, como a subida e a descida do elevador.

D. WAVELET PACKET

A transformada *wavelet* por pacotes foi aplicada para uma decomposição de 8 níveis e utilizando a *wavelet* mãe db45. O resultado da síntese dos filtros na análise de harmônicos foram extraídos, assim sendo possível analisar a forma de onda no tempo de cada harmônico separadamente. A Fig. 13 exibe a componente fundamental extraída.

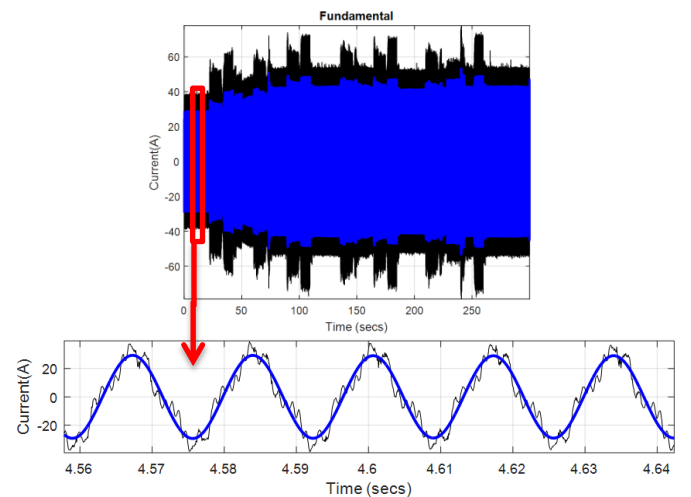


Fig. 13. Forma de onda da corrente e componente fundamental.

A terceira, sétima e nona harmônica, não mostraram variações significativas com os acionamentos, mantendo seu comportamento constante. A Fig. 14 exibe a terceira harmônica.

Para a quinta, décima primeira e décima terceira harmônica verifica-se um comportamento diferenciado, percebendo claramente as alterações decorrentes do acionamento, possibilitando a identificação do tipo de movimento (subindo ou descendo), o tempo de duração de um acionamento, além da informação no tempo de quando ocorreram. A Fig.16 exibe a décima primeira harmônica.

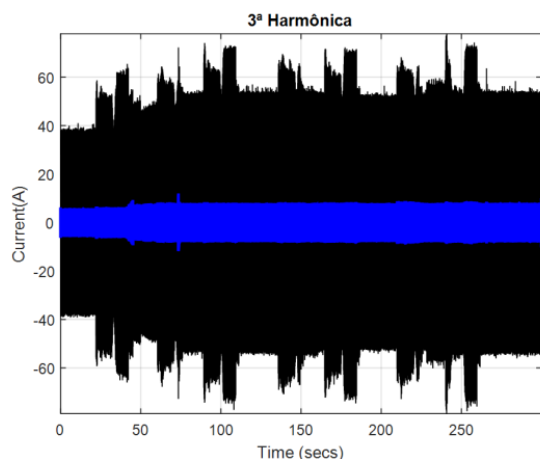


Fig. 14. Forma de onda da corrente e a componente terceira harmônica.

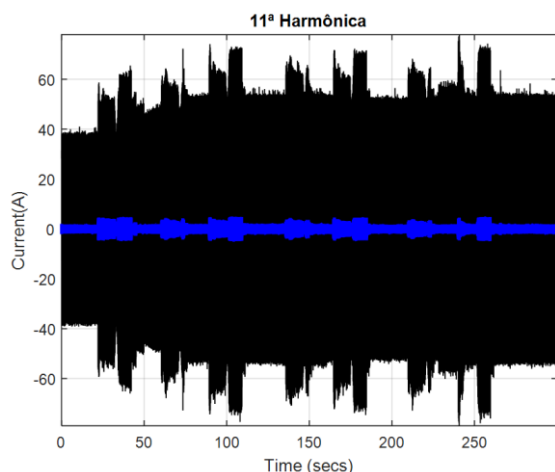


Fig. 16. Forma de onda da corrente e a componente décima primeira harmônica.

A Fig. 17 exibe o padrão identificado para a décima primeira harmônica, diferenciando o movimento de subida e descida. Sendo a subida do elevador com duração de 16s e 24s para a descida.

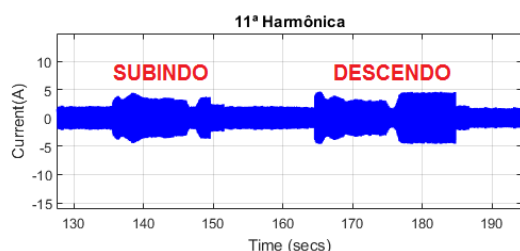


Fig. 17. Detalhe da assinatura de subida e descida do elevador na 11ª harmônica.

A partir dos padrões identificados é possível especificar os momentos dos acionamentos no decorrer do sinal amostrado. Sendo 5 movimentos de descida e 3 movimentos de subida (Fig. 18).



Fig. 18. Identificação dos eventos de subida e descida do elevador utilizando a 11ª harmônica.

As técnicas de análise de tempo-frequência se mostraram elucidativas no caso apresentado. A STFT não foi eficiente devido ao comportamento da carga não apresentar variações de frequências diferentes das que já existiam no sistema. A transformada *wavelet* foi eficaz em determinar os momentos de acionamento desejados, porém não foi possível a distinção entre os mesmos. Por fim, a *wavelet packet* se mostrou eficiente para o objetivo deste trabalho sendo possível a identificação dos momentos de acionamento, duração e distinção dos comportamentos de subida e descida. Além das informações obtidas, a *wavelet packet* pode fornecer informações importantes como a medição das amplitudes das componentes harmônicas variantes no tempo, possibilitando análises mais completas dos impactos causados no sistema.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] H. Sharma, M. Rylander and D. Dorr, "Grid Impacts Due to Increased Penetration of Newer Harmonic Sources," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, no. 1, pp. 99-104, Jan.-Feb. 2016.
- [2] Marjan Shafiee Rad, M. Kazerooni, M. J. Ghorbany and H. Mokhtari, "Analysis of the grid harmonics and their impacts on distribution transformers," *2012 IEEE Power and Energy Conference at Illinois*, Champaign, IL, 2012, pp. 1-5.
- [3] D. Jung, H. H. Nguyen and D. K. Y. Yau, "Tracking appliance usage information using harmonic signature sensing" – 2015 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), Miami, FL, 2015, pp. 459-465.
- [4] L. Eren and M. J. Devaney, "Calculation of power system harmonics via wavelet packet decomposition in real time metering" – IMTC/2002. Proceedings of the 19th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IEEE Cat. No.00CH37276), 2002, pp. 1643-1647 vol.2.
- [5] R. Subhashree, C. S. Preethi and P. Supriya, "Fault distance identification in transmission line using STFT algorithm," *2016 International Conference on Computer Communication and Informatic*.
- [6] A. K. Singh and M. Fozdar, "A wavelet-based event detection and location framework for enhanced situational awareness in power system," *2016 IEEE Annual India Conference (INDICON)*, Bangalore, 2016, pp. 1-6.
- [7] Do, H. T., Zhang, X., Li, H., Li, F., Chu, T. T. T., & Viet, N. N., "Wavelet packet-based passive islanding detection method for grid connected photovoltaic inverters," *2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia)*, Hefei, 2016, pp. 1566-1570.
- [8] J. Barros and R. I. Diego, "Detection and Analysis of Time-Varying Harmonics in Power Systems Using Wavelets" – 6th WSEAS/IASME Int. Conf. on Electric Power Systems, High Voltages, Electric Machines, Tenerife, Spain, Dezembro, 2006.
- [9] Y. Yu, Y. Xu and X. Liu, "Research of Improved Iterative DFT Method in Harmonic Current Detection," *2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, Wuhan, 2011, pp. 1-4.
- [10] D. Gabor, "Theory of communication. Part 1: The analysis of information," *Electrical Engineers-Part III: Radio and Communication Engineering*, Journal of the Institution of, vol. 93, pp. 429-441, 1946.
- [11] M. Portnoff, "Time-frequency representation of digital signals and systems based on short-time Fourier analysis," in *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 28, no. 1, pp. 55-69, Feb 1980.
- [12] T. C. O. Carvalho, C. A. Duque, P. M. Silveira, M. A. S. Mendes and P. F. Ribeiro, "Review of signal processing techniques for time-varying harmonic decomposition," *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, San Diego, CA, 2012, pp. 1-6.
- [13] J. Frunt, W. L. Kling and P. F. Ribeiro, "Wavelet Decomposition for Power Balancing Analysis," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, no. 3, pp. 1608-1614, July 2011.
- [14] K. Thangaraj, R. Archana and S. A. Begam, "Analysis and estimation of harmonics using wavelet packet transform," *2016 International Conference on Emerging Trends in Engineering, Technology and Science (ICETETS)*, Pudukkottai, 2016, pp. 1-5.