

Utilização de Medidores Eletrônicos de Faturamento para Detecção e Registro de Eventos que afetam a Qualidade de Energia

The use of electronic billing meters for detection and registration of events that affect power quality

Francisco Pereira Júnior¹
Nelson Kagan¹

¹EPUSP – Escola Politécnica da USP
fpereirajr@usp.br
nelsonk@pea.usp.br

Abstract: This paper shows the possibility to add new functions to electronic power meters, that allow the detection and recording of events that affect power quality. These meters are permanently connected to the network specially for billing purposes. They have remote communication channels and are distributed along the network. Detection techniques like RMS values, signal decomposition, Instantaneous Euclidian Norm and wavelet transform are herein studied. Memory and processing constraints of the electronic meters are taken into account. The detection algorithms were chosen to cause no impact on the meter operation.

Keywords: Power quality, detection techniques, wavelet transform, Instantaneous Euclidian Norm, signal decomposition.

Resumo: Este artigo mostra a possibilidade de se adicionar novas funções aos medidores eletrônicos de faturamento, de forma a permitir a detecção e registro de eventos que afetam a qualidade de energia. Estes medidores estão conectados permanentemente à rede elétrica, possuem canais de comunicação remota e estão distribuídos por toda a rede. O artigo trata de várias técnicas de detecção como valores eficazes, decomposição de sinais, Norma Euclidiana Instantânea e a transformada *wavelet*. Foram consideradas as limitações de memória e processamento dos medidores e selecionados algoritmos de detecção de modo a não provocar impacto no funcionamento do medidor.

Palavras-Chave: Qualidade de energia, técnicas de detecção, transformada wavelet, Norma Euclidiana Instantânea, decomposição de sinais.

1 Introdução

Os analisadores de qualidade de energia elétrica possuem recursos sofisticados para detecção de eventos, alta capacidade de memória e de processamento. Porém, seu custo elevado restringe sua aplicação a locais onde já são esperadas ocorrências destes eventos. Características técnicas destes analisadores podem ser encontradas nas páginas eletrônicas de seus fabricantes, como por exemplo www.dranetz-bmi.com, www.elspec-ltd.com e www.pwrm.com.

Alguns medidores eletrônicos de energia utilizados para faturamento já incorporaram funções que auxiliam o diagnóstico de funcionamento da rede elétrica. Sua conexão permanente com a rede, seus recursos de leitura remota e o grande número de medidores instalados tornam estes medidores indicados para detectar e registrar eventos, que ocorrem em pontos da rede que não estejam sendo monitorados por analisadores de qualidade de energia. Especificações destes medidores eletrônicos de faturamento podem ser encontradas nas páginas eletrônicas de seus fabricantes, por exemplo alguns fabricantes brasileiros em www.elonet.com.br, www.landisgyr.com.br e www.nansen.com.br.

Os recursos limitados de amostragem de sinal, memória e processamento destes medidores limitam os eventos que podem ser detectados. O registro destes eventos também é limitado pela memória disponível, porém, a existência de canais de comunicação remota permite que os eventos detectados possam ser enviados a um sistema de processamento capaz de armazenar e analisar os eventos detectados por toda a rede.

Neste artigo serão apresentados dois tipos de eventos que podem ser detectados e as técnicas de detecção estudadas, compatíveis com a capacidade de processamento e memória de alguns medidores de energia. Também são apresentados os métodos usados para a simulação de eventos e os resultados obtidos com as diferentes técnicas de detecção.

2 Transitórios oscilatórios e VTCDs

Neste trabalho foram desenvolvidas técnicas de detecção de transitórios oscilatórios de baixa frequência e de variações de tensão de curta duração (VTCDs).

Os transitórios oscilatórios de baixa frequência, até 5 kHz, são bastante comuns na rede de distribuição e são produzidos na maioria das

vezes por chaveamento de bancos de capacitores ou energização de transformadores. De acordo com a IEEE 1159 [1], as oscilações provocadas pelo chaveamento de capacitores geram sinais com frequências de 300 a 900 Hz. A energização de transformadores costuma apresentar sinais com frequências inferiores a 300 Hz. A Figura 1 ilustra a tensão em pu de uma das fases em um dado consumidor, quando da conexão de um banco de capacitores à rede.

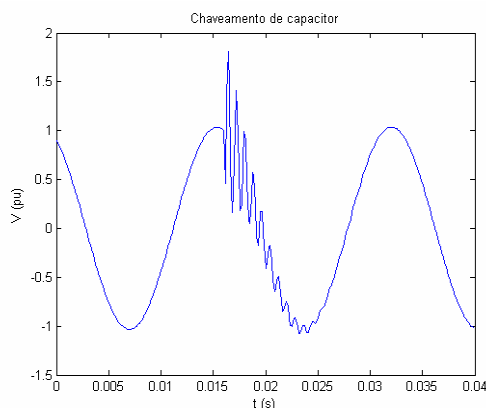


Figura 1: Simulação de chaveamento de capacitor.

Afundamentos, elevações e interrupções de curta duração também são fenômenos comuns na rede de distribuição. Na Figura 2, apresentada por Bollen [2], pode-se observar a classificação das interrupções e das variações de tensão de curta e longa duração.

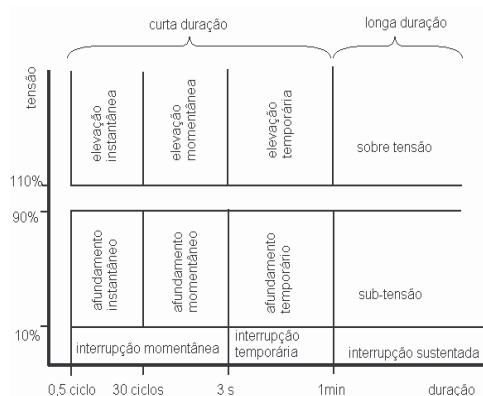


Figura 2: Classificação das variações de tensão.

Os afundamentos de tensão geralmente são associados a faltas no sistema mas também podem ser provocados pela conexão de cargas de alta potência ou partida de grandes motores. A duração de um afundamento provocado por uma falta depende do tempo de extinção natural ou do tempo que o sistema de proteção leva para isolar a falta, isso pode ocorrer de 2 a 30 ciclos. A partida de grandes motores pode produzir afundamentos que duram vários segundos. Na

figura 3 pode-se observar um afundamento de tensão registrado para uma fase na entrada de média tensão de um consumidor, com duração aproximada de dois ciclos, provocado por uma falta na rede elétrica.

As elevações de tensão também podem ser produzidas por faltas no sistema. Faltas que ocorrem entre uma fase e terra, por exemplo, podem elevar a tensão nas outras fases. A desconexão de grandes cargas também pode, em certas condições, provocar elevação de tensão na rede.

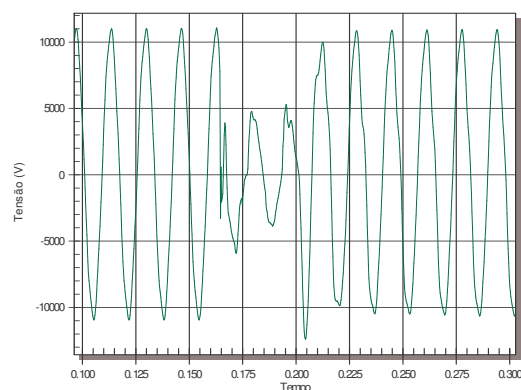


Figura 3: Afundamento instantâneo de tensão.

3 Técnicas de detecção

3.1 Valor Eficaz

O valor eficaz ou RMS é uma das técnicas mais utilizadas para a detecção de eventos que afetam a qualidade de energia. Afundamentos e elevações são definidos quando da ultrapassagem de limites considerados adequados. O cálculo do valor eficaz pode ser feito de forma contínua ou de forma discreta. Em ambos os casos é usada uma janela, de duração múltipla de meio ciclo, da frequência fundamental.

Na forma contínua, o cálculo do valor eficaz é feito a cada amostra do sinal. Isto implica em um cálculo de raiz quadrada (que exige maior esforço computacional) para cada fase de tensão e cada fase de corrente a cada amostra.

Na forma discreta, o cálculo é feito em intervalos múltiplos de meio ciclo. O tempo de processamento é bastante reduzido se comparado ao cálculo de forma contínua, pois os cálculos de raiz quadrada só são feitos a cada meio ciclo. A figura 4 mostra o valor eficaz do sinal da figura 3. A linha tracejada representa o valor eficaz calculado na forma discreta e a linha sólida representa o valor eficaz calculado na forma contínua.

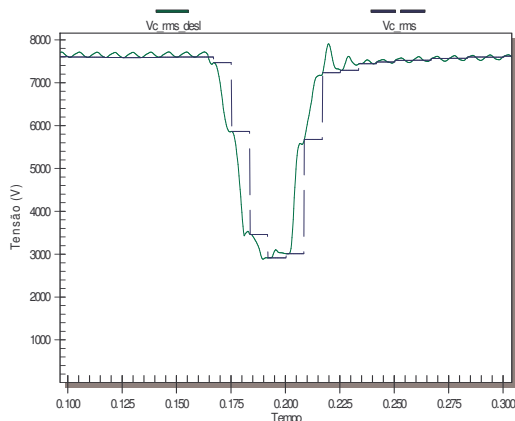


Figura 4: Valores eficazes de afundamento de tensão.

No estudo apresentado por Kagan et al [3] foram feitas comparações com janelas de dois ciclos, um ciclo e meio ciclo. As janelas de dois ciclos apresentaram um desempenho inferior na detecção de variações de tensão de curta duração (VTCDs), pois sua resposta é mais lenta, devendo ser utilizada apenas na detecção de eventos com duração superior a três ciclos. Janelas de um ciclo são o mínimo recomendado para medidores de qualidade de energia e seu resultado é bastante próximo das janelas de meio ciclo.

A norma IEC 61000-4-30 [4] define que os equipamentos devem medir afundamentos e elevações de tensão utilizando janelas discretas de um ciclo com atualização a cada meio ciclo.

3.2 Decomposição de sinais

Uma forma de detecção de perturbações em um sistema estável de 60 Hz é a decomposição do sinal em sua componente fundamental e outra com os demais componentes. Esta técnica apresentada por Marafão em [5] permite isolar a componente fundamental e a componente residual, que contém a informação da perturbação. O método visto no diagrama da figura 5, possui um filtro passa-baixa na entrada para eliminar sinais com frequências superiores à frequência de Nyquist. Na seqüência, um filtro rejeita-faixa sintonizado na frequência fundamental apresenta em sua saída a componente residual, que subtraída do sinal de entrada fornece a componente fundamental.

O filtro rejeita-faixa pode ser implementado como filtro de resposta finita ao impulso (FIR), ou como filtro de resposta infinita ao impulso (IIR). Ambos são capazes de separar a componente fundamental da componente residual. A escolha do tipo de filtro deve considerar o tempo de processamento. Em Smith [6] e Marafão [5] são feitas comparações entre filtros FIR e IIR com características equivalentes e o tempo de processamento dos filtros FIR é muito maior.

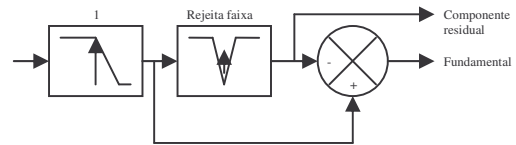


Figura 5: Decomposição de sinais em componente fundamental e componente residual.

Na figura 6 pode ser vista a simulação de um transitório oscilatório e sua componente residual extraída por este método.

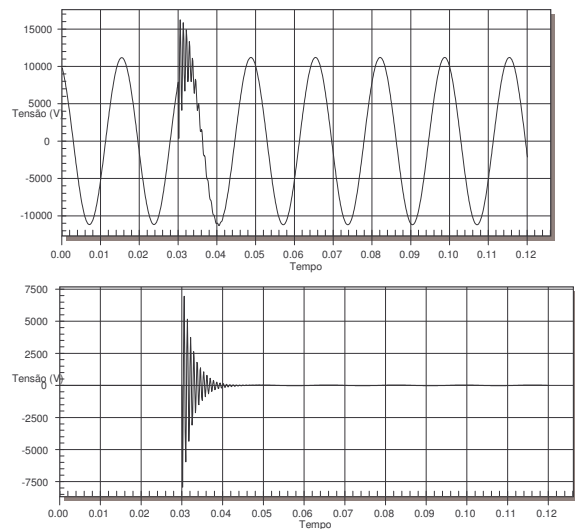


Figura 6: Transitório e sua componente residual.

3.3 Norma Euclidiana Instantânea (NEI)

A NEI é apresentada por Marafão em [5] como uma das formas de decomposição de sinais no domínio do tempo. Embora sua definição seja válida para sistemas com qualquer número de fases, aqui a definição da NEI é restrita para um sistema trifásico.

No caso de um sistema trifásico $[v(t)] = [v] = [v_1(t), v_2(t), v_3(t)]$, onde v_1 , v_2 e v_3 são as tensões das três fases, a NEI para os valores de $[v]$ será:

$$\| [v] \|_{\Delta} = \sqrt{[v][v]} = \sqrt{v_1^2 + v_2^2 + v_3^2} \quad (1)$$

Na figura 7 é mostrada a simulação de um transitório em apenas uma das fases e a NEI correspondente. As outras duas fases não apresentam transitório. O nível contínuo da NEI representa a componente fundamental enquanto a oscilação representa a componente residual. A NEI apresenta um valor constante em sistemas equilibrados e sem distorção. Ocorrendo

desequilíbrio de amplitude ou de fase, o valor da NEI deixa de ser um sinal contínuo e passa a refletir este desequilíbrio. O mesmo ocorre para sinais com distorção harmônica.

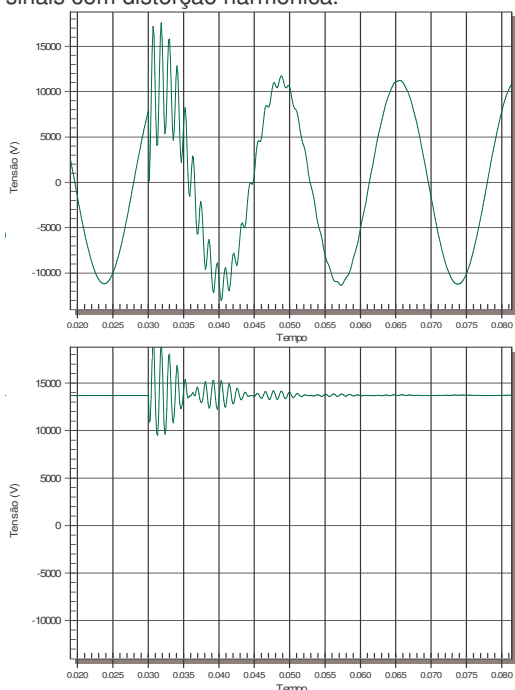


Figura 7: Transitório em uma fase e NEI.

Duarte [7] apresenta uma proposta de indicador de qualidade de energia, que reflete os desequilíbrios de tensão da componente fundamental e de harmônicas. Esta forma de decomposição quando utilizada em medidores eletrônicos de faturamento apresenta um tempo de processamento bastante reduzido, pois os valores instantâneos elevados ao quadrado já existem para o cálculo do valor eficaz, bastando somá-los e extrair a sua raiz a cada intervalo de amostragem.

3.4 Transformada wavelet

A transformada wavelet (TW) vem sendo usada por vários autores [8], [9], [10], [11], [12] e [13], para a detecção e classificação de eventos que afetam a qualidade de energia.

O método clássico de análise do espectro de frequência usando a Transformada de Fourier (TF) é adequado quando temos sinais periódicos em regime permanente (domínio da frequência). Porém, a TF se torna imprecisa quando precisamos localizar no tempo eventos isolados. A definição da transformada wavelet contínua (TWC_f^ψ) de uma função f pela wavelet ψ é:

$$TWC_f^\psi(a,b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\psi_{ab}(t)dt \quad (2)$$

onde:

$$\psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \\ a,b \in \mathfrak{R}; a \neq 0 \quad (3)$$

sendo ψ a wavelet mãe com seus dois parâmetros, dilatação a e translação b que variam de forma contínua. Os coeficientes $TWC(a,b)$ representam a correspondência de $f(t)$ em relação à wavelet mãe $\psi(t)$.

O fator de escala a nos permite analisar diferentes faixas de frequência, pequenos valores de a correspondem a wavelets comprimidas que são adequadas para altas frequências, valores maiores de a correspondem a wavelets dilatadas, adequadas para baixas frequências.

A transformada wavelet discreta (TWD) pode ser derivada da TWC, com os fatores de escala e de deslocamento transformados em números inteiros (j,k) e a função $f(t)$ discretizada para as amostras $f(n)$.

$$TWD_f^\psi(j,k) = \frac{1}{\sqrt{a_0^j}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} f(n)\psi\left(\frac{n-a_0^j k b_0}{a_0^j}\right) \\ j,k,n \in \mathbb{Z}; a_0 > 1 \quad (4)$$

Usando sua forma mais simples com $a_0 = 2$ e $b_0 = 1$ temos a transformada wavelet na forma diádica, que é facilmente implementada com bancos de filtros.

$$TWD_f^\psi(j,k) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} f(n)\psi\left(\frac{n-2^j k}{2^j}\right) \quad (5)$$

A TWD utiliza filtros de decomposição dos sinais que separam os componentes de alta frequência (detalhes) e os componentes de baixa frequência (aproximações). Os filtros são chamados de “Filtro de decomposição passa-baixa” (FDPB) e “Filtro de decomposição passa-alta” (FDPA). Sucessivas aplicações dos filtros de decomposição nos coeficientes de aproximação, chamada análise de multi-resolução (AMR), que separa as várias faixas de frequência e os picos de energia nos coeficientes de detalhe e localizam no tempo as ocorrências de eventos. A cada decomposição, o número de amostras resultante, tanto nos coeficientes de aproximação quanto nos coeficientes de detalhe, reduz-se à metade do número de amostras do sinal anterior. Na figura 8 observa-se a seqüência de 3 decomposições. Em cada etapa, o sinal é decomposto em uma componente de alta frequência (coeficiente de detalhes) e uma componente de baixa frequência

(coeficiente de aproximação) que será usado no próximo nível de decomposição.

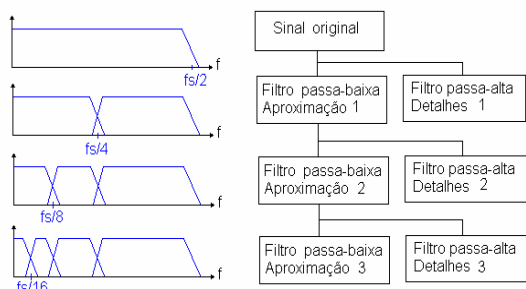


Figura 8: Análise de multi-resolução.

Na figura 9 pode-se observar uma simulação de afundamento de tensão e os coeficientes de detalhes da transformada wavelet. Neste caso, foi usada a wavelet Daubechie 4, utilizada por Santos [8] para a detecção de eventos. O início e o final do evento podem ser detectados pelos picos que aparecem nos coeficientes de detalhes, utilizando apenas um nível de decomposição.

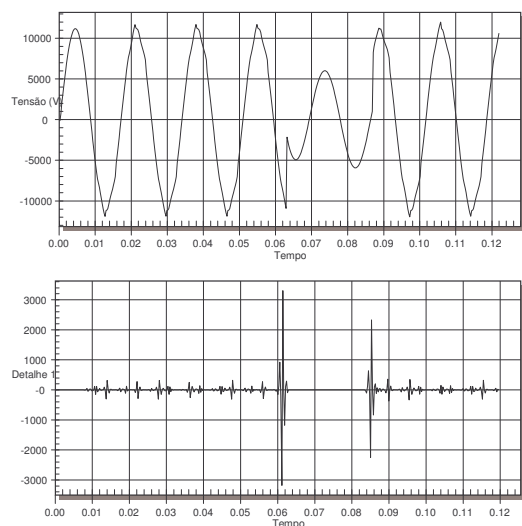


Figura 9: Afundamento de tensão e os coeficientes de detalhes da transformada wavelet.

4 Simulação de eventos

Para testar as várias técnicas de detecção estudadas, foram criados modelos na plataforma Matlab/Simulink capazes de simular VTCDs e transitórios oscilatórios que podem ocorrer em uma rede de distribuição.

Os transitórios oscilatórios foram simulados com a conexão de capacitores à rede. O instante de chaveamento e o valor do capacitor foram os parâmetros que variaram nestas simulações.

Afundamentos de tensão foram simulados com a ocorrência de faltas em diferentes pontos da rede ou com a conexão de cargas de potência elevada. As elevações de tensão foram simuladas com faltas fase-terra, com a elevação ocorrendo nas fases sãs. A desconexão de cargas de alta potência também foi usada para simular elevações. Procurou-se variar o instante de ocorrência da falta, sua duração e o nível de afundamento ou elevação em pu.

Os sinais de tensão das três fases foram amostrados e transferidos do Simulink para a área de trabalho do MatLab a 65 amostras por ciclo, compatível com a maioria dos medidores eletrônicos de faturamento. O cálculo do valor eficaz foi feito com janelas de um ciclo e atualizações a cada meio ciclo.

A figura 10 mostra o modelo de extração dos dados do Simulink para o cálculo da NEI, procurando representar os dados da mesma forma que eles estão disponíveis no medidor. Os sinais de tensão amostrados em cada fase estão disponíveis nas variáveis Va, Vb e Vc. Estes sinais elevados ao quadrado, representados pelas variáveis Va2, Vb2 e Vc2 também estão disponíveis no medidor para cálculo do valor eficaz de cada fase. Resta apenas somá-los e extrair a raiz quadrada para se obter a NEI.

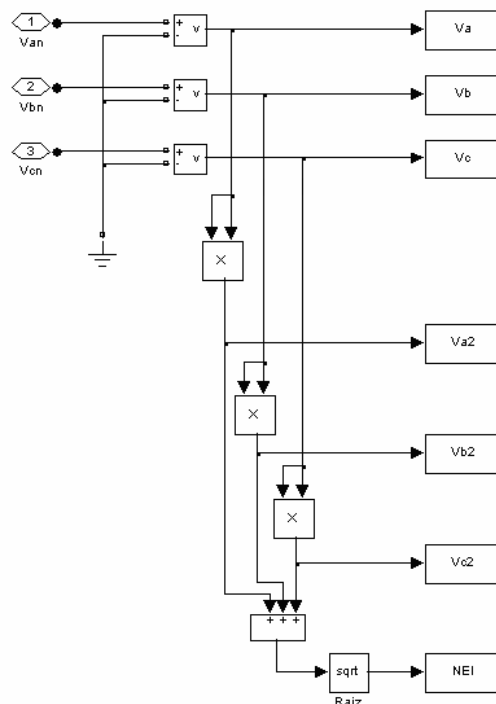


Figura 10: Modelo dos dados do medidor para cálculo da NEI.

Da mesma forma, o modelo do fluxo de dados para a decomposição dos sinais em suas componentes fundamental e residual é mostrado

na figura 11. O filtro rejeita faixa utilizado é do tipo IIR, sintonizado em 60Hz. O tempo de processamento reduzido deste tipo de filtro, quando comparado com filtros FIR, torna seu uso adequado para medidores com pouca capacidade de processamento.

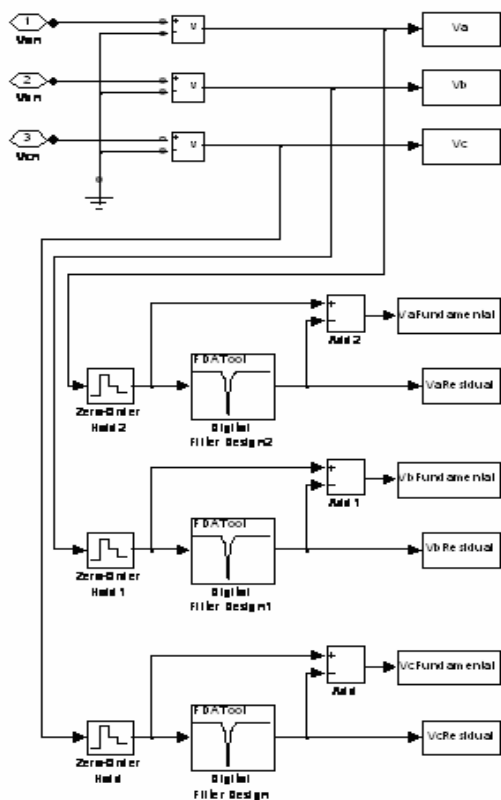


Figura 11: Modelo dos dados do medidor para decomposição do sinal.

Várias famílias de wavelets vêm sendo estudadas na detecção de eventos. As wavelets de Haar, Daubechies Db4 e Db10, e Symlets de sym2 até sym8 foram testadas por Delmont [12] com diversos tipos de sinais e sua conclusão é que wavelets de ordem igual ou superior a quatro apresentam melhores resultados para a detecção e localização no tempo enquanto a wavelet de Haar é adequada para a classificação de distúrbios.

Santoso [8] afirma que o uso das Daubechies Db4, Db6, Db8 e Db10 é adequado para a detecção de vários tipos de eventos, porém, a Db4 apresentou resultados piores na detecção de afundamentos e sobretensões. Neste mesmo estudo, Santoso afirma que eventos abruptos são mais facilmente detectados por wavelets compactas (Db4, Db6) e eventos lentos podem ser melhor analisados com wavelets mais longas (Db8, Db10).

Baseado nestes estudos, as simulações desenvolvidas neste trabalho se limitaram às wavelets de Haar, Daubechies e Symlets.

Foram testadas as wavelets: Haar, Db2, Db3, Db4, DB8 e Sym8. Este conjunto reduzido de wavelets mãe se deve ao tamanho do filtro de decomposição das mesmas. Outras wavelets podem ser usadas, mas filtros maiores aumentam o tempo de processamento. A capacidade de processamento do medidor a ser utilizado deverá ser avaliada para a escolha da wavelet mais adequada.

5 Resultados da detecção de eventos

Os dados gerados com as simulações foram analisados com algoritmos que podem ser implementados em medidores de energia. Foram verificadas a capacidade de detecção dos eventos e o tempo de processamento que cada uma das técnicas estudadas utiliza.

5.1 Detecção de transitórios oscilatórios

Os parâmetros normalmente utilizados para a caracterização deste evento são o valor de pico e a duração, os mesmos termos usados para os afundamentos e elevações de tensão. Foram feitas simulações de transitórios variando o início do evento, sua amplitude e sua duração. As duas técnicas de detecção utilizadas foram a decomposição de sinais e a NEI. O uso da transformada wavelet só foi preciso na detecção do início do transitório, não apresentando resultado satisfatório para determinar a amplitude ou o final do evento.

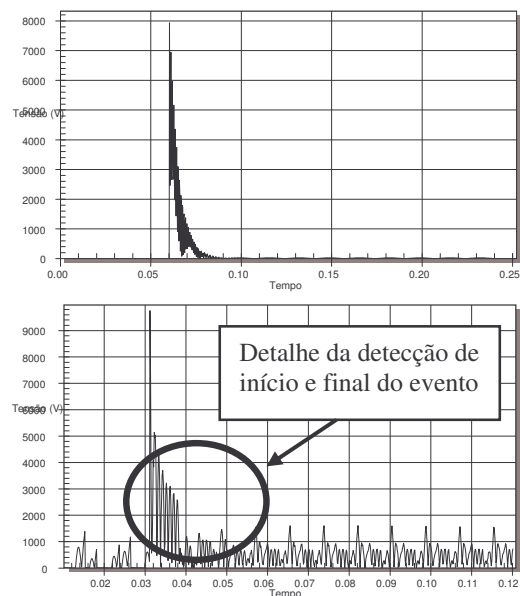


Figura 12: Valor absoluto do sinal residual de transitórios oscilatórios.

Na figura 12 pode-se observar o valor absoluto da componente residual de dois transitórios oscilatórios. O primeiro ocorre em um circuito sem distorção harmônica, o segundo ocorre em um circuito com um nível de distorção harmônica elevado. O início do evento é detectado quando o sinal ultrapassa um limite estabelecido. Da mesma forma, o final do evento ocorre quando o sinal voltar ao nível normal e permanece nesta condição por um tempo mínimo de 16 amostras, equivalente a $\frac{1}{4}$ de ciclo da frequência fundamental.

A figura 13 mostra em detalhe a região do evento destacada na figura 12. Observa-se que o nível que define o final do evento é ultrapassado diversas vezes durante o transitório. Diferente de uma elevação de tensão, quando o sinal permanece o tempo todo fora dos limites normais, em um transitório o sinal ultrapassa este limite várias vezes, permitindo assim diferenciar os dois tipos de evento.

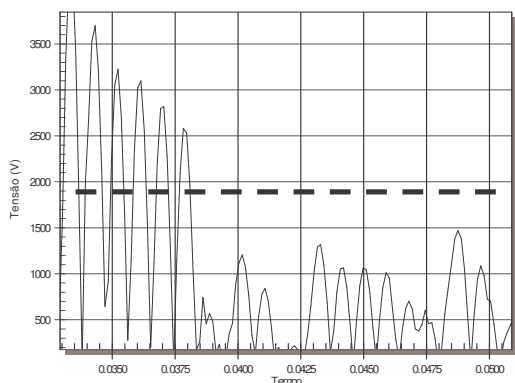


Figura 13: Detalhe do transitório da figura 12.

O uso da NEI para detecção de transitórios é semelhante à decomposição de sinais fundamental e residual. Em um sistema sem harmônicos e equilibrado, o resultado é um nível contínuo. Os transitórios oscilatórios são claramente observados, como visto na figura 14, permitindo a detecção do início e do final do evento. O uso isolado da NEI não permite identificar a fase em que ocorreu o transitório.

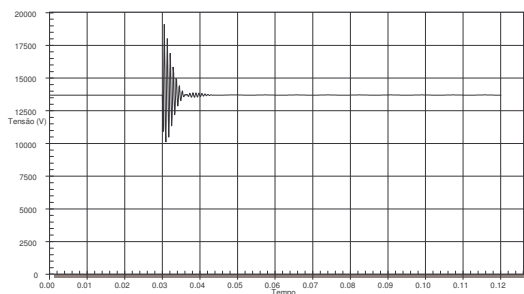


Figura 14: NEI de um transitório oscilatório.

5.2 Detecção de VTCDs

Os afundamentos e elevações de tensão também são caracterizados pela sua amplitude e duração. Foram feitas simulações onde se variou a amplitude, o ângulo de início do evento e sua duração.

Os métodos usados para detectar estes eventos foram o valor eficaz, a NEI e a transformada wavelet.

Na figura 15 é mostrada a simulação de um afundamento de tensão usado para testar as diferentes técnicas de detecção de VTCDs. O afundamento com duração de um ciclo ocorre em apenas uma das fases. Nesta simulação foram incluídas cargas não lineares nas 3 fases

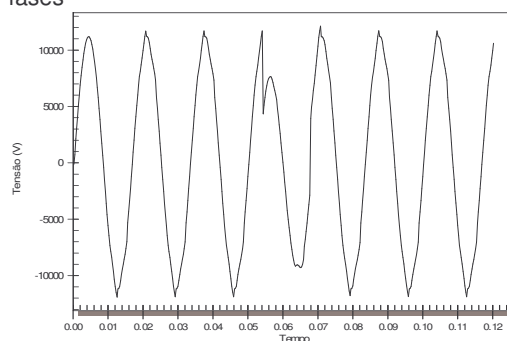


Figura 15: Afundamento de tensão.

Na figura 16 têm-se as duas formas de cálculo do valor eficaz. A forma contínua é atualizada a cada amostra enquanto a forma discreta é atualizada a cada meio ciclo. Pode-se observar que o afundamento tem início próximo ao pico da onda, porém, na forma discreta, ele só será detectado na atualização do cálculo do valor eficaz, neste caso durante a passagem por zero do sinal.

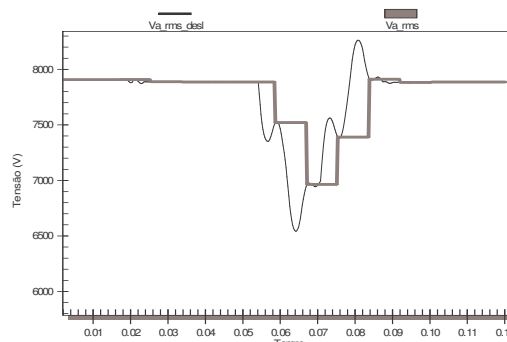


Figura 16: Valores eficazes de um afundamento.

Na figura 17 pode-se observar a NEI aplicada ao sinal de afundamento de tensão mostrado na figura 15. A detecção é feita quando o sinal ultrapassa o limite programado e, diferente do

cálculo de valor eficaz, o início e o final do evento são registrados de forma mais precisa.

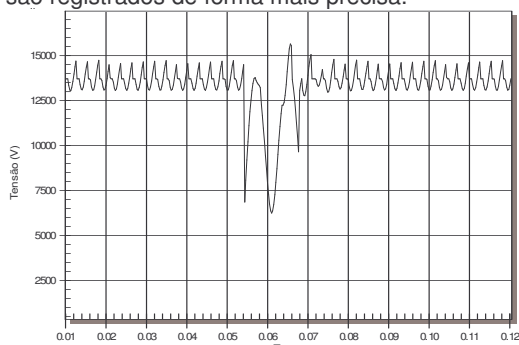


Figura 17: NEI de um afundamento de tensão.

A oscilação que aparece em regime permanente é devido à presença de componentes harmônicos no sinal, introduzidos na simulação com cargas não lineares na rede. O objetivo da introdução desta distorção harmônica foi tornar o sinal mais próximo dos sinais existente na rede de distribuição real. A presença de distorção harmônica, a variação de tensão que ocorre na rede e o desequilíbrio de tensão são fatores que podem mudar o nível de detecção das VTCDs.

Na figura 18 podem ser vistos os coeficientes de detalhes da transformada wavelet, aplicada ao sinal de afundamento de tensão da figura 15.

Apenas o primeiro nível de decomposição foi usado. Neste exemplo foi usada a wavelet Db8 e pode-se observar que a detecção do início e do final do evento é feita com a identificação dos picos dos coeficientes de detalhes.

A distorção harmônica presente na tensão é detectada ao longo de todo sinal, assim como ocorreu com a NEI.

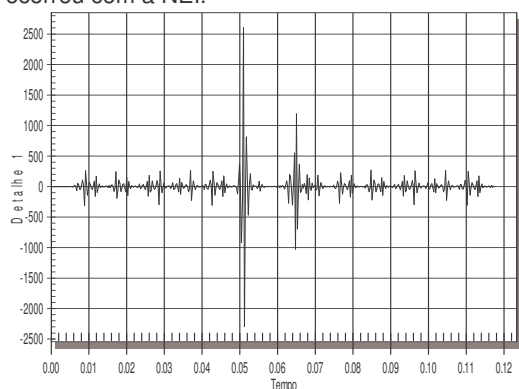


Figura 18: Coeficientes de detalhes da TW.

Para validar os resultados das simulações foram usados dados reais registrados em uma rede de distribuição. A figura 19 mostra um afundamento de tensão registrado por um medidor com taxa de amostragem de 64 amostras por ciclo de 60 Hz

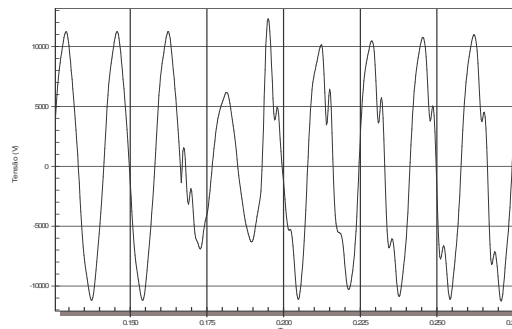


Figura 19: Sinal de tensão com afundamento medido em rede de distribuição.

As figuras 20, 21 e 22 mostram respectivamente o valor eficaz, a NEI e os coeficientes de detalhes da TW do sinal da figura 19. Os métodos propostos para detecção de eventos e testados com sinais simulados puderam detectar os eventos reais

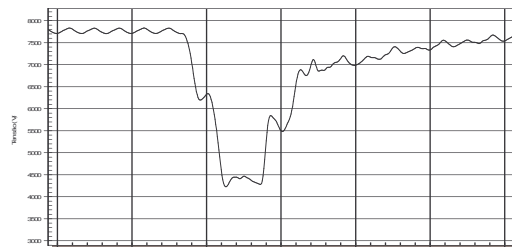


Figura 20: Tensão eficaz do sinal da figura 19.

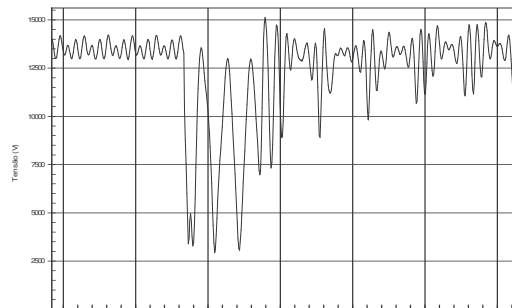


Figura 21: NEI do sinal da figura 19.

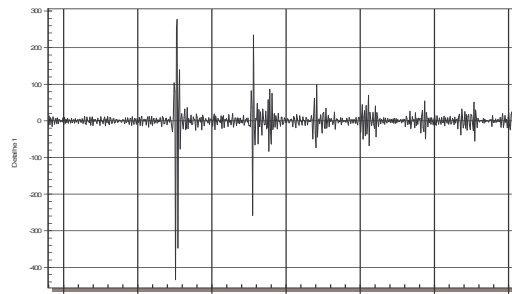


Figura 22: Coeficientes de detalhes da TW do sinal da figura 19.

6 Conclusões

Os métodos propostos para detecção de transitórios oscilatórios e VTCDs foram testados com sinais simulados e foram capazes de detectá-los. Eventos reais medidos em uma rede de distribuição foram usados para validar os resultados obtidos com sinais simulados.

As técnicas testadas podem ser usadas em medidores eletrônicos de faturamento sem a necessidade de alterações nos seus circuitos, bastando a alteração em seu programa operacional. A disponibilidade de memória e o tempo de processamento disponível em cada medidor devem ser avaliados para determinar quais os recursos que poderão ser adicionados.

Medidores com pouca disponibilidade de memória poderão registrar apenas as informações de data, hora de início, duração e intensidade dos eventos. Medidores com maior capacidade de memória poderão registrar a oscilografia do evento. Neste caso, canais de comunicação remota podem ser usados para transferir o resultado desta oscilografia para um sistema de análise de qualidade de energia mais sofisticado.

Considerando que o uso de medidores eletrônicos está se tornando cada vez mais difundido, as concessionárias poderão contar com equipamentos de registro de eventos em toda a sua área de atuação, sem comprometimento de seu orçamento.

7 Referências

- [1] IEEE 1159 (1995) Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality
- [2] Bollen, Math H. J.; Gu, Irene Y. H. (2006) Signal Processing of Power Quality Disturbances. John Wiley & Sons
- [3] Kagan, N. et al. (2000); Influence of RMS variation measurement protocols on electrical system performance indices for voltage sags and swells; Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power; p790 - 795
- [4] IEC 61000-4-30 (2003) Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods.
- [5] Marafão, Fernando P. (2000); Contribuições para a teoria de potências instantâneas e aplicações em qualidade de energia. Dissertação de Mestrado. Unicamp.
- [6] Smith, Steven W. (1997); The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing. Disponível em: www.dspguide.com
- [7] Duarte, Silvio X. (2007). Proposta de indicador de qualidade de tensão a partir do impacto de distorções harmônicas e desequilíbrios sobre motores de indução. Tese de doutorado, Escola Politécnica da USP.
- [8] Santoso, Surya; Grady, W. Mack; Powers, Edward J.; Lamoree, Jeff; Bhatt, Siddharth C. (2000). Characterization of Distribution Power Quality Events with Fourier and Wavelet Transforms. IEEE Transactions on Power Delivery, vol 15, jan. 2000.
- [9] Gaouda, A. M.; Salama, M. M. A.; Sultan, M. R.; Chikhani, A. Y. (1999) Power Quality Detection and Classification Using Wavelet-Multiresolution Signal Decomposition. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 14, out. 1999.
- [10] Kim, C. H.; Aggarwal, R. (2000). Wavelet transforms in power systems: Part 1 General introduction to the wavelet transforms. Power Engineering Journal, abr. 2000.
- [11] Kim, C. H.; Aggarwal, R. (2001). Wavelet transforms in power systems: Part 2 Examples of application to actual power system transients. Power Engineering Journal, ago. 2001.
- [12] Delmont Filho, Odilon (2003). Utilização da transformada wavelet para caracterização de distúrbios na qualidade da energia elétrica. Dissertação de Mestrado. USP São Carlos.
- [13] Garcia, Valdomiro V. (2007) Detección y clasificación automática de perturbaciones que afectan la calidad de la energía eléctrica. Dissertação de Mestrado. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colômbia.