



VI SBQEE

21 a 24 de agosto de 2005

Belém – Pará – Brasil



Código: BEL 13 7807

Tópico: Sistema de Monitoramento e Tratamento de Dados

PRÉ-PROCESSAMENTO DE SINAIS USANDO TRANSFORMADA WAVELET PARA A AUTOMAÇÃO DAS ROTINAS DE PÓS-DESPACHO EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

RAIMUNDO NONATO M.
MACHADO

CEFET - PA

UBIRATAN HOLANDA
BEZERRA

UFPA

IVALDO GONÇALVES
PELAES

UFPA

RESUMO

Este trabalho é uma proposta de utilização dos dados disponível nos centros de operação pós-despacho das concessionárias de energia elétrica, obtidos por meio da monitoração realizada pelos registradores de perturbações, oscilografias gravadas, para obtenção de uma base de dados com a caracterização de eventos de curta duração, usando a transformada wavelet. O objetivo em obter-se esta base de dados é o de possibilitar o uso de procedimentos, de análise e avaliação, que possam fornecer informações sobre o comportamento do sistema elétrico, facilitando assim a tomada de decisões sobre o uso de medidas preventivas ou mitigadoras para melhorar o desempenho e a confiabilidade do sistema elétrico, bem como avaliar os procedimentos de operação.

PALAVRAS-CHAVES

Qualidade de energia, transformada wavelet, variações de tensão de curta duração.

1.0 INTRODUÇÃO

Normalmente os sistemas de geração, transmissão e distribuição de eletricidade estão sujeitos a inesperadas variações, naturais ou provocadas pelo homem. Como resultado, o sistema elétrico irá experimentar certas perturbações de tensão. As mudanças na tensão podem ir desde a completa perda, com duração de segundos, minutos, ou até mesmo horas, à altas magnitudes, impulsos de curta duração,

com valor de 50 ou mais vezes a tensão normal do sistema, não durando mais que uns poucos milésimos de segundo. Algumas dessas perturbações podem ter um efeito indesejável sobre os equipamentos conectados ao sistema de energia, incluindo os dispositivos de proteção [1].

Uma eficiente monitoração do sistema de energia elétrica é essencial para garantir a contínua e segura operação do mesmo. As concessionárias do setor de energia elétrica sejam em nível de geração, transmissão, ou distribuição, mantêm esquemas de monitoramento constante sobre diversos parâmetros do sistema elétrico, os quais são analisados, quanto as suas variações e tendências visando identificar as causas de ocorrências, o que pode levar a medidas mitigadoras, avaliação da atuação dos dispositivos de proteção, o que possibilita otimizar a temporização dos mesmos, e diagnosticar problemas prestes a ocorrer, o que leva a tomada de medidas preventivas.

A análise realizada nos centros de operação pós-despacho é limitada a ocorrências que levam a desligamentos ou causam problemas graves ao sistema, sendo então as oscilografias gravadas para estes eventos analisadas em detalhes. Para que a grande quantidade de dados obtida da monitoração possa ser analisada, faz-se necessário que um método automático para extração das características relevantes dos sinais gravados e classificação dos mesmos seja utilizado. Essa necessidade é destacada em varias publicações as quais apresentam novos métodos de caracterização e de classificação usando ferramentas de processamento digital de

* Centro Federal de Educação Tecnológica do Pará.

Av. Almirante Barroso, 1155, Marco, Belém-PA, BR, CEP: 66093020, Tel: (91) 211-0363

raimundo.machado@cefetpa.br

sinais e de inteligência computacional. A proposta desse trabalho é a de utilizar os dados disponíveis nos centros de controle e operação pós-despacho, para analisar problemas de qualidade de energia devidos a variações de tensão de curta duração, nominalmente afundamentos (“sag”), sobre-tensões (“swell”) e interrupções. O objetivo é obter uma base de dados que possibilite o uso de procedimentos, de análise e avaliação, que possam fornecer informações sobre o comportamento e desempenho do sistema elétrico, facilitando assim a tomada de decisões sobre o uso de medidas preventivas ou mitigadoras para melhorar o desempenho e a confiabilidade do sistema elétrico, bem como avaliar os procedimentos de operação. O método utiliza a transformada wavelet, para quantificar duração e amplitude dos referidos eventos. São apresentados resultados obtidos com sinais simulados bem como algumas das possibilidades de visualização dos dados para análise.

2.0 TRANSFORMADA WAVELET E ANÁLISE MULTIRESOLUÇÃO

Wavelets são usadas para representar sinais, de modo similar ao que a análise de Fourier usa senos e cosenos. A análise de sinais através da transformada wavelet apresenta vantagens sobre a tradicional, usando os métodos de Fourier, quando os sinais analisados apresentam descontinuidades ou transitórios localizados no tempo, sinais não estacionários.

A Transformada Wavelet Contínua (TWC) de um sinal $f(t)$, depende de duas variáveis: escala (ou frequência), designada pelo parâmetro a , e tempo (ou posição), designado pelo parâmetro b , e é dada por:

$$W_f(a,b) = \langle f, \psi_{a,b} \rangle = \int_R f(t) \psi_{a,b}(t) dt \quad (1)$$

onde a função real

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-\frac{1}{2}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2)$$

e os parâmetros a e b variam continuamente sobre \mathbf{R} , o conjunto dos reais (com $a \neq 0$). A função ψ é chamada de wavelet mãe (*mother wavelet*). O parâmetro b dá a posição da wavelet, enquanto o parâmetro a está relacionado com a resolução em frequência. Para

$|a| \ll 1$ a wavelet ψ é uma versão altamente comprimida, com conteúdo de frequência na faixa de altas frequências o que corresponde a detalhes contidos no sinal que ocorrem num tempo relativamente curto. Conseqüentemente, para $|a| \gg 1$, a wavelet ψ é muito expandida, isto é, uma função de baixa frequência, correspondendo a informação global no sinal. Na Transformada Wavelet Discreta (TWD), os parâmetros a e b não variam continuamente, porém, podem somente assumir valores em passos discretos. Isto é obtido modificando-se a representação da wavelet para:

$$\psi_{m,n}(t) = 2^{-\frac{m}{2}} \psi(2^{-m}x - n) \quad (3)$$

ou seja, $a = 2^m$ e $b = n2^m$ na Equação (2).

O efeito da discretização da wavelet leva o espaço tempo-escala a ser representado em intervalos discretos. O parâmetro m está relacionado com a frequência da wavelet, enquanto o parâmetro n indica a posição.

A Análise Multiresolução (AMR), tem por objetivo a representação de um sinal $f(t)$, em termos de uma base ortogonal que são as funções escala e wavelets. Um eficiente algoritmo para produzir esta representação foi desenvolvido por Mallat em 1988 [2]. A estrutura da análise multiresolução é mostrada na Figura 2.

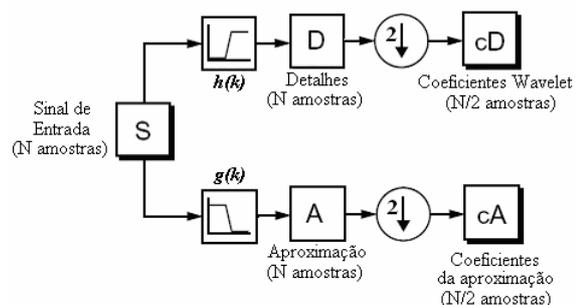


Figura 2.

Estrutura da análise multiresolução.

O sinal original passa através de dois filtros, um passa baixas, $g(k)$, a função escala, e um passa altas, $h(k)$, a wavelet mãe. A saída do filtro passa-baixas representa o conteúdo de baixa frequência do sinal de entrada ou uma aproximação do mesmo. A saída do filtro passa-altas representa o conteúdo de alta frequência do sinal de entrada ou os detalhes, obtendo-se, então, o sinal cD , os coeficientes wavelet que

são a nova representação do sinal (representação do sinal de entrada no domínio wavelet), e o sinal cA , os coeficientes da aproximação que são utilizados para alimentar o próximo estágio da decomposição de maneira iterativa obtendo-se uma decomposição em múltiplos níveis.

3.0 APLICAÇÃO E RESULTADOS

O método proposto usa a decomposição multiresolução do sinal distorcido no domínio do tempo. Qualquer mudança no padrão do sinal pode ser localizada nos altos níveis de resolução. No que diz respeito à detecção e localização, o primeiro nível de decomposição do sinal (D1), é normalmente o mais adequado para detectar e localizar qualquer perturbação. A figura 3 mostra a decomposição, em seis níveis, de um sinal com afundamento de tensão. Em (a) está representado o sinal original. De (b) à (g) os níveis de detalhes de um a seis, e em (h) a última aproximação no nível seis. Para a quantificação da duração do evento de curta duração será utilizado o primeiro nível de decomposição, e algoritmo apresentado em [3].

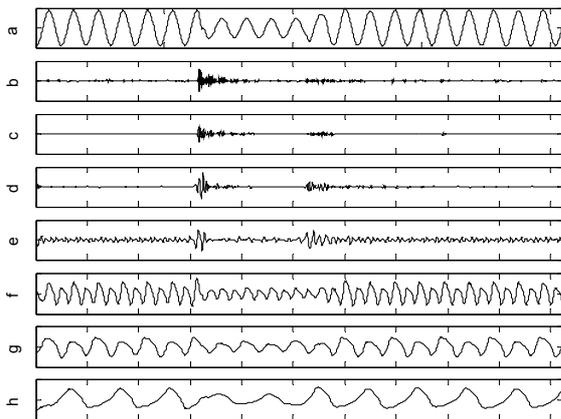


Figura 3.

Decomposição, em seis níveis, de um sinal com afundamento de tensão.

A caracterização dos diferentes eventos de qualidade de energia de curta duração, pelo método proposto, está relacionada com a energia contida no sinal distorcido, e a energia na forma de onda pura considerando-se o mesmo intervalo de tempo para ambos. No caso de fenômenos como *sag* e *swell*, a maior concentração de energia está no nível que contém a componente da frequência fundamental. Esta propriedade será utilizada para caracterizar os fenômenos de interesse [4, 5]. A Figura 4 mostra a variação da norma com os níveis de decomposição para um *sag* (0,5 pu), um *swell* (1,5 pu) e uma onda sem distorção, para um sinal com taxa de amostragem de 256 amostras por ciclo de 60 Hz. A

caracterização de uma interrupção é obtida por um valor de aproximadamente zero para a norma.

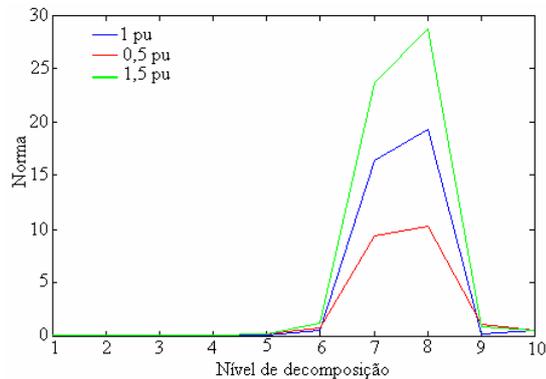


Figura 4.

Variação da norma com os níveis de decomposição para *sag*, *swell* e sinal sem distorção.

A técnica proposta foi aplicada para medir diferentes casos de fenômenos de afundamento e de sobre-tensão em sinais simulados no aplicativo MATLAB usando a wavelet de Daubechies, db4. A Tabela 1 apresenta alguns dos resultados obtidos onde se observa pequenos valores percentuais de erro na tensão medida pelo método proposto em relação a tensão real (obtida da simulação).

Tabela 1.

Valores reais e medidos para diferentes casos de variações de tensão de curta duração.

Caso	Nº de ciclos	Tensão real (pu)	Tensão medida (pu)	% de erro
1	16,7461	0,6068	0,6259	3,15
2	57,3711	1,8000	1,8047	0,26
3	2,5195	0,8214	0,8280	0,80
4	18,4336	1,3648	1,3720	0,53

4.0 SAÍDAS PARA VISUALIZAÇÃO DOS RESULTADOS

Após a caracterização dos eventos, pode-se formar uma base de dados contendo amplitude e duração dos mesmos. As saídas para análise apresentam as diversas formas com que esses dados podem ser tratados para se obter informações sobre o comportamento do sistema, das quais algumas são apresentadas abaixo.

- Análise de curtas interrupções devidas a operações automática de chaveamento podem ser visualizadas por meio de gráficos de barras mostrando a frequência de interrupções em um determinado período de tempo (1 ano por

exemplo), como função da duração das interrupções. A Figura 5 mostra um exemplo baseado em dados simulados para este tipo de saída.

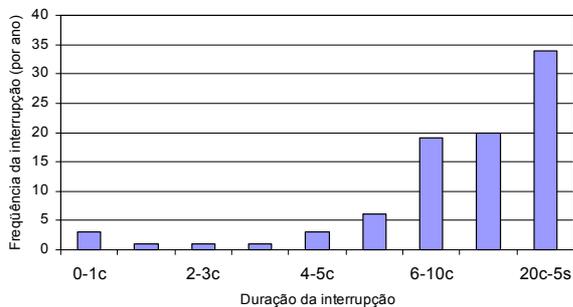


Figura 5.

Frequência de interrupções (número de interrupções por ano) como função da duração da interrupção.

- Visualização dos eventos ocorridos em um certo período de tempo por meio de um diagrama de dispersão ("scatter diagram"), em um plano amplitude-duração. A concentração dos pontos em determinadas regiões do plano fornece rápida visualização da ocorrência dos vários tipos de eventos, o que permite uma rápida avaliação qualitativa do desempenho do sistema elétrico. A Figura 6 mostra um diagrama de dispersão baseado em dados simulados.

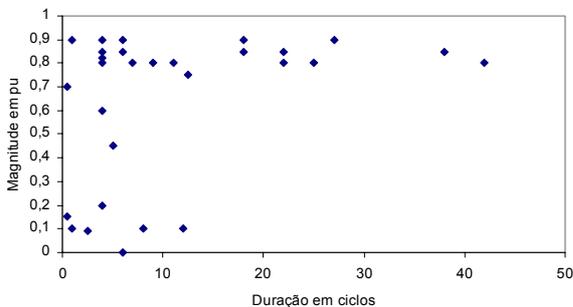


Figura 6.

Diagrama de dispersão baseado em dados simulados.

- Avaliação qualitativa do número de *sags* durante um determinado período de tempo. Isto pode ser obtido por meio de uma tabela, onde cada elemento da tabela fornece o número de eventos com determinada magnitude e intervalo de duração. Esta tabela é chamada de tabela de densidade de *sags* ("sag density table"), ou função densidade de *sags* ("sag density function") [6]. Tipicamente a função densidade de *sag* é apresentada em um gráfico de barras como o da Figura 7, onde a altura de cada barra é proporcional ao

número de *sags* em um correspondente intervalo de amplitude e duração.

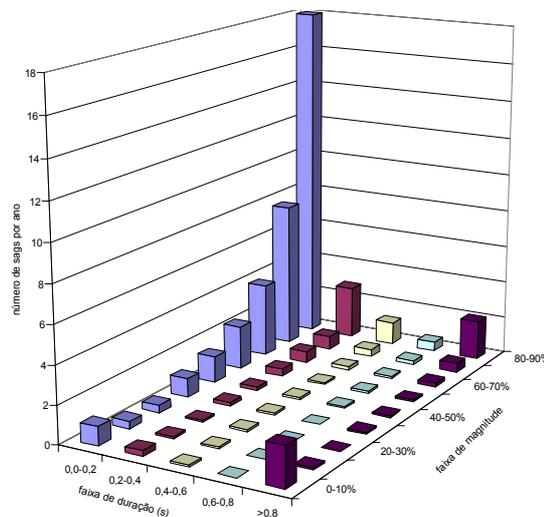


Figura 7.

Gráfico de barras de duas dimensões da função densidade de *sag*.

5.0 CONCLUSÕES

Foi apresentado o uso da transformada wavelet para quantificar variações de tensão de curta duração quanto as suas amplitudes e durações. O método foi aplicado a sinais simulados sendo que resultados satisfatórios foram obtidos. Os dados obtidos nesta etapa de processamento podem ser usados para formar uma base de dados de onde podem ser obtidas diversas saídas possibilitando a análise e avaliação do comportamento do sistema elétrico.

6.0 REFERÊNCIAS

- [1]- IEEE guide on interactions between power system disturbances and surge-protective devices. IEEE Std C62.48-1995 , 14 Dec. 1995.
- [2] Mallat, S.G. - A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, Volume: 11 Issue: 7, July 1989 , Page(s): 674 -693.
- [3] Gaouda, A.M.; Kanoun, S.H.; Salama, M.M.A.; Chikhani, A.Y. - Wavelet-based signal processing for disturbance classification and measurement. Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings-, Volume: 149 Issue: 3, May 2002, Page(s): 310 -318.

- [4] Machado, R.N.M; Bezerra, U.H.; Pelaes, E.G. - Application of Wavelet Transform for Monitoring Short-Duration Voltages Variations in Transmission Systems". V Congresso Latino-Americano de Geração e Transmissão de Energia Elétrica; 16-20, Nov, 2003, São Pedro-SP/Brasil.
- [5] Machado, R.N.M; Bezerra, U.H.; Pelaes, E.G. - Monitoring Voltages Sags Using Wavelet Transform. IX Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica. 23-27, Maio, 2004, Rio de Janeiro-RJ/Brasil.
- [6] Bollen M.H.J. – Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions. IEEE Press Series on Power Engineering, 2000.

