

# Uso da Transformada Wavelet para a Caracterização de Variações de Tensão de Curta Duração a Partir de Dados de Oscilografias em Sistemas Elétricos de Potência.

R.N.M. Machado  
CEFETPA  
[nonatomac@ig.com.br](mailto:nonatomac@ig.com.br)

U.H. Bezerra  
UFPA  
[bira@ufpa.br](mailto:bira@ufpa.br)

E.G. Pelaes  
UFPA  
[pelaes@ufpa.br](mailto:pelaes@ufpa.br)

## Resumo

*Este trabalho apresenta o uso da transformada wavelet para quantificar variações de tensão de curta duração a partir de oscilografias gravadas obtidas dos registradores de perturbações do sistema de análise pós-despacho das concessionárias de energia elétrica, com o objetivo de obter uma base de dados com as características de fenômenos de curta duração, que permita o uso de procedimentos de análise e avaliação, para se obter informações sobre o comportamento e desempenho do sistema elétrico.*

## 1. Introdução

A análise pós-despacho de ocorrências em sistemas de energia elétrica é de fundamental importância para operação segura do sistema, e para manter o padrão de qualidade da energia elétrica fornecida aos consumidores. As concessionárias de energia elétrica utilizam equipamentos para a monitoração e o diagnóstico de defeitos no sistema elétrico e de proteção, os registradores de perturbações (RP), ou oscilógrafos. Esses registradores de perturbações são normalmente instalados nas subestações, comunicando-se então com uma central onde os dados podem ser analisados. De um modo geral, os registradores de perturbações visam monitorar a atuação do sistema de proteção e a detecção de falhas em equipamentos e linhas de transmissão, podendo também gerar registros oscilográficos com duração típica de alguns segundos, caracterizando as variações de curta duração. Os registros oscilográficos normalmente analisados nos centros de operação pós-despacho, são aqueles gerados por ocorrências que normalmente causam a abertura de linhas pelos disjuntores comandados pelos relés de proteção. No entanto, uma grande quantidade de dados armazenados deixa de ser analisada, esses dados, contudo, podem

conter informações importantes sobre o comportamento e o desempenho do sistema.

Uma das dificuldades na utilização das medidas obtidas por registradores de perturbações na avaliação da qualidade da energia, como obtidas por um monitor de qualidade de energia, é que muitas das etapas do processamento dos sinais obtidos não são realizadas de forma automática pelos primeiros [1]. Para que as medidas oscilográficas possam ser úteis como indicadores de qualidade de energia, necessário se faz que certos parâmetros sejam obtidos para que as mesmas sejam classificadas quanto ao tipo de fenômeno ocorrido. No caso de variações de curta duração, magnitude e duração são os parâmetros de interesse. A obtenção desses parâmetros possibilita a aplicação de ferramentas estatísticas tal como apresentado em [2], para a análise e visualização dos resultados. Outra dificuldade, talvez a mais crítica, é o grande volume de dados obtidos da monitoração, oscilografias, e que não fornecem diretamente os parâmetros de interesse para a análise da qualidade de energia. Então procedimentos automáticos para a obtenção desses parâmetros tornam-se necessários.

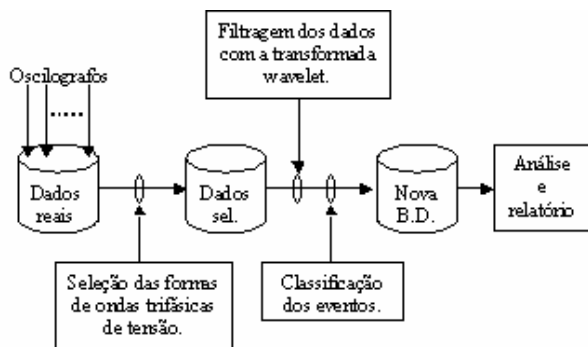
A proposta desse trabalho é a de utilizar os dados disponíveis nos centros de controle e operação pós-despacho, para analisar problemas de qualidade de energia devidos a variações de tensão de curta duração, afundamentos (“sag”), sobre-tensões (“swell”) e interrupções. O objetivo é obter uma base de dados com as características de fenômenos de curta duração, à qual permita o uso de procedimentos, de análise e avaliação, que possam fornecer informações sobre o comportamento e desempenho do sistema elétrico. Essas informações podem ser úteis na identificação de faltas, de tendências na evolução de parâmetros que possam levar o sistema a um estado crítico, avaliação da sensibilidade de equipamentos quanto as variações no sistema, identificação de pontos críticos possibilitando a tomada de medidas preventivas ou

mitigadoras, avaliação da propagação de faltas através do sistema, entre outras.

O método proposto baseia-se no uso da transformada wavelet e técnicas de inteligência computacional. Uma das implementações para classificação de problemas de qualidade de energia é composta por uma seqüência dos seguintes estágios: extração da característica, seleção da característica e classificação. Propostas recentes de classificação de problemas de qualidade de energia têm usado a transformada wavelet como ferramenta para a extração das características do sinal, essas características são usadas como entrada para sistemas de reconhecimento de padrões e de classificação baseados em inteligência computacional [8, 9, 10,12].

## 2. Procedimento proposto

A figura 1 mostra esquematicamente o procedimento proposto a ser usado para obtenção da base de dados a partir de oscilografias armazenadas nos centros de controle e operação pós-despacho das concessionárias de energia elétrica.



**Figura 1. Diagrama esquemático do procedimento proposto.**

Os dados reais contêm os sinais trifásicos de tensões e correntes, bem como sinais digitais indicando o estados dos reles e dispositivos de proteção, gravados pelos diversos registradores de perturbações localizados nas subestações dentro do sistema elétrico. Desses dados são selecionadas as tensões das fases a, b e c, às quais é aplicada uma filtragem usando a transformada wavelet para a extração dos parâmetros que caracterizem o evento, no caso, amplitude e duração para cada fase, que serão enviados a um sistema de classificação para caracterização do evento, bem como qual a fase a ser considerada, adotando-se aqui o pior caso. Essa base de dados irá conter a amplitude e duração dos eventos de curta duração. As saídas para análise apresentam as diversas formas com

que esses novos dados podem ser tratados para obter-se informações sobre o comportamento do sistema elétrico. Até o presente, têm-se apenas resultados relativos ao estágio de filtragem, os quais são apresentados neste trabalho, os estágios posteriores estão em fase de implementação.

O método proposto se baseia no uso da transformada wavelet para obter-se duração e magnitude das variações de curta duração a partir de oscilografias gravadas, usando-se o aplicativo Matlab, e a wavelet de Daubechies, db4.

### 2.1 Transformada wavelet e análise multiresolução

Wavelets são usadas para representar sinais, de modo similar ao que a análise de Fourier usa senos e cossenos. 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 freqüência), 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

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

e os parâmetros  $a$  e  $b$  variam continuamente sobre  $\mathbf{R}$ , o conjunto dos reais (com  $a \neq 0$ ). A função  $\psi$  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 freqüência. Para  $|a| \ll 1$  a wavelet  $\psi$  é uma versão altamente comprimida, com conteúdo de freqüência na faixa de altas freqüências o que corresponde a detalhes contidos no sinal que ocorrem num tempo relativamente curto. Conseqüentemente, para  $|a| \gg 1$ , a wavelet  $\psi$  é muito expandida, isto é, uma função de baixa freqüência, 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. A escolha dos parâmetros  $a$  e  $b$  proporcionais a potências de 2, significa que as amostragens dos eixos de freqüência e tempo correspondem a uma amostragem diádica. O parâmetro  $m$  está relacionado com a freqüência 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 [94]. A estrutura da análise multiresolução é mostrada na figura 2.

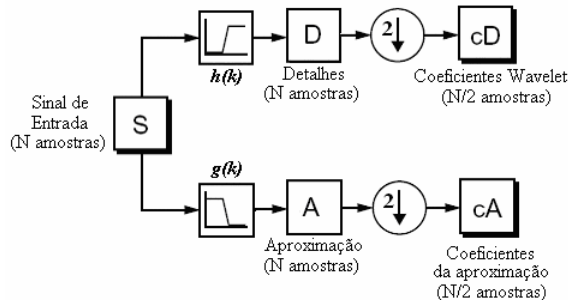


Figura 2. Estrutura da análise multiresolução.

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 freqüência do sinal de entrada ou uma aproximação do mesmo. A saída do filtro passa altas representa o conteúdo de alta freqüência 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. Aplicação e resultados

O método usa a decomposição multiresolução do sinal, que consiste na decomposição do sinal distorcido no domínio do tempo, em diferentes níveis de resolução no domínio wavelet. 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 no sinal. 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 [8].

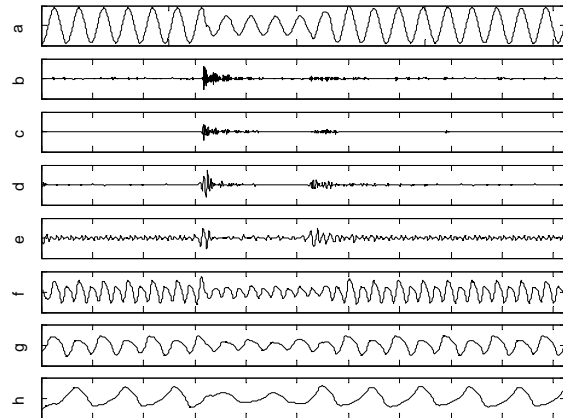
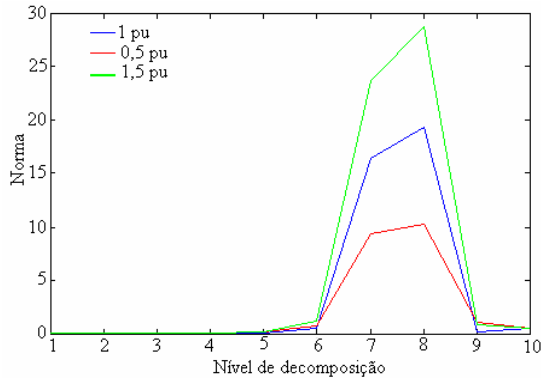


Figura 3. Decomposição, em seis níveis, de um sinal com afundamento de tensão.

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 freqüência fundamental. Esta propriedade será utilizada para caracterizar os fenômenos de interesse [9]. 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.**

O método foi aplicado a 15 sinais trifásicos de tensão obtidos de oscilografias gravadas em uma barra

**Tabela 1. Amplitude e duração dos eventos de curta duração para os sinais analisados.**

Fase	Sinal 1		Sinal 2		Sinal 3	
	Ampl. (pu)	Nº ciclos	Ampl. (pu)	Nº ciclos	Ampl. (pu)	Nº ciclos
A	0,9764	29,6771	0,9506	29,6667	0,9239	5,1875
B	0,9556	29,6771	0,9516	29,6563	0,9068	5,1875
C	0,9930	29,6771	0,9895	29,6563	0,6090	5,0104
Fase	Sinal 4		Sinal 5		Sinal 6	
	Ampl. (pu)	Nº ciclos	Ampl. (pu)	Nº ciclos	Ampl. (pu)	Nº ciclos
A	0,9543	23,3958	0,9642	29,5521	0,9297	1,6250
B	0,9543	23,3958	0,9534	12,1667	0,9846	4,9063
C	0,9636	23,3958	0,9974	2,5104	1,0830	3,0938
Fase	Sinal 7		Sinal 8		Sinal 9	
	Ampl. (pu)	Nº ciclos	Ampl. (pu)	Nº ciclos	Ampl. (pu)	Nº ciclos
A	0,9676	18,5521	0,9778	9,0938	0,3056	4,8125
B	0,9548	20,2500	0,9659	1,2188	0,8715	4,7813
C	0,9234	1,0833	1,0158	2,7813	0,8762	4,8750
Fase	Sinal 10		Sinal 11		Sinal 12	
	Ampl. (pu)	Nº ciclos	Ampl. (pu)	Nº ciclos	Ampl. (pu)	Nº ciclos
A	0,9069	2,6771	0,9558	29,6667	0,9639	29,6667
B	0,9528	11,0833	0,9503	29,6667	0,9597	29,6667
C	0,9851	14,5208	0,9738	29,6667	0,9856	29,6667
Fase	Sinal 13		Sinal 14		Sinal 15	
	Ampl. (pu)	Nº ciclos	Ampl. (pu)	Nº ciclos	Ampl. (pu)	Nº ciclos
A	0,8433	3,5208	0,9496	29,6667	0,9571	29,6563
B	0,4989	3,5104	0,9437	29,6563	0,9538	29,6563
C	0,8486	4,3438	0,9820	29,6563	0,9620	29,6667

de 230 kV do sistema de transmissão da Eletronorte, num total de 45 sinais a serem analisados. Os resultados obtidos são apresentados na tabela 1.

Os sinais que apresentaram problemas de qualidade de energia, 3, 9 e 13, estão destacados na tabela 1 bem como a respectiva fase que apresenta o pior caso. Os doze sinais restantes não apresentam variações em suas característica, amplitudes todas próximas a 1 pu, e a detecção dos mesmos pelo método proposto é devida a variações espúrias, ruídos presentes nos dados, ou transitórios de alta frequência, não durando mais do que meio ciclo, portanto não sendo caracterizados como variações de curta duração de acordo com a recomendação IEEE Std 1159-1995 [10]. A posterior aplicação dos dados da tabela 1 a um sistema de identificação e classificação baseado em inteligência computacional pode selecionar apenas os sinais de interesse.

## 4. Conclusão

Foi apresentado o uso da transformada wavelet para quantificar variações de tensão de curta duração quanto as suas amplitudes e duração. O método foi aplicado à sinais reais obtidos de oscilografias gravadas por registradores de perturbação sendo que resultados satisfatórios foram obtidos. Posteriormente, os dados obtidos nesta etapa de processamento podem ser aplicados a um sistema de identificação e classificação, baseado em inteligência computacional, para formação de uma base de dados onde se possam aplicar procedimentos de análise e avaliação.

## 5. Referências

- [1] Uliana, P.B., Bronzeado, H. S. – Monitoração da Qualidade da Energia Elétrica em Sistemas de Potência: Discussão de Filosofias. XVI SNPTEE, GRUPO V, 21a 26/10/2001, Campinas - São Paulo – Brasil.
- [2] Bollen M.H.J. – Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions. IEEE Press Series on Power Engineering, 2000.
- [3] Angrisani, L.; Daponte, P.; D'Apuzzo, M. - A method based on wavelet networks for the detection and classification of transients. Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1998. IMTC/98. Conference Proceedings. IEEE , Volume: 2 , 18-21 May 1998, Page(s): 903-908.
- [4] Santoso, S.; Powers, E.J.; Grady, W.M.; Parsons, A.C. - Power quality disturbance waveform recognition using wavelet-based neural classifier. I. Theoretical foundation. Power Delivery, IEEE Transactions on, Volume: 15 Issue: 1, Jan. 2000, Page(s): 222-228.
- [5] Santoso, S.; Powers, E.J.; Grady, W.M.; Parsons, A.C. - Power quality disturbance waveform recognition using wavelet-based neural classifier. II. Application. Power Delivery, IEEE Transactions on, Volume: 15, Issue: 1, Jan. 2000 Pages:229 – 235.
- [6] Huang, J.S.; Negnevitsky, M.; Nguyen, D.T. - A neural-fuzzy classifier for recognition of power quality disturbances. Power Delivery, IEEE, Transactions on, Volume: 17 Issue: 2 , April 2002, Page(s): 609-616.
- [7] 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.
- [8] 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.

[9] 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.

[10] IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric power Quality. IEEE Std 1159-1995.