

INSTRUÇÕES DE USO:

--:: MS Windows ::--

- 1) Insira o CD no drive
- 2) Caso o programa não inicie automaticamente dê um duplo-clique no arquivo cba2002_win.exe localizado na raiz do CD. Exemplo: D:\cba2002_win.exe

--:: Linux ::--

- 1) Insira e monte o CD. Exemplo: mount /mnt/cdrom
- 2) Entre no diretório montado. Exemplo: cd /mnt/cdrom
- 3) Execute o programa assim: ./cba2002_lin.sh

--:: Outros Sistemas ::--

- 1) Abra em qualquer navegador Web o arquivo index.html que se encontra na raiz do CD.





UM ESTUDO DAS FAMÍLIAS WAVELETS APLICADAS À QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

ELCIO F. DE ARRUDA, ODILON D. FILHO, DENIS V. COURY, ADRIANO A. F. M. CARNEIRO

Depto. De Engenharia Elétrica, Escola de Eng. de São Carlos, Universidade de São Paulo.

P.O.Box 359, CEP 13566-590, São Carlos, SP, Brasil, +55-16-273 9366

E-mails: {franklin, delmont, coudy, adriano}@sel.eesc.sc.usp.br

Resumo— Este trabalho apresenta um estudo de famílias de bases *Wavelets* ortogonais aplicadas à Qualidade da Energia Elétrica. Variações nas formas de ondas dos sinais de tensão e corrente como *sag*, *swell*, distorções harmônicas e ruídos, tem se tomado frequentes nos atuais sistemas elétricos, atraindo a atenção para a qualidade da energia elétrica fornecida pelas concessionárias. A análise de tais fenômenos, que normalmente é descrita no domínio do tempo (resolução de equação diferencial) ou no domínio da frequência (através da Transformada de *Fourier*), pode agora ser analisada simultaneamente em ambos os domínios do tempo e da frequência, dispondo-se da Transformada *Wavelet*. Neste contexto, é apresentada uma avaliação de tais fenômenos através da Análise de Resoluções Múltiplas, com base nas diversas *Wavelets* ortogonais. Dos estudos efetuados, conclui-se pelo emprego de algumas funções bases como mais adequadas para análise dos fenômenos acima referenciados.

Abstract— This paper presents a study for orthogonal bases of wavelets families applied to Power Quality. Variations in voltage and current waveforms as *sag*, *swell*, harmonic distortions and noise have become frequent in the electric systems, attracting the attention for the power quality supplied. The analysis of such phenomena that is usually described in the time domain (differential equation resolution) or in the frequency domain (Fourier Transform), now can be analyzed simultaneously in both domains; time and frequency, by the Wavelet Transform. In this context, an evaluation of such phenomena by Multiresolution Analysis, based on several orthogonal wavelets, is presented. This study shows which base functions are more appropriate for the analysis of the phenomena above mentioned.

Keywords— Wavelet Transform, Power Quality, Orthogonal Wavelet Family, Multiresolution Analysis.

1 Introdução:

As situações transitórias em sistemas de potência são comuns e, na prática, podem ser ocasionadas por descargas atmosféricas, correntes de magnetização de transformadores, faltas sustentadas, correntes de partida de grandes motores, ou ainda pelos efeitos de chaveamentos de capacitores em linhas de transmissão.

Estes distúrbios que ocorrem nos sistemas, podem provocar inúmeras interferências indesejáveis como acionamento indevido de relés, mau funcionamento de equipamentos sensíveis, distorções em equipamentos de medição, podendo chegar até a interromper o fornecimento de energia. Tudo isto acaba tendo um efeito econômico não desprezível acarretando prejuízos tanto às concessionárias como aos consumidores. Atualmente, com a proliferação de equipamentos sofisticados, exige-se cada vez mais uma melhor qualidade no sinal entregue pela concessionária.

A análise e o entendimento destes transitórios associados às condições anormais têm sempre auxiliado na explicação e retificação dos mesmos. Sendo assim, a identificação em tempo real de tais transitórios, com um processamento rápido e preciso dos sinais medidos de tensão e corrente, aplicações de controle *on-line* em transmissão e distribuição e o armazenamento/compressão de dados são interesses particulares de muitos engenheiros da área de sistema de potência.

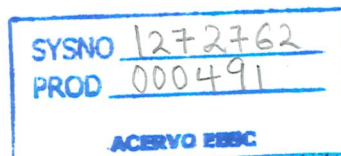
Uma etapa importante desta questão é definir o que seria então um problema de QE. Entre muitos apontamentos da literatura (Dugan et al., 1996), pode-se classificar o assunto como qualquer

problema manifestado na tensão, corrente ou desvio de frequência, que resulte em falha ou má operação dos equipamentos de consumidores.

Atualmente, a QE é avaliada pela concessionária e órgãos governamentais através de equipamentos que medem índices específicos, como DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora), cujas definições se encontram na Resolução Nº 24 da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL (ANEEL, 2000). No entanto, estes índices estão relacionados somente com o intervalo de tempo em que o sistema permanece desligado e a frequência de tais desligamentos. Sendo assim, estes não detectam certas alterações nas formas de onda e na frequência que são, na maioria das vezes, causadas por ruídos, distorções harmônicas, certas condições de falta e chaveamento de capacitores que podem causar problemas operacionais em equipamentos.

Cabe ressaltar, que todos os fenômenos relacionados à QE devem ser detectados, localizados e classificados. Ferramentas como a Transformada de Fourier (TF), Redes Neurais Artificiais (RNA) e Transformada *Wavelet* (TW) tem sido usadas para análise de distúrbios em Sistemas Elétricos de Potência (SEP) ligados à QE (Aggarwal e Kim, 2000; Huang et al., 1998).

Dentre estas, a TW se destaca por sua aplicabilidade sendo uma técnica matemática similar a TF. A TW decompõe um dado sinal em diferentes níveis de frequência, preservando ainda as informações pertinentes ao domínio do tempo, fornecendo assim informações nos dois domínios, simultaneamente. Desta forma, é possível localizar



distúrbios no domínio do tempo e dizer qual o seu nível de frequência (Daubechies, 1992).

Para se obter informações aceitáveis no estudo de fenômenos ligados à QE, é necessário que as funções bases utilizadas na TW forneçam resoluções capazes de diferenciar variações nos domínios considerados (tempo e frequência), indicando ou não a presença de distúrbios.

Desta forma, o artigo apresenta um estudo com análise de comportamento de diversas famílias de bases *Wavelets* ortogonais, aplicadas à QE, com o objetivo de identificar quais destas bases melhor se adequam ao estudo em questão.

2 A Transformada Wavelet

A análise de dados de acordo com escalas variáveis no domínio do tempo e da frequência é a idéia básica da utilização da teoria *Wavelet*. O termo "*Wavelet*" foi originariamente introduzido por J. Morlet, tendo a base matemática de suas idéias sido formalizada pelo físico teórico Alex Grossmann (Daubechies, 1996).

A Transformada *Wavelet* (TW) é uma ferramenta matemática para análise de sinais similar à Transformada de Fourier (TF). A TW decompõe o sinal em diferentes escalas, com diferentes níveis de resolução, a partir de uma única função. Diferentemente da TF que fornece uma representação global do sinal, a TW apresenta representações locais no domínio do tempo e da frequência de um dado sinal (Santoso et al., 1996).

Seja $f(t)$ uma função definida no espaço $L^2(\mathbb{R})$. Tal sinal satisfaz

$$\int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt < \infty.$$

A Transformada *Wavelet* Contínua (TWC) de f é dada pela equação:

$$(TWC)(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\psi_{a,b}(t)} dt \quad (1)$$

Nesta equação, os parâmetros a e b variam continuamente em \mathbb{R} , sendo as funções $\psi_{a,b}$ denominadas *Wavelets* e definidas de acordo com a Eq. (2):

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

Analisando a Eq. (1) pode-se perceber que a Transformada *Wavelet* depende de dois parâmetros, a e b , que correspondem, respectivamente, às informações da escala, ou dilatação, e translação, ou tempo. Tal equação decompõe f em uma superposição de *Wavelets* $\psi_{a,b}$, sendo os coeficientes nesta superposição obtidos pela transformada *Wavelet* de f . É possível reconstruir f representando-a como uma soma de coeficientes da TW, da forma apresentada na Eq. (3) indicada a seguir (Daubechies, 1992):

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \iint \langle f, \psi_{a,b}(t) \rangle \psi_{a,b}(t) \frac{da db}{a^2}. \quad (3)$$

2.2 A Transformada "Wavelet" Discreta

Na Transformada *Wavelet* Discreta (TWD) o parâmetro de dilatação a e o de translação b , utilizados na Eq. (1), assumem somente valores discretos.

Sendo assim a TWD pode ser escrita da seguinte forma:

$$(TWD)(m, n) := \left| a_0^m \right|^{\frac{-1}{2}} \sum_n f(n) \psi\left(\frac{x - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right). \quad (4)$$

onde ψ é a *Wavelet* mãe e os parâmetros a e b tornam-se funções dos parâmetros inteiros m e n , isto é, $a = a_0^m$ e $b = nb_0 a_0^m$, fato que pode ser observado comparando as Eq. (1) e (4) (Kim e Aggarwal, 2000).

2.4 Análise de Resoluções Múltiplas

A técnica de Análise de Resoluções Múltiplas (ARM) decompõe um dado sinal em diferentes níveis de resolução, de modo a fornecer informações importantes no domínio do tempo e da frequência.

O sinal a ser analisado é decomposto em dois outros sinais, uma versão detalhada e outra atenuada, através de filtros passa alta (h_1) e passa baixa (h_0) que são representados matematicamente por funções *Wavelets* e funções escala, respectivamente.

Como o sinal atenuado – proveniente do filtro passa baixa – é novamente decomposto, resultando em dois novos sinais detalhados e atenuados em níveis de frequência diferentes, estes fornecem informações diretas, relativas ao sinal original, no domínio da frequência e do tempo (Gomes e Velho, 1998).

As Fig.1 e Fig.2 ilustram a técnica descrita, sendo a Fig. 1 a representação do processo de filtragem acompanhado também de um operador *downsampling* o qual reduz a quantidade de informações a ser processada. A Fig. 2 ilustra a decomposição de um sinal. A Fig.2a representa a versão aproximada do sinal (A3) sendo que os detalhes da decomposição do mesmo (D1, D2 e D3) são apresentados nas Fig. 2b, c e d respectivamente.

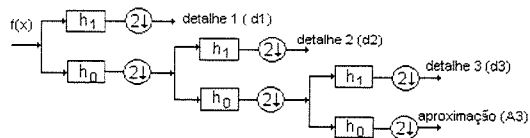


Figura 1. Processo de decomposição de um sinal através de filtragem.

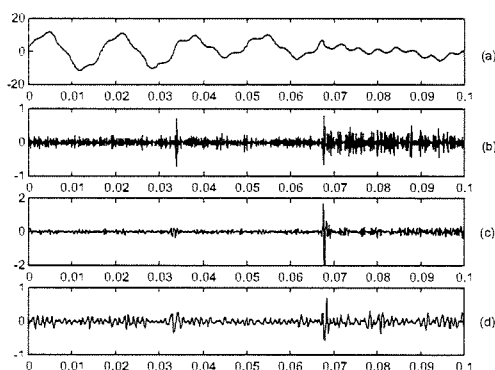


Figura 2. Representação de um sinal sob ARM. Aproximação A3 (a), detalhe 1 (b), detalhe 2 (c) e detalhe 3 (d).

3 Aplicação das famílias *Wavelets* ortogonais na Qualidade da Energia Elétrica

Após diversos testes realizados com várias funções bases *Wavelets* para a análise da qualidade da energia elétrica, foram obtidos resultados que indicam algumas funções base como mais adequadas em certas análises. Geralmente, *Wavelets* mais suaves indicam melhor resolução em frequência que *Wavelets* que possuem variações bruscas como a *Wavelet* de Haar, Fig.3a; o oposto é aplicado para resolução no domínio do tempo. As funções: Haar, Daubechies (dbN , $N = 2, 3, \dots, 8$), Symlets ($symM$, $M = 1, 2, \dots, 8$) e Coiflets ($coifP$, $P = 1, 2, \dots, 5$), formam o grupo de vinte e uma bases ortogonais submetidas, neste artigo, a testes com o objetivo de detectar e localizar distúrbios relacionados com a QE. Note-se que N , M e P representam a ordem de tais funções, sendo algumas destas exemplificadas na Fig. 3.

A técnica de ARM foi utilizada para análise dos fenômenos *sag*, *swell*, distorções harmônicas e ruídos, com a utilização das vinte e uma bases ortogonais mencionadas acima, tendo sido utilizadas todas as bases na análise de cada distúrbio mencionado.

A escolha de uma base para a análise dos distúrbios em estudo considerará sua capacidade de distinção entre os níveis de frequência do sinal original e dos distúrbios. Uma base que se molde em tal premissa pode ser utilizada, também, para a classificação de distúrbios através de diferentes técnicas, sendo uma delas ilustrada no trabalho de (Santoso et al, 1996).

A seguir são apresentados os distúrbios analisados, tendo sido amostrados a uma taxa de 9,6 kHz, bem como resultados da utilização de apenas algumas das funções bases utilizadas para análise.

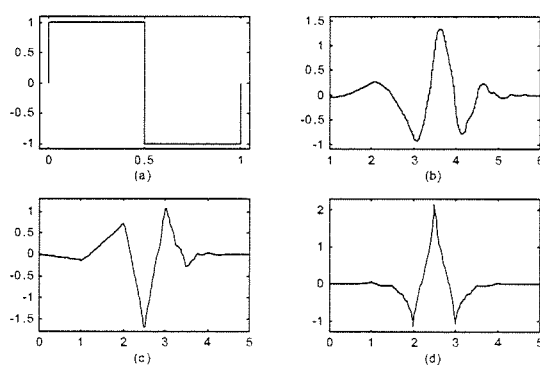


Figura 3. Funções da base *Wavelets*: Haar (a), db 4 (b), sym 3 (c) e coif 1 (d).

3.1 *Sag*

Dependendo da localização da falta e das condições do sistema, a falta pode causar um decréscimo temporário de 10-90% da tensão do sistema (efeito referenciado como *sag*) com duração entre meio ciclo e 1 min. O mesmo pode ser causado por uma corrente de falta, por chaveamento de cargas pesadas ou pela partida de grandes motores. Quedas de tensão com períodos inferiores a 10 ms e abaixo de 10% não são levadas em consideração. Isto se explica pelo fato de os distúrbios com período de duração abaixo de 10 ms serem considerados como transitórios e quedas de tensão menores que 10% serem toleradas pela maioria dos equipamentos elétricos (Dugan, 1996). A Fig. 4 ilustra um *sag* típico que pode ter como provável causa uma falta fase-terra.

Dentre as vinte e uma bases utilizadas, são ilustrados nas Fig.5 e Fig.6 os resultados obtidos com as bases de Haar e db4. A função base Haar, assim como as bases *sym1* e *coif1*, não se adequam a este tipo de análise, uma vez que tal aplicação exige melhor resolução em frequência. Por outro lado, a db4, que possui comportamento mais suave, oferece respostas de decomposição em Resoluções Múltiplas que indicam claramente a localização do distúrbio, bem como a detecção do mesmo. Salienta-se que as bases ' dbN ' ($N = 5, 6, 7$ e 8), ' $symM$ ' ($M = 4, 5, \dots, 8$) e ' $coifP$ ' ($P = 3, 4$ e 5) se enquadram ao mesmo perfil de análise para o distúrbio *sag* obtido com a db4. Já as bases db2 e 3, *sym2* e 3 e *coif2* apresentam resultados que podem indicar erros em um processo de detecção de distúrbios, apontando a presença de frequências inexistentes no sinal original.

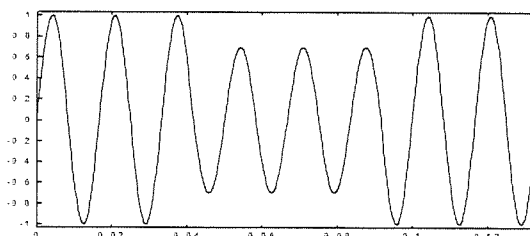


Figura 4. Distúrbio *Sag* típico de 30%.

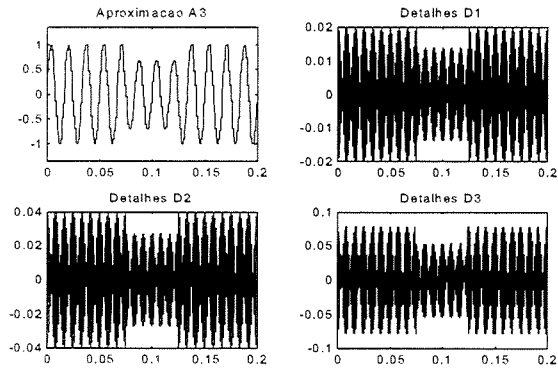


Figura 5. Decomposição de um sag de 30% em ARM utilizando a função base de Haar

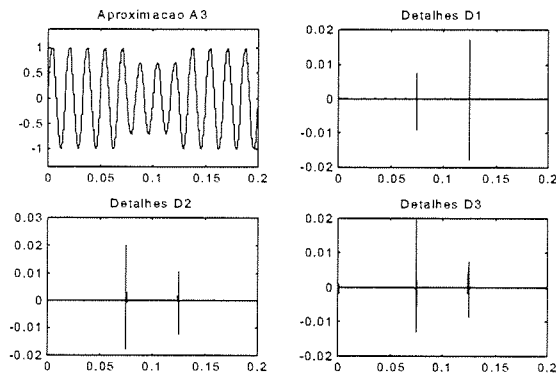


Figura 6. Decomposição de um sag de 30% em ARM utilizando a função base db4.

3.2 Swell

Outro distúrbio pode ser caracterizado por um aumento da tensão do sistema (*swell* - aumento entre 10-80% no valor eficaz da tensão com duração entre meio ciclo a 1 minuto) e freqüentemente ocorre nas fases sãs de um circuito trifásico, quando ocorre um curto circuito em uma única fase (Dugan, 1996).

A Fig.7 ilustra um *swell* típico encontrado no sistema elétrico. Um aumento de 30% no valor de pico da tensão por um período de aproximadamente 3 ciclos pode ser observado.

Na Fig.8 são ilustrados resultados da utilização da base sym2 que indicam (da mesma forma que as bases db2 e 3, sym3 e coif2) a presença não só do distúrbio *swell* (detalhes D1), mas também componentes de freqüências típicas de distorções harmônicas (detalhes D2 e D3), que são inexistentes no sinal estudado. Já as bases Symlets de ordem superior a três (symM, $M = 4, \dots, 7$), da mesma forma que as bases dbN ($N = 4, \dots, 8$) e coifP ($P = 3, 4$ e 5), são capazes de detectar e localizar corretamente distúrbios existentes.

A Fig.9 mostra os resultados obtidos através de ARM, para o mesmo distúrbio *swell* da Fig. 7, utilizando a base db3.

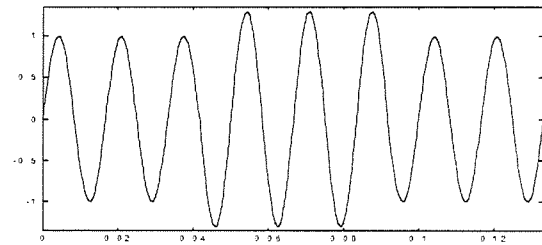


Figura 7. Distúrbio *swell* típico de 30%.

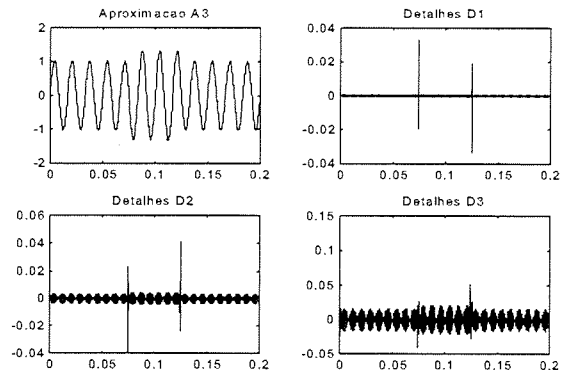


Figura 8. Decomposição de um *swell* de 30% em ARM utilizando a função base sym2.

3.3 Distorções Harmônicas

Ainda com respeito à QE, podemos citar as distorções harmônicas que consistem basicamente de qualquer distorção não desejável do sinal sobre o sistema. Neste caso, os sinais de tensões e ou correntes senoidais apresentam freqüências que são múltiplos inteiros da freqüência na qual o sistema é projetado para operar (usualmente 50 ou 60 Hz). As distorções harmônicas são originárias de características não lineares de dispositivos e cargas sobre o sistema de energia (Dugan, 1996). A Fig.10 ilustra a presença de harmônicos de segunda e quinta ordem em um sinal senoidal puro.

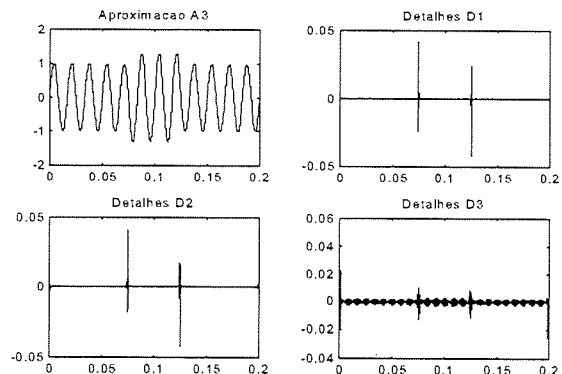


Figura 9. Decomposição de um *swell* de 30% em ARM utilizando a função base db3.

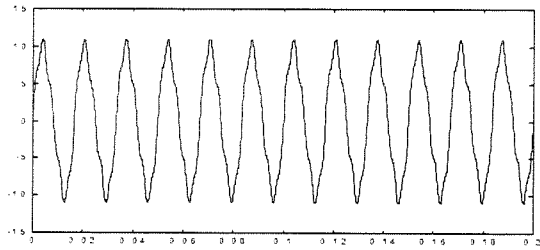


Figura 10. Sinal senoidal com inclusão de harmônicos de segunda e quinta ordem.

As Fig.11 e Fig.12 ilustram os resultados decorrentes da utilização das bases *coif1* e *db6*, respectivamente. Como pode ser visto na Fig. 11, a *Wavelet* *coif1* apresenta resultados que indicam a presença não somente das componentes de baixa frequência (D3 e D4), mas também componentes de alta frequência (D1 e D2). As componentes de baixa frequência caracterizam os conteúdos harmônicos incorporados ao sinal e as altas frequências são características típicas de ruídos.

Já na análise com a utilização da *db6*, Fig. 12, pode-se perceber que esta indica somente a presença de componentes de baixa frequência.

Similarmente aos distúrbios *sag* e *swell*, as mesmas bases *dbN* ($N = 4, \dots, 8$), *symM* ($M = 4, \dots, 7$) e *coifP* ($P = 3, 4$ e 5) produziram resultados confiáveis quando aplicadas à distorções harmônicas.

3.4 Ruídos

Com respeito aos ruídos, estes podem ser definidos como sinais elétricos não desejáveis, contendo espectro de frequências abaixo de 200 kHz, superposto à tensão e/ou corrente do sistema de energia. A faixa de frequência e o nível da amplitude dependem da fonte que produz o ruído e das características do sistema, sendo a amplitude típica inferior a 1% da tensão fundamental (Dugan, 1996).

A Fig.13 mostra um exemplo típico de ruído encontrado nos SEPs. O ruído incorporado no sinal senoidal puro possui uma amplitude equivalente a 1% do valor de pico da tensão.

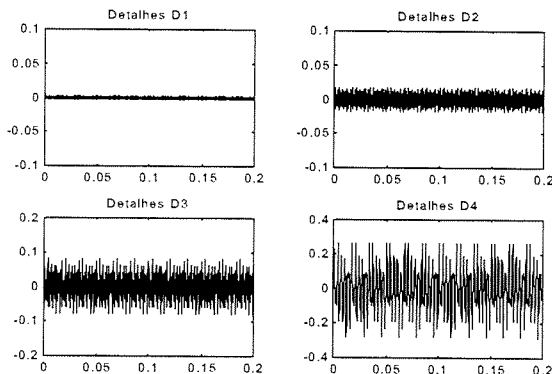


Figura 11. Decomposição de um sinal senoidal contendo distorções harmônicas de segunda e quinta ordem em ARM utilizando a função base *coif1*.

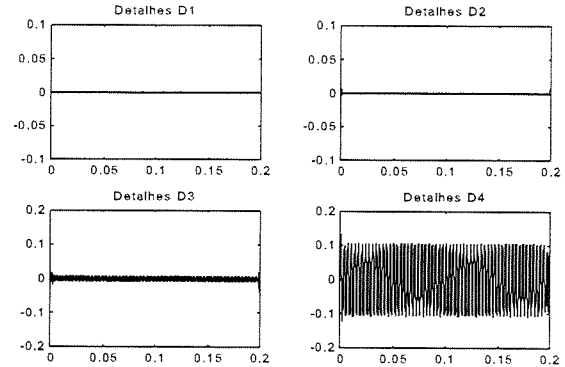


Figura 12. Decomposição de um sinal senoidal contendo distorções harmônicas de segunda e quinta ordem em ARM utilizando a função base *db6*.

Na Fig.14 é ilustrado o resultado de ARM do sinal em estudo, utilizando a *Wavelet* mãe *db8*.

Pode-se observar a presença de componentes tanto de altas como de baixas frequências, sendo predominantes as componentes de altas frequências, características de ruído, que constituem os coeficientes de detalhes D1 e D2.

Para análise de ruídos, similarmente aos outros distúrbios analisados, as mesmas *Wavelets* mãe *dbN* ($N = 4, \dots, 8$), *symM* ($M = 4, \dots, 7$) e *coifP* ($P = 3, 4$ e 5) produziram resultados satisfatórios.

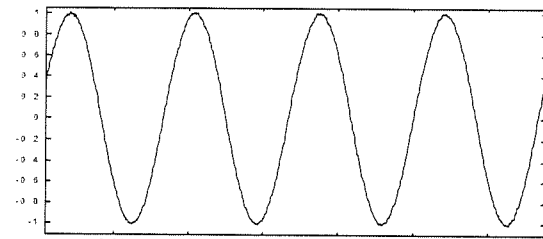


Figura 13. Sinal senoidal com inclusão de 1% de ruído.

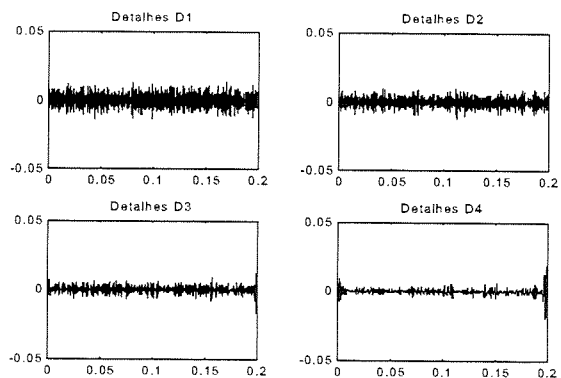


Figura 14 - Decomposição de um sinal senoidal contendo 1% de ruído em ARM utilizando a função base *db8*.



3 Conclusões

O presente trabalho apresentou um estudo com análise de comportamento de diversas famílias de bases *Wavelets*, tendo sido analisadas somente as bases ortogonais, aplicadas à QE, com o objetivo de identificar quais destas bases melhor se adequam ao estudo em questão.

A técnica de ARM, utilizando *Wavelets*, consiste na decomposição de um dado sinal em versões que correspondem a componentes de altas frequências (detalhes) e baixas frequências (aproximações). Através destas versões de detalhes e aproximações somos capazes de detectar e localizar diversos distúrbios ligados à QE, uma vez que as bases utilizadas para a análise possuam características que permitam distinguir os níveis de frequências do sinal original e do distúrbio. Desta forma, este trabalho propôs um estudo de quatro tipos de *Wavelets* mães: Haar, Daubechies, Symlet e Coiflet, que formam um grupo de vinte e uma bases diferentes, tendo-se restringido somente às bases ortogonais. Estas foram aplicadas à análise dos distúrbios *sag*, *swell*, distorções harmônicas e ruídos, que ocorrem com frequência nos SEPs.

A análise de tais distúrbios foi realizada em ARM tendo-se identificado algumas bases *Wavelets* como mais adequadas para o estudo de fenômenos ligados à QE. O comportamento da função base *Wavelet* é fundamental no desempenho das análises, uma vez que *Wavelets* com comportamentos mais suaves permitem melhor resolução no domínio da frequência, enquanto que *Wavelets* que possuem grandes variações em pequenos intervalos de tempo caracterizam melhor resolução no domínio do tempo.

Pôde ser observado que aumentando a ordem das *Wavelets* mães ortogonais, seus comportamentos em suavidade oferecem melhor resolução em frequência. Sendo assim, as *Wavelets* de Daubechies e Symlet de ordem superior a três e Coiflets de ordem superior a dois oferecem melhores resultados, isto em relação às bases *Wavelets* ortogonais utilizadas neste trabalho para análise de distúrbios ligados à QE. Tal resultado, associado à facilidade de cálculos que a envolve, justifica a ampla utilização da *Wavelet* de Daubechies de quarta ordem (db4) para análises em SEP. Por outro lado, por apresentarem comportamentos com menor suavidade, as demais bases (dbN, $N = 1, \dots, 3$, symM, $M = 1, \dots, 3$ e coifP, $P = 1$ e 2) são inviáveis na aplicação em destaque neste trabalho.

Agradecimentos

À Capes pelo suporte financeiro, ao Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica, do Departamento de Engenharia Elétrica da EESC e ao Dr. Mário Oleskovicz, pós-doutorando em QE na USP/EESC, pela revisão e sugestões neste artigo.

Referências Bibliográficas

- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica (2000), “Resolução N.º 24”.
- Daubechies, I. (1996). Where do Wavelets Come From? – A Personal Point of View, *Proceedings of the IEEE*, EUA, 84(4): 510-513.
- Daubechies, I. (1992). Ten Lectures on Wavelets, Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, Pennsylvania.
- Dugan, R.C. et al. (1996). Electrical Power Systems Quality, McGraw-Hill.
- Gomes, J. ; Velho, L. : (1998), From Fourier Analysis to Wavelets Course Notes – Siggraph, IMPA Rio de Janeiro, Brasil.
- Huang S. J. et al. (1998). Application of wavelets to classify power system disturbances. *Electric Power Systems Research*, 47 Feb.:87-93.
- Kim, C.H.; Aggarwal, R. (2000). Wavelet transforms in power systems. *Power Engineering Journal* Apr.:81-87.
- Santoso S. et al. (2000). Characterization of Distribution Power Quality Events with Fourier and Wavelet Transforms. *IEEE Transactions on Power Delivery*, EUA, 15(1): 247-254.
- Santoso S. et al. (1996). Power Quality Assessment via Wavelet Transform Analysis. *IEEE Transactions on Power Delivery*, EUA, 11(2): 924-930.