

VI SBQEE

21 a 24 de agosto de 2005
Belém – Pará – Brasil



Código: BEL 02 7621
Tópico: Aplicação de Novas Tecnologias

DETECÇÃO, LOCALIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE DISTÚRBIOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS ATRAVÉS DA TRANSFORMADA WAVELET

ODILON
DELMONT F.

CLAUDIOJ.
SANTOS

MÁRIO
OLESKOVICZ

SILVIO A.
SOUZA

ADRIANO
A.F.M.
CARNEIRO

DENIS V.
COURY

EESC-USP

CPFL

EESC-USP

EESC-USP

EESC-USP

EESC-USP

RESUMO

Este trabalho traz a utilização da Transformada *Wavelet* para o monitoramento de um sistema elétrico real com respeito a problemas relacionados à Qualidade da Energia. O intuito é detectar, localizar no tempo e classificar os fenômenos envolvidos. Tal processo é realizado através de filtros, decompondo-se um dado sinal em Análise Multiresolução. Como grandezas para a análise, utilizaram-se tensões trifásicas compondo dois conjuntos de dados. O primeiro refere-se a valores simulados através do *software* ATP, e o segundo refere-se a distúrbios reais coletados por meio de equipamentos de medições, instalados em vários pontos do sistema elétrico de distribuição. Ambos são referentes a um sistema elétrico de distribuição da CPFL.

PALAVRAS-CHAVE

Qualidade da Energia, Transformada *Wavelet*, Distúrbios de Tensão, Análise Multiresolução.

1.0 INTRODUÇÃO

Caracteriza-se a Qualidade da Energia Elétrica (QEE) pela disponibilidade de energia através de uma forma de onda senoidal pura, sem alterações na amplitude e frequência, emanando de uma fonte de potência infinita. Os problemas

de qualidade da energia são definidos como quaisquer distúrbios ou variações manifestados nos níveis de tensão, nas formas de onda de tensão ou corrente que possam resultar em insuficiência, má operação, falha ou defeito permanente em equipamentos de um sistema elétrico.

Dentre os fenômenos relacionados à QEE podemos citar os ocasionados por descargas atmosféricas, curtos-circuitos, correntes de magnetização de transformadores, correntes de partidas de grandes motores, operação de cargas não-lineares e chaveamentos de bancos de capacitores. Para uma adequada ação mitigadora desses fenômenos, estes devem ser detectados, localizados e classificados de modo eficaz, ou seja, com precisão e rapidez. Por estas razões optou-se pela utilização da Transformada *Wavelet* (TW) na realização desta tarefa. A TW fornece informações em ambos os domínios, tempo e frequência, através da Análise Multiresolução (AMR). Como já mencionado na literatura, a TW se sobressai em relação à Transformada de Fourier (TF), especificamente nesta área de detecção de distúrbios, em razão de se obter informações importantes tanto em relação ao tempo como à frequência.

Assim, é possível localizar distúrbios no tempo e dizer qual o seu nível de frequência. Estas informações serão também de fundamental importância para a classificação das anormalidades, uma vez que é possível identificar características únicas dos diferentes distúrbios através de dados provenientes dos diferentes níveis de resolução fornecidos na AMR.

Neste estudo foi empregada a técnica AMR para detectar e localizar, no tempo, distúrbios agregados às formas de ondas de tensão. Após sua detecção e localização, os distúrbios são classificados segundo sua natureza, utilizando-se um método baseado em desvios padrões, calculados a partir dos vários níveis de detalhes provenientes da AMR. Para isto tem-se sempre como parâmetro de referência um conjunto de desvios padrões de um sinal em regime permanente, para proceder à comparação com o conjunto de desvios padrões de um sinal com distúrbio. As grandezas analisadas referem-se a valores amostrados de tensões do sistema elétrico da CPFL (Cia Paulista de Força e Luz). O conjunto de dados total é constituído de dois distintos bancos de dados. O primeiro obtido por simulações dispendo do *software ATP – Alternative Transients Program* [1]. O segundo banco de dados compreende situações reais, registradas através de medições em campo, que também foram submetidas ao algoritmo para validação dos resultados observados. O *software Matlab®* [2] foi utilizado para a aplicação da TW neste sentido. Cabe comentar que esta pesquisa vem a dar continuidade aos trabalhos desenvolvidos na busca de desenvolver, testar e implementar algoritmos dedicados à análise da QEE [3, 4].

2.0 A TRANSFORMADA WAVELET

2.1 Transformada *wavelet* discreta

A TW é uma ferramenta matemática para análise de sinais similar à TF. A TW decompõe o sinal em diferentes escalas, com diferentes níveis de resolução, a partir de uma única função. A partir dos diferentes níveis de decomposição, podem-se evidenciar faixas de frequência do sinal em análise. 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 [5].

A Transformada *Wavelet* Discreta (TWD) de um função f pode ser simplificada pela Equação (1):

$$(TWD)(a,b) = \sum f(t) \overline{\psi_{a,b}(t)} dt \quad (1)$$

Nesta equação, os parâmetros a e b , variam discretamente em \mathfrak{R} , sendo as funções $\psi_{a,b}$ denominadas *Wavelet* mães e definidas de acordo com a Equação (2):

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

Analisando a Equação (1) pode-se perceber que a Transformada *Wavelet* depende de dois parâmetros, a e b , que correspondem, respectivamente, às informações de escala e de translação. Tal equação decompõe f em uma superposição de *Wavelets* $\psi_{a,b}$, sendo os coeficientes resultantes obtidos pela Transformada *Wavelet* de f [6].

2.2 Análise multiresolução – AMR

A técnica de AMR permite a decomposição de um dado sinal em diferentes níveis de resolução, fornecendo importantes informações tanto no domínio do tempo como da frequência. Por esta técnica, o sinal analisado é primeiramente decomposto em dois outros sinais, uma versão detalhada e outra atenuada, através de filtros passa alta e passa baixa que são representados matematicamente por funções *Wavelets* e funções escala, respectivamente. Este fato é evidenciado na Figura 1, onde esta representa o processo de filtragem que é acompanhado também de um operador *downsampling*, o qual reduz a quantidade de informações a ser processada.

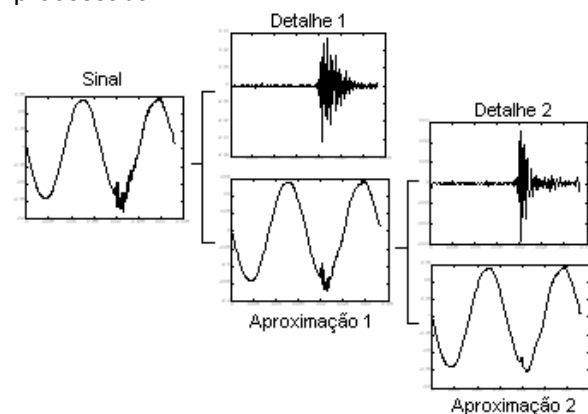


Figura 1 - Análise Multiresolução em dois níveis.

O sinal atenuado, proveniente do filtro passa-baixo, é novamente decomposto, resultando em dois novos sinais detalhados e atenuados, em diferentes níveis de frequência. Este processo é repetido até obterem-se as informações desejadas associadas a determinados níveis de frequências. Estes fornecem informações diretas, relativas ao sinal original, no domínio do tempo e da frequência [6]. As componentes de baixa frequência fornecem a identidade do sinal e as

componentes de alta frequência, por outro lado, fornecem os detalhes do sinal.

3.0 O SISTEMA ELÉTRICO EM ESTUDO

Os primeiros resultados deste trabalho referem-se a estudos consolidados e já publicados [4] com respeito à detecção, localização e classificação de distúrbios, conforme já evidenciado.

Para a continuidade dos trabalhos, dispôs-se novamente de um sistema elétrico simulado, constituindo de um transformador representado por uma subestação (138/13,8 KV), um alimentador de distribuição em 13,8 kV e por transformadores de distribuição da concessionária CPFL e particulares. O modelo das cargas do lado secundário destes trafos segue características específicas que denotam situações reais de carga. Além desses elementos também foram representados três bancos de capacitores (um de 1200 kVAr e dois de 600 kVAr cada) instalados ao longo do alimentador (BC 1, 2 e 3).

Deve ser ressaltado que o arranjo deste sistema de distribuição primário faz parte de uma situação real encontrada e que o mesmo representa os circuitos típicos de distribuição, em 15 kV, da CPFL.

O segundo banco de dados formulado compreende dados obtidos através de medições em campo realizadas em vários pontos do sistema elétrico de distribuição real da CPFL. Para as medições dos afundamentos e elevações de tensão foram utilizados oscilógrafos instalados em várias subestações de 138 kV da CPFL com as seguintes características: equipamento digital, o qual detecta perturbações em condições de sub e sobretensão, desequilíbrios de tensão e de corrente, sobrecorrente de fase e de neutro, desvios de frequência e variações de entrada na frequência, tensão e corrente. Cabe esclarecer que a frequência de amostragem utilizada como padrão nas medições dos sistemas de 138 kV da CPFL é de 1200 Hz, sendo que a mesma atende fundamentalmente as funções de proteção. Da situação atual, taxas amostrais superiores, estariam limitadas à velocidade de transmissão dos dados no sistema de comunicação. As medições dos chaveamentos de capacitores foram obtidas através de equipamentos como o BMI (*Basic Measuring Instrument, Model 7100*), instalados juntos aos Transformadores de Potencial (TPs) e aos Transformadores de Corrente (TCs) de medição de uma indústria atendida ao nível de tensão de 13,8 kV. A

indústria é atendida por um alimentador exclusivo onde está instalado um banco de capacitores automático de 1200 kVAr. A taxa amostral desse equipamento é de 128 amostras por ciclo, a qual caracteriza uma frequência de amostragem de 7.680 Hz.[3].

3.1 Conjunto de dados via simulações

Sobre sistema elétrico de distribuição anteriormente comentado, foi obtido um conjunto de dados formado por 72 diferentes situações de distúrbios, que foram submetidas à detecção, localização e classificação de forma contínua e automatizadas ao algoritmo implementado. Cabe adiantar que estas distintas situações caracterizam-se por 26 casos de afundamentos de tensão (0,1 a 0,85 p.u.), 18 de elevações de tensão (0,1 a 0,7 p.u.), 8 de interrupções de tensão, 10 de ruídos (frequência de 0,8 a 1,2 kHz) e 10 de transitórios oscilatórios, devido ao chaveamento de bancos de capacitores sobre o sistema. Todos os fenômenos foram caracterizados tomando-se como ângulos de incidência/inserção 0 e 90°.

3.2 Conjunto de dados resultante das medições

Este segundo conjunto compreende dados reais que foram extraídos do sistema elétrico de distribuição. Desta forma este conjunto de dados é formado por 66 diferentes situações de distúrbios, que também foram submetidas à detecção, localização e classificação através do mesmo algoritmo. Dentre estas 66 situações, 16 caracterizam-se em regime permanente e o restante em situações de distúrbio caracterizando 24 situações de afundamentos de tensão, 2 de elevações de tensão e 24 de transitórios oscilatórios.

4.0 METODO DE DETECÇÃO, LOCALIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO

No desenvolvimento do trabalho utilizou-se como *wavelet* mãe a *symlet* de ordem 4, ou *sym4*, da família das *Symlets*. Conforme mostrado em Arruda et al., [8] e também em alguns artigos desta área, esta *wavelet* mãe é capaz de responder as diversas situações com relação aos distúrbios já referenciados. Outro motivo para escolha desta *wavelet* mãe, também de acordo com Arruda et al. [8], é que geralmente *wavelets* mais suaves indicam melhor resolução em frequência que *wavelets* que possuem variações

bruscas, ou discontinuidades, como a *wavelet* de Haar, a *sym2* ou mesmo a *db2*.

Como critério inicial, o algoritmo considera a detecção e a localização de um determinado distúrbio. Para esta tarefa, toma-se uma janela de três ciclos que percorrerá o sinal em análise, enquanto uma alteração característica na forma de onda não for observada. Quando ocorrer alguma anomalia no sinal, o algoritmo será capaz de detectá-lo através do primeiro nível de detalhe em AMR, como evidenciado na Figura 2. Deve ser lembrado que este tamanho de janela foi escolhido empiricamente, visto que primeiramente uma janela de apenas um ciclo foi utilizada para detectar os distúrbios não apresentando resultados adequados. Posteriormente, uma janela de dois ciclos também foi utilizada, porém ainda apresentando resultados não desejados devido a pouca quantidade de amostras do sinal em análise (baixa frequência de amostragem).

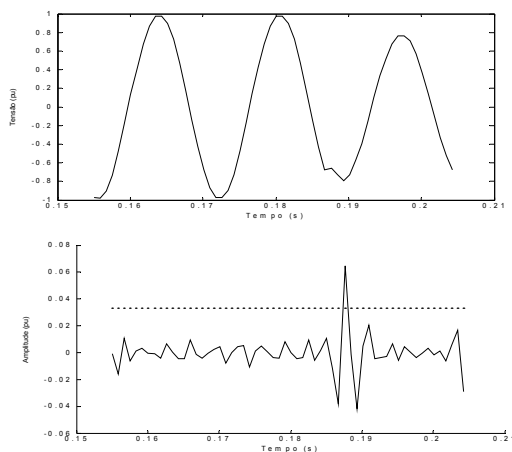


Figura 2 – Sinal janelado (a). Primeiro Detalhe do o sinal janelado (b)

A Figura 3 ilustra as informações tomadas do primeiro nível de decomposição de uma determinada situação com distúrbio.

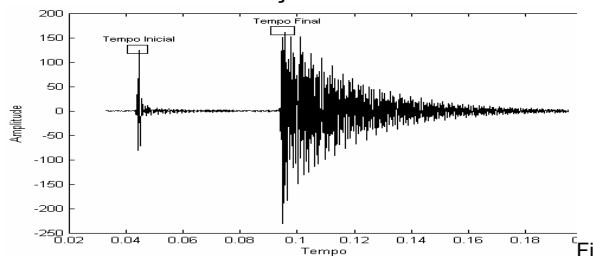


Figura 3 – Estimação da duração de um determinado distúrbio.

A partir da detecção, esta janela de dados de três ciclos é ampliada para até 10 ciclos, sendo formada por dois ciclos de pré-fenômeno e oito ciclos de pós-fenômeno, para se obter as demais informações precisas e pertinentes à

localização do distúrbio, como o tempo inicial e final do ocorrido, a classificação e outras características quando desejadas.

Um detalhe importante que deve ser observado com respeito à classificação, refere-se à necessidade de se processar sete níveis de decomposição em AMR, para se evidenciar as informações do sinal a 60 Hz.

Cabe frisar que o desempenho do método de classificação é basicamente caracterizado na comparação entre os valores calculados referentes aos desvios padrões dos detalhes do sinal em regime permanente com o sinal distorcido, ou seja, o sinal em regime é tomado como referência para avaliar possíveis situações anormais de operação sobre o sistema.

Sabe-se e que os distúrbios de afundamento, elevação e interrupção de tensão são caracterizados pelo seu conteúdo espectral na faixa de 60Hz. Desta forma, pela AMR tem-se que este conteúdo é representado pelo quarto nível de decomposição, em virtude da baixa taxa amostral empregada. Este nível é então empregado para a classificação destes fenômenos pela abordagem proposta. Para obter corretamente a diferenciação entre estes três distúrbios, calcula-se o valor resultante da diferença entre os desvios padrões do sinal em regime e do sinal com distúrbio. Se a diferença observada for positiva, este é classificado como elevação de tensão, ao passo que se a diferença for negativa, o mesmo é classificado como afundamento ou mesmo interrupção momentânea dependendo dos níveis atingidos.

Na Figura 4 é evidenciado um afundamento de tensão de 25% e, na Figura 5, sua respectiva classificação.

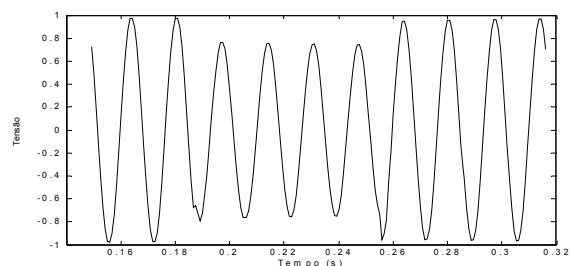


Figura 4 – Afundamento de tensão de 25%.

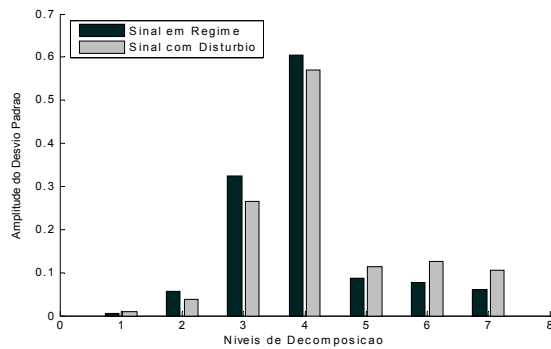


Figura 5 – Classificação de um Afundamento.

5.0 RESULTADOS

Como já mencionado, a taxa amostral no banco de dados de medições, para os casos de afundamento e elevação de tensão, é de 1200Hz, taxa esta muito pequena para aplicação em questão. Com apenas 20 amostras por ciclo o algoritmo não se mostrou totalmente eficaz. Já para os casos de chaveamento de bancos de capacitores, a frequência de amostragem foi de 7,68kHz, não apresentando problemas tanto na detecção quanto na classificação dos mesmos pela aplicação da TW.

5.1 Análise dos resultados frente às simulações realizadas

Cabe adiantar que pela lógica computacional implementada, esta foi capaz de corretamente detectar, localizar e classificar de forma automatizada os diversos distúrbios apresentados.

A detecção e localização no tempo dos distúrbios relacionados a afundamentos, elevações e interrupções de tensão tiveram um erro médio de 0,76%, 1,47% e 0,22% respectivamente. Já para os distúrbios caracterizados por transitórios oscilatórios e ruídos, o erro médio total foi de 1% e 1,4% respectivamente [4].

Como fator determinante para a classificação dos distúrbios, analisaram-se as diferenças entre os desvios padrões dos níveis de decomposição do sinal em análise, com base no nível de decomposição da forma de onda em regime permanente. Sobre esta, o algoritmo classificador apresentou um erro médio total de 1,4%, errando apenas em um caso de afundamento de tensão, confundindo esta situação com uma interrupção na tensão. Para os demais casos (interrupções e elevações de tensão, transitórios oscilatórios e ruídos) a tarefa

de classificar, dispondo-se dos desvios padrões, atingiu 100% de acertos.

Na estimação da duração do distúrbio sobre o sistema em análise, com situações representativas de afundamentos e elevações de tensão, a média total dos erros observados foi de 4,6%. Já para os casos de interrupções de tensão avaliados, a estimação da duração do distúrbio realizada de forma automatizada, apresentou um erro de 5,7%.

Como anteriormente apresentado, as situações de afundamentos, elevações e de interrupções de tensões foram também avaliadas pela metodologia proposta, para se determinar a amplitude dos fenômenos envolvidos. Para as situações, que dizem respeito aos afundamentos e elevações de tensão, o erro observado na estimação da amplitude ficou abaixo de 1,1%. As situações caracterizadas como interrupções no fornecimento de energia apresentaram um erro de 0,2% .

5.2 Análise dos dados frente às medições em campo

Cabe comentar que por mais que testado, o algoritmo ainda merece um refinamento no sentido de abranger um maior número de tipos e ocorrências simultâneas de distúrbios relacionados a QEE, bem como uma melhor adequação à frequência amostral disponibilizada.

Destes fatos temos que algumas das situações reais apresentadas à lógica implementada, pré-classificadas visualmente como regime permanente, apontaram uma certa descaracterização à forma de onda senoidal. Uma análise criteriosa realizada com estes casos revelou a presença de distúrbios que ainda não foram contemplados pela lógica implementada. Um exemplo disto foi à presença de flutuações de tensão no sinal em análise. Cabe comentar que outro fator que fez com que o algoritmo se equivocasse com respeito à classificação, foi a baixa taxa amostral do sinal disponibilizada pelos meios de medição empregados (20 amostras por ciclo).

Das situações medidas em campo, foram possíveis caracterizar apenas duas condições de elevação de tensão, vindo estas a serem corretamente detectadas e classificadas pela abordagem implementada.

Dos dados coletados, uma parte mostrou estar em regime permanente. Porém, realizando uma minuciosa análise foi detectado que algumas dessas situações podem ser definidas como flutuações de tensão já que, os níveis de tensão

observados variam entre 0,95 pu e 1,05 pu[7]. Um caso típico é ilustrado na Figura 7.

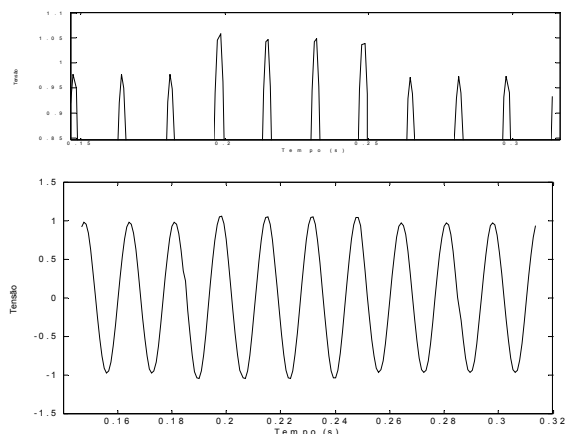


Figura 7 – Caso típico de flutuação de tensão - Sinal ampliado (a) - Sinal normal (b).

Para os casos de oscilações transitórias apresentadas ao algoritmo, estes foram 100% detectados e classificados. Porém um fator importante deve ser mencionado, que foi a frequência de amostragem de 7,68 KHz disponibilizada para caracterizar estes sinais, (128 amostras por ciclo). Dessa maneira o algoritmo não necessitou de três ciclos para detectar corretamente o distúrbio, mas sim, de apenas um único ciclo. Na seqüência implementada, logo após a detecção, uma janela maior de dados foi encaminhada para o módulo de classificação como anteriormente apresentado. A Figura 8 ilustra uma situação caracterizada como oscilação transitória.

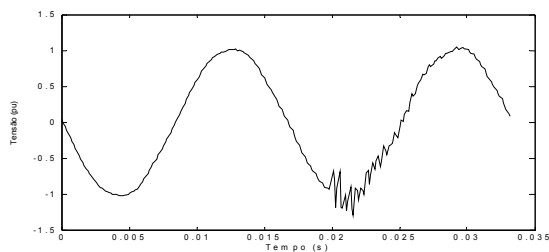


Figura 8 – Oscilação transitória.

A Tabela I indica os tipos de distúrbios caracterizados e o índice de acertos frente aos dados reais coletados. Nota-se que apenas os casos de afundamentos de tensão tiveram erros para 2 situações. Já na detecção, cerca de 25% das situações foram incorretamente acusados, erros este justificáveis pela baixa taxa amostral disponibilizada para uma boa parte das situações analisadas.

TABELA I – Tipos de distúrbios caracterizados em campo e índice de acertos observados

Fenômeno	Número de casos	Classificação	Detecção
		%	
Afundamento	24	91,7%	92%
Elevação	2	100%	100%
Regime	16	100%	56,3%
Transitórios	24	100%	100%

Deve ser destacado que sobreposto aos dados coletados, caracterizou-se uma pequena parcela de ruído. Contudo, tais ruídos sobrepostos aos sinais não foram significativos a ponto de atrapalhar o desempenho do algoritmo implementado.

Uma outra importante questão a comentar, é a presença de distintos distúrbios em seqüência a primeira detecção. Dois casos de afundamentos de tensão apresentaram em sua continuidade a caracterização de outros dois distintos afundamentos, sendo estes, novamente, corretamente detectados ao longo do processo.

6.0 CONCLUSÕES

Foi apresentada uma metodologia para análise de distúrbios relacionados à Qualidade da Energia Elétrica baseada na Transformada *Wavelet* e na técnica de AMR. Associando à TW a lógica computacional implementada, obteve-se uma ferramenta para a detecção, localização e classificação baseada nos desvios padrões dos detalhes dos distúrbios analisados.

Observou-se a relevância da disponibilização de uma adequada taxa amostral dos equipamentos de medição à aplicação da TW, no tocante à precisão obtida pelas análises. Algumas situações normais foram identificadas como distúrbio em função de descontinuidades geradas pela transição entre um dado valor do sinal de tensão medido e amostrado em um determinado instante e o valor medido subsequente.

O desempenho da metodologia proposta mostrou-se coerente com o esperado, com acertos próximos a 100%, tanto para a detecção como para a classificação dos distúrbios, quando da consideração de uma frequência de amostragem de 7,68 KHz.

Contudo, vale comentar que novas considerações e avaliações devem ainda ser

realizadas para que se possam aprofundar estudos nos vários aspectos que influenciam nas técnicas descritas, visando uma aplicação prática e direta dos resultados observados.

7.0 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos/USP, pelas facilidades proporcionadas quando do desenvolvimento deste trabalho, ao apoio financeiro recebido por parte do CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, bem como à CPFL pela colaboração técnica fornecida.

8.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ALTERNATIVE Transients Program. Rule Book, Leuven EMTP Center (LEC), 1987.
 - [2] MatLab®, Wavelet Toolbox, 1996-1997, The MathWorks, Inc.
 - [3] SANTOS, C.J.; OLESCKOVICZ, M.; ARRUDA, E. F.; COURY, D.V.; “A Transformada Wavelet como Ferramenta para a Análise de Distúrbios Reais Relacionados à Qualidade da Energia Elétrica”, XVI Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica (SENDI), Brasília (DF), Nov, 2004.
 - [4] DELMONT, O.F., “Utilização da Transformada Wavelet para caracterização de distúrbios na Qualidade da Energia Elétrica”, Dissertação de Mestrado, USP São Carlos, set, 2003.
 - [5] SANTOSO, S.; POWERS, E. J.; GRADY, W. M. and HOLFMAN, P. Power quality assessment via wavelet transform analysis, *IEEE Transaction on Power Delivery*, 1996, vol. 11, No2, Apr.
 - [6] GOMES, J. ; VELHO, L. From Fourier Analysis to Wavelets Course Notes – Siggraph, IMPA Rio de Janeiro, 1998, Brasil.
 - [7] DUGAN, R. C. , MCGRANAGHAN, M. F. and WAYNE BEATY, H. *Electrical Power Systems Quality*, 1996, MCGRAW-HILL.
- ARRUDA, E. F., DELMONT, O. F., COURY, D. V., CARNEIRO, A. A. F. M. Um Estudo das Famílias Waveltes Aplicadas à Qualidade da Energia Elétrica. *Congresso Brasileiro de Automática – CBA2002*, 6p,2002, Natal/RN.

