



V SBQEE  
Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica  
17 a 20 de Agosto de 2003  
Aracaju – Sergipe – Brasil



Código: AJU 04 193  
Tópico : Análise, Diagnósticos E Soluções

## UTILIZAÇÃO DA TRANSFORMADA WAVELET E RNAs PARA CARACTERIZAÇÃO DE DISTÚRBIOS NA QUALIDADE DA ENERGIA

Odilon Delmont Filho\*  
EESC-USP

Elcio F. de Arruda  
EESC-USP

Mário Oleskovicz  
EESC-USP

Adriano A. F. M. Carneiro  
EESC-USP

Denis V. Coury  
EESC-USP

### RESUMO

Este trabalho propõe o emprego da Transformada Wavelet para caracterizar distúrbios que freqüentemente ocorrem em um Sistema Elétrico. Com base na aplicação da Análise Multiresolução, este estudo foi elaborado para detectar e localizar distúrbios agregados às formas de ondas de tensão além de classificá-los segundo sua natureza. Para tal, dispõe-se de duas técnicas distintas análise através da Curva de Desvio Padrão e técnicas de inteligência artificial, mais especificamente, Redes Neurais Artificiais. Os valores amostrados e utilizados para os testes referem-se às tensões de um sistema elétrico de distribuição real simulado pela aplicação do *software* ATP (*Alternative Transients Program*).

### PALAVRAS-CHAVE

Qualidade da Energia, Transformada Wavelet, Distúrbios de Tensão, Análise Multiresolução, Redes Neurais Artificiais.

### 1.0 - INTRODUÇÃO

Situações transitórias em sistemas de potência, as quais freqüentemente apresentam um considerável efeito sobre a operação normal de um sistema, são comuns e, na prática, podem ser ocasionadas por descargas atmosféricas, correntes de magnetização dos transformadores, faltas sustentadas, correntes de partida de grandes motores, ou ainda pelos efeitos capacitivos e de chaveamento em linhas de

distribuição. A análise e o entendimento destes transitórios associados às condições anormais têm sempre auxiliado na explicação e retificação dos mesmos.

Assim, entende-se que todos os fenômenos relacionados à Qualidade da Energia (QE) devem ser detectados, localizados e classificados. Neste contexto, a utilização da Transformada Wavelet (TW) para a detecção, localização e classificação de problemas de QE vêm a fornecer informações importantes e precisas em ambos os domínios, tempo e freqüência através da Análise Multiresolução (AMR) diferenciando-se das ferramentas tradicionais, como a Transformada de Fourier. Assim, é possível localizar precisamente distúrbios no tempo e dizer qual o seu nível de freqüência. Estas informações serão também de fundamental importância para a classificação das anomalias presentes no sistema, uma vez que é possível identificar características únicas dos diferentes distúrbios através de dados provenientes dos diferentes níveis de resolução fornecidos na AMR.

Neste trabalho, propõe-se o emprego da técnica AMR para detectar e localizar o distúrbio agregado às formas de ondas de tensão em análise. Além da detecção e localização, os fenômenos mencionados são classificados segundo a sua natureza, utilizando-se de duas técnicas distintas: análise da Curva de Desvio Padrão (CDP) e Redes Neurais Artificiais (RNAs). As grandezas analisadas referem-se a valores amostrados de tensões de um sistema elétrico real, cujos dados foram fornecidos pela CPFL-

Companhia Paulista de Força e Luz e simulados pela aplicação do software ATP – *Alternative Transients Program* [1]. Os software Matlab [2] e o NeuralWorks [3] também são utilizados para as respectivas aplicações da TW e RNAs propostas. Como aplicação prática, visando os interesses do setor energético atual, um software para a análise da QE fornecida está sendo implementando e extensamente testado, com resultados iniciais bastante promissores.

## 2.0 - TRANSFORMADA WAVELET E AMR

### 2.1 Transformada Wavelet Discreta

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 [4].

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 [4].

A Transformada *Wavelet* Discreta (TWD) de  $f$  é dada 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 *Wavelets* 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 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  $f$ .

## 2.2 Análise Multiresolução – AMR

A técnica de Análise Multiresolução (AMR) permite a decomposição de um dado sinal em diferentes níveis de resolução, fornecendo importantes informações no domínio do tempo e 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 ( $h_1$ ) e passa baixa ( $h_0$ ) 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. 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 [5].

A Figura 2 ilustra as respectivas decomposições do sinal. Lembrando que a Figura 2 - (a) representa a versão aproximada do sinal, sendo os detalhes das decomposições 1, 2 e 3 apresentados na Figura 2 - (b), (c) e (d) respectivamente.

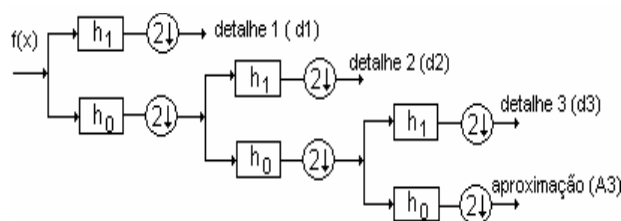


Figura 1 - Processo de decomposição de um sinal através de filtragem.

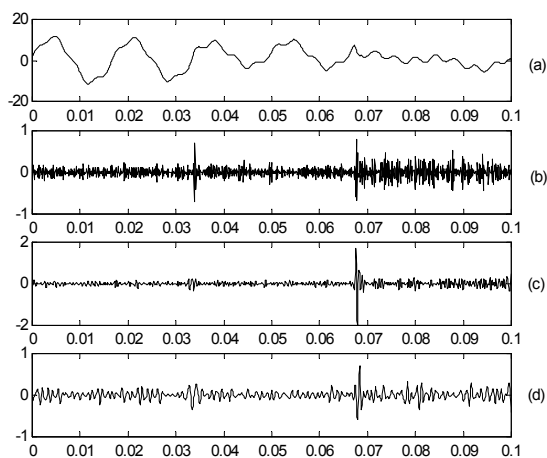


Figura 2 - Representação de um sinal sob AMR. Aproximação A3(a), detalhe 1(b), detalhe 2 (c) e detalhe 3 (d).

### 3.0 - O SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO SIMULADO

As grandezas analisadas referem-se a valores amostrados de tensões de um sistema elétrico real, cujos dados foram fornecidos pela CPFL-Companhia Paulista de Força e Luz e simulados pela aplicação do *software* ATP (Figura 3).

Na Figura 3, o transformador da subestação (138/13,8 KV), os transformadores de distribuição 3 e 13 e o transformador particular 4, que aparecem destacados, foram modelados considerando-se suas curvas de saturação. O modelo das cargas do lado secundário destes trafos seguem características específicas que denotam situações reais de carga. Já os transformadores particulares 1, 2 e 3 foram modelados sem considerar as respectivas curvas de saturação dos transformadores. Logo, as cargas foram referidas ao primário com uma parcela RL em paralelo com um capacitor para a devida correção do fator de potência, originalmente de 0,75, e posteriormente corrigido para 0,92. Os demais transformadores de distribuição foram modelados somente como cargas RL referidas ao primário, considerando-se um fator de potência geral de 0,95. Os outros foram somente representados por suas cargas equivalentes, cujos pontos de conexão com o sistema são indicados na Figura 3. Cabe ainda destacar que tanto os transformadores de distribuição quanto os particulares apresentam ligações delta-estrela, com resistência de aterramento de zero ohm. Além destes, três bancos de capacitores (um de 1200 kVAr e dois de 600 kVAr cada) estão instalados ao longo do sistema (BC 1, 2 e 3). O alimentador principal é constituído por cabo nu CA-477 MCM em estrutura aérea convencional, e seus trechos são representados por elementos RL acoplados.

Deve ser ressaltado que o arranjo deste sistema de distribuição primária faz parte de uma situação real, na CPFL, e que a mesma, na medida do possível, apresenta grande semelhança com o encontrado na prática. Inúmeras considerações práticas foram adotadas até a obtenção e teste do mesmo, em um trabalho conjunto entre as partes interessadas.

### 4.0 - METODO DE CLASSIFICAÇÃO PELA CDP

No desenvolvimento do trabalho utilizamos como *wavelet* mãe a família das Symlets, mais precisamente a symlet de ordem 4, ou sym4. Conforme mostrado em Arruda et al., [7] e também em alguns artigos desta área, esta

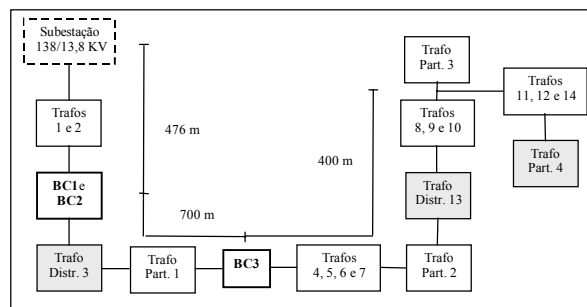


Figura 3 – Diagrama unifilar do sistema elétrico de distribuição analisado.

*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. [7], é que geralmente *wavelets* mais suaves indicam melhor resolução em frequência que *wavelets* que possuem variações bruscas, ou descontinuidades, como a *wavelet* de Haar, a sym2 ou mesmo a db2.

Deve ser observado também a taxa amostral utilizada, que neste caso foi de 7,68kHz. Tal valor foi adotado por ser suficiente para TW realizar as suas funções corretamente e também por ser uma frequência de amostragem usualmente empregada pelos instrumentos de medição e obtenção de dados.

Inicialmente é considerada nesta abordagem a detecção e a localização do distúrbio. Enquanto uma alteração na forma de onda em regime permanente não é observada, percorre-se o sinal em análise com uma janela de dados que corresponde a meio ciclo. Sendo detectado pela AMR uma anomalia na forma de onda, esta janela de dados de meio ciclo é ampliada para até 10 ciclos, para se obter as demais informações pertinentes à localização do distúrbio, como o tempo exato de inserção e extinção, classificação e demais características. Como por exemplo, para a localização do distúrbio no tempo, são utilizadas informações do segundo nível de detalhe, resultando nas informações do instante inicial e final do evento. Já para a caracterização da amplitude do distúrbio, para os casos de afundamento e elevação de tensão, considera-se o próprio sinal de entrada com dados caracterizando as situações de pré e pós-distúrbio.

O funcionamento do método de classificação é basicamente caracterizado na diferenciação entre a CDP do sinal em regime permanente e a CDP do sinal com distúrbio, ou seja, o sinal em regime é tomado como referência para avaliar possíveis situações anormais de operação sobre o sistema.

#### 4.1 Afundamento, Elevação e Interrupções de Tensão

Das situações reais sobre um sistema elétrico, tem-se que os distúrbios de afundamento ou elevação de tensão e de interrupção momentânea são caracterizados pelo conteúdo espectral na faixa de 60Hz. Da AMR empregada, sabe-se que tal conteúdo é fielmente representado pela sétima decomposição, sendo esta então empregada para a classificação destes fenômenos pelo método da CDP. A diferenciação entre estes três distúrbios encontra-se no valor resultante da diferença entre o sinal em regime e o 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 de tensão. No caso de interrupção momentânea, a diferença será negativa e ultrapassará alguns limites pré estabelecidos, que serão posteriormente evidenciados.

Como ilustração, a Figura 4 traz a CDP de um afundamento de tensão de 45%, onde a linha pontilhada representa a curva referente ao distúrbio e a curva contínua, a curva de referência. Lembrando que um afundamento pode causar um decréscimo temporário de 10-90% no valor eficaz da tensão do sistema [6].

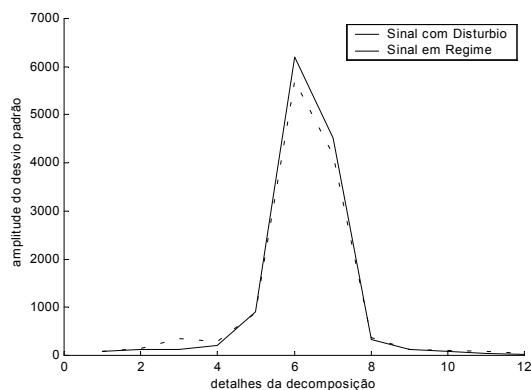


Figura 4 – CDP de um afundamento de tensão de 45%.

Já na Figura 5, é mostrado a CDP de uma elevação de tensão de 65%, onde também visualmente é perceptível uma diferenciação entre a curva de referência (contínua) e a curva com distúrbio (pontilhada). Deve ser mencionado também que uma elevação é caracterizada por um aumento da tensão eficaz do sistema, entre 10-80% da tensão [6].

No que segue, a Figura 6 traz a caracterização de um distúrbio referente a uma interrupção momentânea, que ocorre quando o fornecimento de tensão decresce para um valor menor do que 0,1 pu [6], sendo significativa a diferença entre a

CDP do distúrbio e a CDP do sinal em regime, o que possibilita a correta classificação do ocorrido.

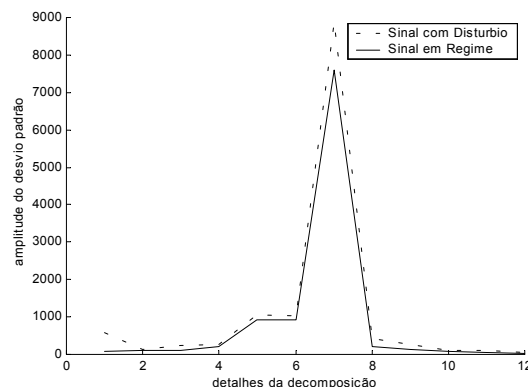


Figura 5 – CDP de uma elevação de tensão de 65%.

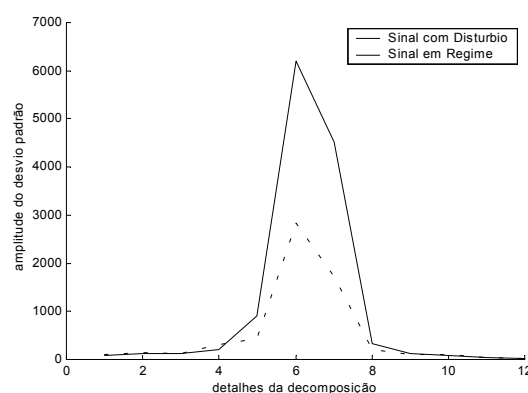


Figura 6 – CDP de uma interrupção momentânea.

#### 4.2 Oscilações Transitórias

Para a classificação de distúrbios como oscilação transitória, provenientes de chaveamento de bancos de capacitores, os detalhes que são considerados para o cálculo da CDP são o terceiro e o quarto. A classificação propriamente dita ocorre quando a diferença da CDP dos detalhes 3 e 4 ultrapassam simultaneamente um limite estipulado, ou melhor, quando a curva referente ao distúrbio for maior que a curva em regime nos níveis de detalhe 3 e 4, e ainda ultrapassar um determinado valor, tal curva indica que há presença de oscilação transitória no sinal analisado. Este fato se deve à faixa de frequência presentes nestes níveis de detalhe que são características das oscilações transitórias. A Figura 7 mostra este fato, ou seja, a classificação de uma oscilação transitória proveniente de um chaveamento de banco de capacitores de um sistema de distribuição mediante a análise da CDP. Seguindo esta metodologia, todos os distúrbios referentes à oscilação transitória também foram devidamente classificados.

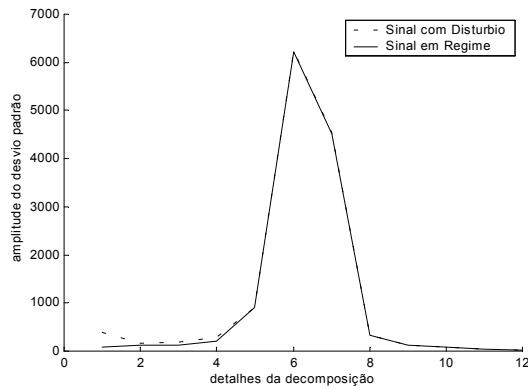


Figura 7 – CDP de uma oscilação transitória.

### 4.3 Ruídos

Com relação aos ruídos, por serem definidos como sinais elétricos não desejáveis com um conteúdo do espectro abaixo de 200 kHz [6], tomamos o cuidado de estabelecer alguns critérios, pois estes, nas simulações realizadas, foram frequentemente encontrados em junção a outros distúrbios, tornando por vezes complicada a sua classificação. Os níveis de detalhes ideais para o cálculo do desvio padrão e, conseqüentemente, o ponto de diferenciação entre os outros distúrbios foram os detalhes 1 e 2. Esta escolha reside no fato de que o conteúdo espectral existente nos detalhes iniciais melhor caracterizam as altas frequências associadas ao fenômeno. Do mesmo modo que para as classificações anteriores, é calculada a diferença entre o sinal com ruído e o sinal em regime. Em comparação com os outros distúrbios, os ruídos apresentaram maior grau de dificuldade com relação a sua adequada classificação. Mesmo assim, como para os demais fenômenos, um índice de 100% de acerto nas classificações foi observado.

A Figura 8 mostra a CDP de um sinal com ruído juntamente com a CDP de um sinal em regime permanente, onde a curva referente ao sinal com distúrbio recebe valores superiores a curva do sinal em regime, evidenciando a possível e correta classificação do distúrbio.

Da forma em que o algoritmo foi implementado, este foi capaz de corretamente detectar, localizar e também classificar os diversos distúrbios apresentados. Testes iniciais indicam um aproveitamento de aproximadamente 97% de acerto para caracterização da duração do distúrbio e 100% na classificação dos mesmos. O conjunto de testes foi de 80 situações para os cinco tipos de distúrbios analisados, divididos em 34 casos de afundamentos de tensão, 26 de elevações de tensão, 2 de interrupções de tensão

e 12 de oscilações transitórias, sendo estes últimos divididos em ângulo de inserção de  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , como também 6 casos de ruídos.

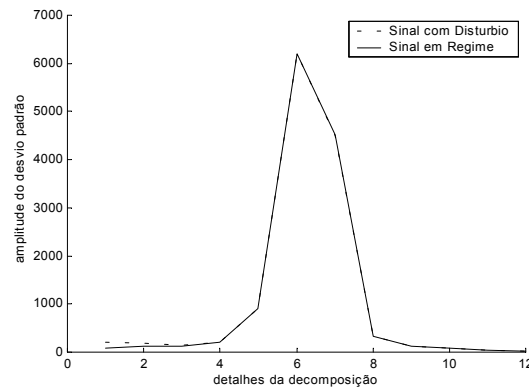


Figura 8 – CDP de um sinal com inserção de ruídos da ordem de 0 a 0,1 pu.

### 5.0 - MÉTODO DE CLASSIFICAÇÃO POR RNA

Conforme explicitado anteriormente, após a detecção de uma descontinuidade ou uma situação anormal sobre o sistema, acusada pela TW, o MI é ativado para buscar a classificação do ocorrido.

Este MI é composto por uma RNA independente associada a cada fase de tensão do sinal em análise. Cada RNA apresenta 40 unidades na sua camada de entrada, as quais correspondem à 20 amostras de pré e 20 amostras de pós caracterização do fenômeno, a uma frequência de amostragem de 2,4 kHz. A RNA apresenta somente 5 unidades de processamento na sua camada intermediária e uma camada de saída com 3 unidades (RNA 40 – 5 – 3). Como destacado, o *software NeuralWorks* foi empregado com o objetivo de se obter as matrizes de pesos fixas que caracterizem as condições de operações sobre o sistema elétrico. Utilizou-se do algoritmo supervisionado “*Norm-Cum-Delta Learning Rule*”, uma variação do algoritmo de *retropropagação*, o qual é imune às alterações do tamanho da época (número de padrões aleatórios pertencentes ao conjunto de treinamento apresentados à arquitetura a cada iteração). Como uma alternativa para a função de transferência sigmoideal, a função de transferência tangente hiperbólica foi utilizada. Durante a fase de treinamento, utilizaram-se valores de taxas de aprendizagem distintas para as unidades da camada intermediária e de saída compreendidas entre 0,4 a 0,01, com valores de momento situados entre 0,2 a 0,001. Todo o trabalho foi executado sobre um Pentium II – 333 MHz. As saídas desejadas/esperadas para caracterizar cada fenômeno são observadas na

Tabela 1. Esperam-se valores próximos ou iguais a 0 (zero) e 1 (um) para caracterizar as situações.

TABELA 1 – Valores esperados pelo MI para caracterizar os fenômenos delineados

| Fenômeno    | Saída 1 | Saída 2 | Saída 3 |
|-------------|---------|---------|---------|
| Afundamento | 0       | 0       | 1       |
| Elevação    | 0       | 1       | 0       |
| Interrupção | 0       | 1       | 1       |
| Ruído       | 1       | 0       | 0       |
| Osc. Trans. | 1       | 0       | 1       |

O conjunto de treinamento, conforme já apresentado, foi gerado considerando-se 42 padrões onde os mesmos caracterizam 8 situações para cada fenômeno de afundamento e elevação de tensão, interrupção momentânea, oscilação transitória e, 10 situações de ruídos sobre o sistema. Todos os fenômenos foram caracterizados tomando-se como ângulos de incidência/inserção 0 e 90°. Para validar o proposto pelo MI, 30 novas e diferentes situações de teste foram geradas e apresentadas ao mesmo. Do exposto, afirmamos que o MI apresentou um índice de 100% de acerto para todas as situações conforme apresentado na Tabela 2.

TABELA 2 – Resultados obtidos com a aplicação da mna para um o conjunto de teste formulado

| Fenômeno    | Número de casos | Índice de Acertos % |
|-------------|-----------------|---------------------|
| Afundamento | 8               | 100%                |
| Elevação    | 6               | 100%                |
| Interrupção | 4               | 100%                |
| Ruído       | 8               | 100%                |
| Osc. Trans. | 4               | 100%                |

## 6.0 - CONCLUSÕES

Neste trabalho, abordou-se o emprego da técnica de Análise Multiresolução (AMR) para detectar, localizar e classificar o distúrbio agregado às formas de ondas de tensão. A classificação propriamente dita ocorreu utilizando a CDP. Além do exposto, os fenômenos delineados também foram classificados segundo a sua natureza, utilizando-se de uma arquitetura de Rede Neural Artificial (RNA) para uma comparação dos resultados obtidos pela CDP. As duas abordagens de classificação desempenham as suas funções em paralelo no algoritmo implementado.

Pela lógica computacional empregada, em primeira instância, com apenas meio ciclo,

teremos a detecção do distúrbio utilizando AMR seguida de uma prévia classificação do mesmo através da RNA. Assim, as medidas preventivas ou paliativas ao ocorrido poderão ser tomadas. O método poderá então analisar o sinal como um todo e relatar os instantes de inserção e extinção, além da classificação do fenômeno sobre o sistema (dispondo de informações providas da AMR e da CDP). Pelos resultados observados, com respeito a classificação, ambas as abordagens apresentaram um índice de 100% de acertos. Novos e mais aprofundados estudos estão sendo realizados para aprimorar, tanto o algoritmo, ainda em fase de implementação, como a saída e análise dos resultados desejados.

Basicamente, grande parte dos fenômenos/distúrbios relacionados aos assuntos delineados já foram estudados, mas, por mais amplos que tenham sido estes casos, novas situações ainda devem ser incluídas e trabalhadas no sentido de se alcançar uma implementação prática e confiável ao que foi proposto.

## 7.0 - AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos/USP, em especial ao Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica (LSEE) pelas facilidades proporcionadas quando do desenvolvimento deste trabalho, bem como ao apoio financeiro recebido por parte da CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e da FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo.

## 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] NeuralWorks Professional II/Plus, Aspen Technology Inc., 1998.
- [4] 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.
- [5] GOMES, J. ; VELHO, L. From Fourier Analysis to Wavelets Course Notes – Siggraph, IMPA Rio de Janeiro, 1998, Brasil.
- [6] DUGAN, R. C. , MCGRANAGHAN, M. F. and WAYNE BEATY, H. *Electrical Power Systems Quality*, 1996, MCGRAW-HILL.
- [7] 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.