

Estudo de Sinais Elétricos com Perturbações no Contexto da Qualidade da Energia

O. Delmont F^o, M. Oleskovicz e A. A. F. M. Carneiro, *Member, IEEE*

Resumo-- Este estudo apresenta um algoritmo para detecção, localização no tempo e classificação automática de distúrbios relacionados à qualidade da energia elétrica utilizando apenas uma ferramenta matemática: a Transformada *Wavelet*. Ao contrário do emprego de várias ferramentas, como apontado na literatura, optou-se pela utilização de apenas uma ferramenta para desempenhar tal papel, vindo a apresentar resultados satisfatórios. A partir desta ferramenta, desenvolveu-se um aprofundado estudo para analisar qual função base (*wavelet* mãe) melhor se adequaria a tal condição. Os casos de distúrbios analisados referem-se a um sistema elétrico de distribuição real simulado pela aplicação do *software* ATP (*Alternative Transients Program*).

Palavras-Chaves-- Análise Multiresolução, Distúrbios de Tensão, Qualidade da Energia Elétrica, Transformada *Wavelet*.

I. INTRODUÇÃO

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) esta sujeito a diversos tipos de fenômenos que podem deteriorar a qualidade no fornecimento da energia elétrica. Desta forma é necessário manter o nível de tensão dentro de determinados limites operacionais aceitáveis. Para isso, medidas de controle e de acompanhamento tanto dos órgãos de fiscalização como das concessionárias fornecedoras de energia são necessárias.

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.

A utilização da Transformada *Wavelet* (TW) para a detecção e localização no tempo de problemas de QEE fornece informações em ambos os domínios, tempo e frequência através da Análise Multiresolução (AMR). 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.

Este trabalho propõe o emprego da técnica de AMR para detectar, localizar no tempo e também classificar distúrbios agregados às formas de ondas de tensão registradas. O ganho deste trabalho esta na utilização de apenas uma ferramenta para realizar estas tarefas e ainda atentar para uma possível simultaneidade de distúrbios.

Cabe comentar que é notável a quantidade de pesquisadores nesta área. No entanto quando se trata de detecção, localização e também classificação, muitas ferramentas computacionais são usadas em conjunto mostrando a eficácia de determinadas metodologias pela cominação de certas ferramentas [1]-[6].

As grandezas analisadas neste estudo referem-se a valores amostrados de tensões trifásicas de um sistema elétrico real e simulados pela aplicação do *software* ATP – *Alternative Transients Program* [7]. O *software* Matlab® [8] foi utilizado para a aplicação da TW proposta.

II. TRANSFORMADA WAVELET

A idéia básica da Transformada *Wavelet* é a análise de dados de acordo com escalas variáveis no domínio do tempo e da frequência. Esta teoria teve grande evolução na década de 80, sendo formada pela união de idéias em campos como matemática pura e aplicada, física, computação e engenharias. No seguimento deste tópico serão apresentadas características de algumas *wavelets* mãe.

A. *Wavelet* de Haar

A *Wavelet* com os mais simples coeficientes no espaço $L^2(\mathcal{R})$ é denominada *Wavelet* de Haar. Uma propriedade da *Wavelet* de Haar é que ela tem suporte compacto, contudo ela não é continuamente diferenciável, o que de certa forma limita suas aplicações. Sabemos que a caracterização completa de uma TW implica em conhecer os filtros de análise, h e g (passa alta e passa baixa, respectivamente), bem como as funções *scaling* e *wavelet*. Os filtros de análise h e g são apresentados abaixo e a *Wavelet* de Haar [8] é representada na Fig. 1 por sua função *wavelet* e por sua função *scaling*, da seguinte forma:

Os autores agradecem o apoio financeiro recebido por parte do CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, bem como da FAPESP – Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo.

Os autores pertencem ao Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil (www.sel.eesc.usp.br).

$$h[] = \left\{ \frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}} \right\}$$

$$g[] = \left\{ \frac{1}{\sqrt{2}}, -\frac{1}{\sqrt{2}} \right\}$$

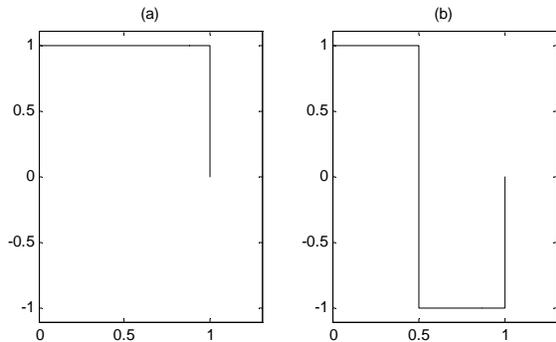


Fig. 1. Função *scaling* (a) e função *wavelet* (b) referentes à *wavelet* de Haar.

B. Wavelet Daubechies 4

Ingrid Daubechies criou o que é chamado de “*wavelet* ortonormal com suporte compacto” [9]. Os nomes das *wavelets* da família Daubechies são escritos por dbN, onde N é a ordem da *wavelet*. Na Fig. 2 é mostrado o modelo de funções *scaling* e *wavelet* da família Daubechies de ordem 4 [8]. Os filtros de análise *h* e *g* formam par QMF (*Quadrature Mirror Filter*), sendo o filtro *h*[] apresentado no que segue.

$$h[] = \{ 0.23037, 0.71484, 0.63088, -0.02798, -0.18703, 0.03084, 0.03288, -0.01059 \}$$

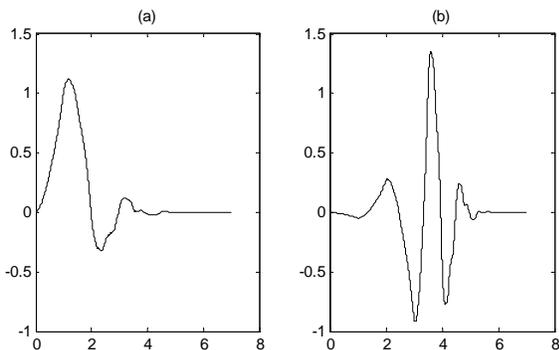


Fig. 2. Função *scaling* (a) e função *wavelet* (b) referentes à db4.

Cabe comentar que estas *wavelets* são assimétricas e não possuem uma expressão analítica, à exceção da db1, que é a *wavelet* de Haar.

C. Wavelet Symlet 4

Neste estudo foi utilizada a *wavelet* mãe da família *Symlet* de ordem 4 (sym4) para realizar a detecção dos distúrbios e também, neste caso, para testar a eficácia frente à classificação dos mesmos. Esta *wavelet* mãe é capaz de detectar e localizar no tempo os diversos distúrbios que afetam a QEE, visto que, por serem *wavelets* mais suaves indicam melhor resolução em frequência que *wavelets* que possuem descontinuidades [10].

Os modelos de *wavelet* mãe do tipo *Symlets* são *wavelets* mães aproximadamente simétricas. O filtro de análise *h*[] é sempre o par QMF de *g*[] . As respostas em frequência de *h*[] e *g*[] melhoram à medida que o suporte dos filtros aumenta.

Esta família apresenta algumas características gerais, tais como: possui suporte compacto com menor número de assimetria e maior número de decaimento para uma largura dada em relação à família Daubechies [11], [12]. A Fig. 3 apresenta a função *scaling* e também a função *wavelet* relativas à sym4. O filtro de análise *h*[] é apresentado, como sendo:

$$h[] = \{ 0.03222, -0.01260, -0.09921, 0.29785, 0.80373, 0.49761, -0.02963, -0.07576 \}$$

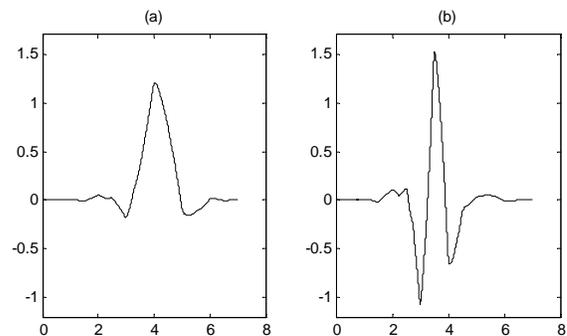


Fig. 3. Função *scaling* (a) e função *wavelet* (b) referentes à sym4.

D. Análise Multiresolução

A aplicação desta técnica está relacionada na decomposição de um determinado sinal em diferentes níveis de resolução. Desta forma, esta decomposição fornece importantes informações tanto no domínio do tempo como no da frequência. Quando empregada, um dado sinal sob análise é inicialmente decomposto em duas versões distintas: uma contendo informações de alta frequência (Detalhe 1 – D1) e outra com as informações de baixa frequência (Aproximação 1 – A1), através de filtros passa-alta e passa-baixa que já foram escolhidos de acordo com a *wavelet* mãe utilizada. Estes são representados matematicamente por funções *Wavelets* e funções escala, respectivamente [13]. Esta situação é evidenciada na Fig. 4, que representa o processo de filtragem para uma frequência qualquer. Vale adiantar, que neste estudo, a taxa amostral utilizada foi de 7.680 Hz (128 amostras por ciclo).

III. SISTEMA ELÉTRICO ANALISADO

Como grandezas para a análise da QEE, temos 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 (Fig 5) [14]. Deve ser ressaltado que a modelagem deste sistema de distribuição primário, na medida do possível, apresenta grande semelhança com os encontrados na prática. Inúmeras considerações práticas foram adotadas até a obtenção e teste do mesmo, em um trabalho conjunto entre as partes interessadas.

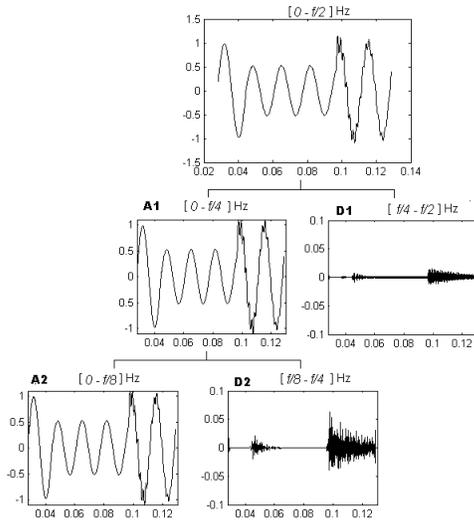


Fig.4. Princípio de aplicação da técnica de Análise Multiresolução utilizada para uma frequência de amostragem qualquer.

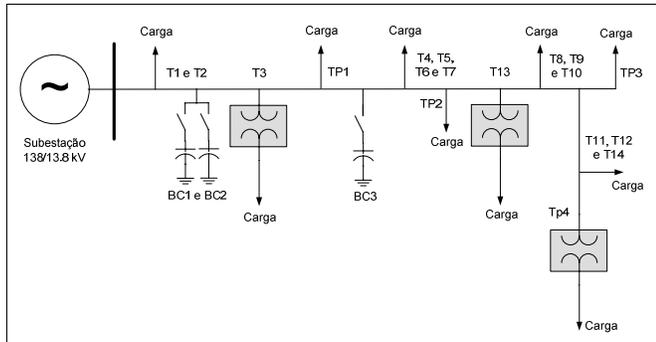


Fig. 5. Diagrama do sistema elétrico de distribuição analisado.

Na figura, o transformador da subestação (Subestação 138/13,8 kV, 25 MVA), os transformadores de distribuição 3 e 13 (T3 e 13, 45 kVA) e o transformador particular 4 (Tp 4, 45 kVA), que aparecem destacados, foram modelados considerando-se suas curvas de saturação. O modelo das cargas do lado secundário destes trafos segue características específicas que denotam situações reais de carga. Já os transformadores particulares 1, 2 e 3 (Tp1, 2 e 3) foram modelados sem considerar as respectivas curvas de saturação. 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. 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.

IV. BANCO DE DADOS

Após diversas análises realizadas dispondo do *software* ATP, considerando o sistema de distribuição mencionado, obteve-se a caracterização de diversos fenômenos, dentre eles, afundamento, elevação e interrupção de tensão, oscilação transitória, ruídos e a situação normal do sistema em regime permanente. Para a caracterização destes distúrbios, alguns parâmetros como ângulo de inserção, resistência e localização da falta, bem como o ponto de medição, foram variados. Desta forma obteve-se 649 fenômenos distribuídos como mostra a Tabela I. Vale lembrar que as situações foram simuladas a uma frequência de amostragem de 7.680 Hz, o que corresponde a 128 amostras por ciclo.

TABELA I
FENÔMENOS SUBMETIDOS AOS TESTES DE CLASSIFICAÇÃO DE DISTÚRBIOS

Fenômeno	Número de casos
Afundamento	80
Elevação	89
Regime	64
Interrupção	21
Ruídos	330
Transitórios Oscilatórios	65
Total	649

V. MÉTODO DE DETECÇÃO UTILIZANDO TW

Como parte inicial do algoritmo e também de suma importância, temos a detecção de uma eventual anormalidade no sistema. Ao ocorrer tal distúrbio, o algoritmo proposto dispondo da TW detecta e localiza no tempo o fenômeno indesejado. Para este papel de detecção de distúrbios, foi utilizado como *wavelet* mãe a sym4, não necessitando realizar testes para analisar a eficácia de outras *wavelets* mãe. Tendo localizado a eventualidade, este mesmo algoritmo armazena uma janela de um ciclo pós-distúrbio do sinal analisado para a extração de características inerentes ao ocorrido. Este sinal de um ciclo pós-distúrbio contém 128 amostras e é decomposto em sete níveis de acordo com a AMR.

A Fig. 6 apresenta alguns casos de afundamentos de tensão com destaque às informações referentes ao ciclo após a detecção direcionadas à classificação do distúrbio.

Na Fig. 7 são ilustrados alguns casos de elevações de tensão pelos ciclos pós-deteção. Para ressaltar a idéia, tem-se que estes dados contendo 128 amostras passarão pela técnica de AMR sendo posteriormente submetidos à classificação propriamente dita.

No que segue, as Fig. 8 e 9, apresentam respectivamente as informações de ruídos incorporados ao sinal e os transitórios

oscilatórios provenientes do chaveamento de bancos de capacitores sobre o sistema elétrico.

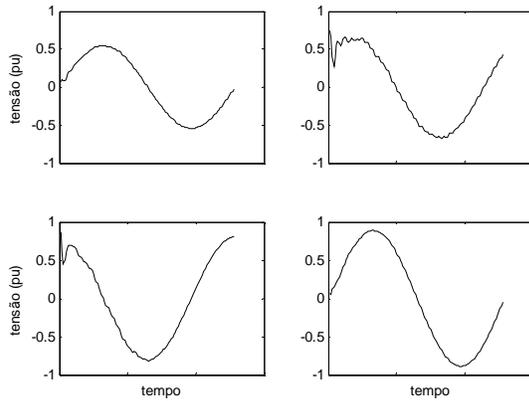


Fig. 6. Afundamentos de tensão submetidos à classificação do distúrbio.

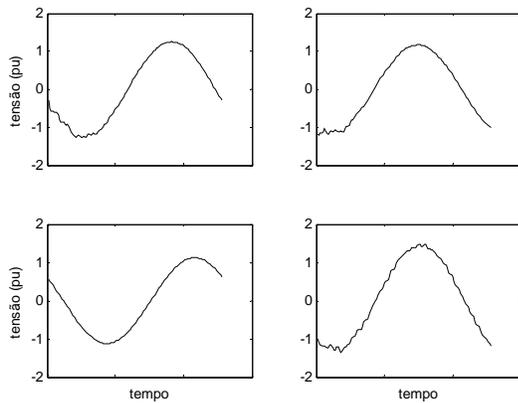


Fig. 7. Elevações de tensão que serão submetidos à classificação.

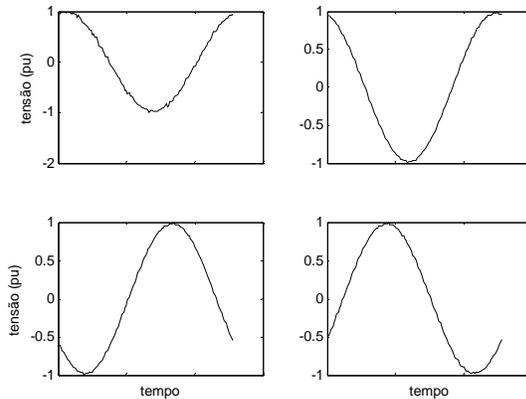


Fig. 8. Ruídos agregados aos sinais de tensão que serão submetidos à classificação.

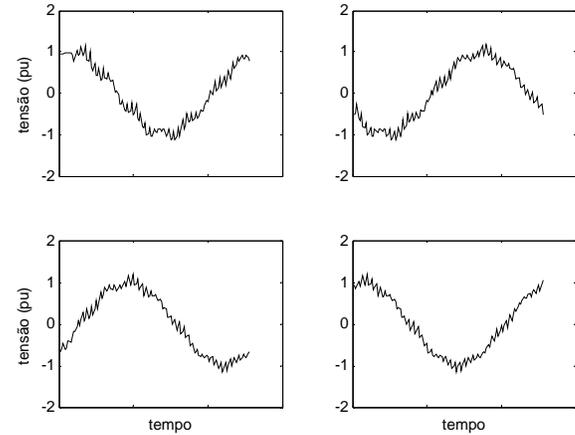


Fig. 9. Transitórios oscilatórios provenientes do chaveamento de banco de capacitores que serão submetidos à classificação.

Somando-se aos casos ilustrados, têm-se ainda as situações de interrupção do fornecimento da energia, bem como os casos de regime permanente, ou operação normal do sistema. Diante de uma exata detecção da incidência destas situações sobre as formas de ondas em análise, o módulo responsável pela técnica de AMR será ativado, decompondo os sinais em sete níveis. Cada nível representando uma faixa espectral conforme ilustrado na Tabela II.

VI. MÉTODO DE CLASSIFICAÇÃO UTILIZANDO TW

Este método de classificação é totalmente baseado na TW e os resultados a serem apresentados correspondem à análise dos 649 distúrbios já mencionados. Os resultados provêm da decomposição pela AMR em sete níveis de um ciclo pós-deteção, utilizando para isto, três diferentes tipos de *wavelet* mães: *Haar*, *db4* e *sym4*. Por esta pesquisa, será apontado qual dos três tipos apresentou os melhores resultados.

TABELA II

FAIXAS DE FREQUÊNCIAS PROVENIENTES DA AMR DE UM SINAL COM TAXA AMOSTRAL DE 7680 HZ

Faixa de Frequência (Hz)	
Níveis	Detalhes
1º	1920-3840
2º	960-1920
3º	480-960
4º	240-480
5º	120-240
6º	60-120
7º	30-60

A. Haar

A *wavelet* mãe que apresenta bons resultados como classificador de padrões é a *wavelet* de *Haar*. Tal afirmação decorre devido as suas características de simetria e descontinuidade. A Tabela III mostra os resultados da aplicação da *wavelet* de *Haar* para decompor um ciclo pós-

detecção em AMR. A média de acertos total ficou em 96,3%. Porém os distúrbios de afundamento, interrupção de tensão e a situação em regime permanente tiveram 100% de acertos para a classificação. No caso de elevações de tensão, onde o conjunto de dados compreende 89 distúrbios, o algoritmo apresentou 97,8 % de índice de acertos. Isto corresponde a apenas dois casos em que o algoritmo confundiu as situações apresentadas com transitórios oscilatórios. Os casos de ruídos presentes nos sinais de tensão analisados apresentaram 96,9 % de acertos na classificação. Tal percentagem representa 10 casos em que o algoritmo os confundiu com outro distúrbio, neste caso, 9 classificados como regime permanente e 1 como transitório oscilatório. Os transitórios oscilatórios que compreendem 65 distintas situações apresentaram um índice de acertos de 83,1 %. Este índice, considerado baixo, se deve em razão da confusão feita pelo algoritmo em 11 casos, classificando-os como ruídos, visto que muitas das situações se encontram na mesma faixa espectral.

TABELA III
RESULTADOS DA CLASSIFICAÇÃO VIA TW UTILIZANDO A WAVELET DE HAAR

Fenômeno	Número de casos	Classificação
Afundamento	80	100 %
Elevação	89	97,8 %
Regime	64	100 %
Interrupção	21	100 %
Ruídos	330	97 %
Transitórios Oscilatórios	65	83,1 %

B. *db4*

Os resultados da classificação de distúrbios utilizando a *db4* para decompor um ciclo pós-detecção (128 amostras) em AMR mostraram que esta *wavelet* mãe não é a mais adequada a este fim, quando comparada às outras duas. Esta *wavelet* mãe não veio a apresentar bons resultados como classificador de padrões por ter em suas características a suavidade e a continuidade. Os percentuais de acertos para os distúrbios com frequência principal em 60 Hz, ou seja, afundamento, elevação e interrupção de tensão, foram superiores a 80%. Já para os casos de transitórios oscilatórios e ruídos, o percentual de acertos foi inferior a 50%.

C. *sym4*

A utilização da *wavelet* mãe *sym4*, também não apresentou resultados satisfatórios por ter as mesmas características da *db4*, ou seja, continuidade e suavidade. O teste com esta *wavelet* mãe se deu na tentativa de se utilizar uma única *wavelet* mãe em todo o algoritmo. Os índices de acertos foram parecidos com os apresentados pela *db4* e isto acontece pelo conflito que ocorre na diferenciação entre transitórios

oscilatórios e ruídos que não chegaram a 50% de acertos. Os casos de afundamentos, elevações e interrupções de tensão apresentaram uma taxa de acertos pouco superior a 85%.

A Tabela 25 mostra os mesmos resultados da tabela anterior, porém no formato de uma matriz em que as linhas correspondem à quantidade de distúrbios em que o algoritmo deveria classificar corretamente, e as colunas representam o que o algoritmo realmente classificou. Na primeira linha, como temos 80 casos de afundamento de tensão e como o algoritmo classificou corretamente os 80 casos, as demais colunas referente a esta linha não apresentaram nenhum valor diferente de 0. O mesmo não aconteceu na segunda linha, onde ao todo temos 89 casos de elevação de tensão. Destes, apenas 2 casos foram incorretamente classificados como transitórios oscilatórios e o restante, 87 casos, foram corretamente classificados como elevação de tensão.

TABELA IV
RESULTADOS DA CLASSIFICAÇÃO VIA TW UTILIZANDO A WAVELET DE HAAR

Fenômenos	Afun.	Elev.	Reg.	Inter.	Rui.	T.O.
Afun. (80)	80	0	0	0	0	0
Elev. (89)	0	87	0	0	0	2
Reg. (64)	0	0	64	0	0	0
Inter. (21)	0	0	0	21	0	0
Rui. (330)	0	0	9	0	320	1
T.O. (65)	0	0	2	0	9	54

VII. CONCLUSÕES

Como afirmações, podemos citar a precisão na detecção dos diversos distúrbios estudados e também o alto índice na porcentagem de acertos com relação à classificação dos mesmos.

A proposta inicialmente apresentada para o processamento e análise dos dados relativos às formas de onda da tensão se mostrou muito eficiente para estudos de QEE. Neste trabalho abordou-se o emprego da TW para extrair as principais características da forma de onda do sinal de tensão imediatamente após sua detecção, decompondo até o sétimo nível de resolução.

Estas técnicas de transformação foram utilizadas para pré-processar o sinal de tensão e em seguida enviá-lo ao algoritmo de classificação baseado e composto exclusivamente pela TW.

Um importante detalhe foi à preocupação na escolha da melhor *wavelet* mãe para a função de classificação de padrões, visto que até então, não se era utilizado esta ferramenta para tal função.

Cabe comentar que esta metodologia mostra-se muito eficiente para uma eventual aplicação *on-line* decorrente da rapidez na classificação e o baixo tempo computacional para processar as informações apresentadas.

VIII. BIBLIOGRAFIA

- [1] L. Angrisani; P. Daponte; M.A. D'Apuzzo. "Method Based on Wavelet Networks for the Detection and Classification of Transients." IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, v.2, p.903-908, May. 1998.
- [2] S. Santoso. "Power Quality Disturbance Waveform Recognition Using Wavelet-Based Neural Classifier - Part1: Theoretical Foundation." IEEE Transactions on Power Delivery, v.15, n.1, p.222-228, Jan. 2000.
- [3] S. Santoso. "Power Quality Disturbance Waveform Recognition Using Wavelet-Based Neural Classifier - Part 2: Application." IEEE Transactions on Power Delivery, v.15, n.1, p.229-235, Jan. 2000.
- [4] D. Borrás, M. Castilha, N. Moreno, J.C. Montañó. "Wavelet and Neural Structure: A new tool for diagnostic of power system disturbances." IEEE Transactions on Industry Applications, v.37, n.1, p.184-190, Jan. 2001.
- [5] J. Huang, M. Negnevitsky, D. T. Nguyen. "A Neural-Fuzzy Classifier for Recognition of Power Quality Disturbances." IEEE Transactions on Power Delivery, 17, 2, 609-616, April, 2002.
- [6] M. Kezunovic e Y. Liao. "A Novel Software Implementation Concept for Power Quality Study". IEEE Transactions on Power Delivery, 17, 2, 544-549, April, 2002.
- [7] Alternative Transients Program, *Rule Book*, Leuven EMTF Center (LEC), 1987.
- [8] MatLab®, *Wavelet Toolbox*, The MathWorks, Inc., 1996-1997.
- [9] P. C. Lima. *Wavelets: Teoria, Algoritmos e Aplicações*. Belo Horizonte: Departamento de Matemática - ICEX - UFMG. 2002.
- [10] E.F. Arruda, O.F. Delmont, D.V. Cury, A. A. F. M. Carneiro, Um Estudo das Famílias *Wavelets* Aplicadas à Qualidade da Energia Elétrica. Congresso Brasileiro de Automática – CBA2002, 6p, Natal/RN, 2002.
- [11] P. S. Addison. *The illustrated Wavelet Transform Handbook: Introductory Theory and Applications in Science, Engeneering, Medicine and Finance*. Edinburg-UK: Institute of Physics Publishing, 2002.
- [12] X. Zhang, T. Yoshikawa. A new class of complex compact-supported orthonormal symmlets. IEICE Trans. Fundamentals, v. E84-A, n.7, p. 1740-1746, Jul, 2001.
- [13] C. S. Burrus, R. A. Gopinath, and H. Guo, H., *Introduction to wavelets and wavelet transforms: a primer*, New Jersey, Prentice Hall, 1998.
- [14] Delmont Fº, O. "Utilização da transformada *wavelet* para caracterização de distúrbios na qualidade da energia elétrica". São Carlos. 92 p. Dissertação (Mestrado) – EESC, Universidade de São Paulo, 2003.

IX. BIOGRAFIA

Odilon Delmont Filho é formado em Matemática pela Universidade Federal de São Carlos, em 2001. Ele recebeu o título de Mestre em Sistemas de Potência pela Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo em 2003. Atualmente está fazendo Doutorado em Engenharia Elétrica na Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Suas principais áreas de pesquisa são: qualidade da energia, Transformada *Wavelet* e Transformada de *Fourier* (delmont@sel.eesc.sc.usp.br).

Mario Oleskovicz é graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Obteve os títulos de Mestre e Doutor em Engenharia Elétrica pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo (USP) em 1997 e 2001, respectivamente. Atualmente é professor doutor junto ao Departamento de Engenharia Elétrica (EESC-USP). Dentre as áreas de interesse destacam-se a proteção digital de sistemas elétricos de potência e a qualidade da energia elétrica.

Adriano Alber de França Mendes Carneiro é engenheiro eletricista (1970 – FEI-PUC), mestre em engenharia (1980 - UNIFEI) e doutor em engenharia (1990 – UNICAMP). É professor da Escola de Engenharia de São Carlos – USP, desde 1990, e suas áreas principais de atuação são: planejamento da operação e da expansão da geração de sistemas hidrotérmicos de potência e qualidade da energia elétrica.