

Sistema de Diagnóstico Inteligente das Condições Operativas de Disjuntores em Subestações de Transmissão da Eletronorte

J. N. Garcez, A. R. G. Castro, R. C. L. Oliveira, A.C. do Nascimento, E. Pelaes, A. B. R. Klautau, R. R. da Silva, R. S. Marinho, J. M. A. Vale, R. J. S. Lemos, M. C. P. Fonseca, NESC-UFPA, O. G. S. Filho, Eletronorte

Resumo - O trabalho descreve o desenvolvimento do Protótipo de um Sistema de Monitoramento e Diagnóstico de Disjuntor de Alta Tensão para Subestações de Transmissão da Eletronorte, composto de: Módulo de Aquisição de Sinais, Módulo de Processamento de Sinais e Módulo de Diagnóstico do Estado Operativo do Disjuntor.

Os dados para diagnóstico pelo Sistema de Monitoramento foram obtidos de disjuntores a SF6, de 230 e 500 kV, disponíveis como reserva, bem como de outros em operação, desligados para intervenções rotineiras de manutenção em diversas subestações da Eletronorte no Estado do Pará.

O Sistema desenvolvido propiciará vários benefícios para empresa, contribuindo para maior disponibilidade, extensão dos intervalos de manutenção periódicos, aumento de confiabilidade e segurança, contribuindo também na melhoria dos indicadores de desempenho do sistema de transmissão da empresa.

Palavras-chave — Disjuntor, Monitoramento, Diagnóstico, Transformada Wavelet, Inteligência Computacional.

I. INTRODUÇÃO

O monitoramento das condições operativas de um disjuntor é de grande importância para a integridade global de um sistema de energia elétrica. A compreensão dos mecanismos das falhas e do tempo de vida deste equipamento é importante para a operação e planejamento do sistema e, em consequência, as empresas passaram a investir significativamente em sistemas de monitoramento e diagnóstico com o objetivo de detectar possíveis falhas incipientes em equipamentos de suas subestações.[1]

Tradicionalmente, o estado operativo dos equipamentos do sistema de energia elétrica é avaliado através de ensaios, nos quais a instrumentação analógica (pontes, analisadores de gás, dispositivos eletroacústicos, etc.) é comumente empregada. A utilização destes dispositivos possibilita a aquisição de informações importantes. Entretanto, tais informações podem ser consideradas, em alguns casos, insuficientes para o propósito de diagnóstico.

Em geral, muitos dos indicadores da condição de um equipamento são imprecisos e/ou não realizáveis. Os engenheiros devem ter considerável experiência com um ensaio particular, antes que este possa ser considerado útil, devido a certos aspectos subjetivos dos métodos de medições empregados, e à própria natureza estocástica de alguns fenômenos medidos.

Nos últimos anos, um número considerável de pesquisas vem sendo desenvolvidas na área de inteligência computacional aplicada a sistemas de diagnóstico de equipamentos. A evolução destas técnicas em conjunto com a crescente capacidade de processamento dos computadores, torna possível a criação de sistemas capazes de inferir sobre um conjunto de informações específicas, gerando assim o conceito de *Sistemas de Diagnóstico Inteligentes* [2 – 3].

Apesar das diferenças de aproximações e tecnologias usadas para o projeto de tais sistemas, todas metodologias resumem-se fundamentalmente a um problema de classificação de padrões: a tarefa de atribuir um determinado padrão de entrada (por exemplo, medidas de temperatura, sinais de corrente) à alguma categoria ou classe (problema).

Um sistema de monitoramento das condições operativas de um disjuntor é composto basicamente por sensores não invasivos, que coletam dados como corrente, temperatura, vibração do equipamento, condicionam apropriadamente estes sinais enviando-os a um computador para armazenamento e processamento a fim de reconhecer as assinaturas das possíveis falhas e fornecer o diagnóstico do equipamento. [4 – 7]

II. ARQUITETURA DO SISTEMA DE MONITORAMENTO E DIAGNÓSTICO DE DISJUNTORES

O sistema de Instrumentação Virtual, utilizado para aquisição, condicionamento, processamento e diagnóstico de sinais usado no projeto, monitora, para cada um dos pólos do disjuntor:

- Dois canais de vibração, para aquisição dos sinais de acelerômetros instalados na parte externa do disjuntor;
- Um canal de contato, utilizado para obter o tempo de abertura do disjuntor, através da leitura do status do mesmo por contato auxiliar;
- Um canal de corrente, utilizado para verificar a forma de onda da corrente das bobinas de abertura e fechamento do disjuntor.

Compõe ainda o sistema:

- Um computador, usado para gerenciar o monitoramento, (Notebook HP – COMPAQ, Pentium IV, 2.8 GHz, 512 Mb, HD de 60Gb, tela de 15”);
- Uma placa de aquisição de sinais, com a interface PCMCIA, para ser encaixada no Notebook. A placa de aquisição é a NI 6024E (778269-01) da National

Este trabalho foi apoiado pela Eletronorte – Centrais Elétricas do Norte do Brasil, através de seu programa de Pesquisa e Desenvolvimento, Ciclo 2001/2002.

J. N. Garcez, A.R.G.Castro, R.C.L Oliveira, A.B.R.Klautau, E.G. Pelaes são professores Pesquisadores do Nesc – Núcleo de Energia, Sistemas e Comunicação do Departamento de Engenharia Elétrica e da Computação da UFPA (e-mail : jgarcez@ufpa.br)

A. C. Nascimento, R.R. da Silva, J. M. A. Vale, R.J. S. Lemos são alunos do curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPA.

R. S. Marinho, M.C. P. Fonseca são alunos do curso de graduação em Engenharia Elétrica da UFPA.

O.G.S. Filho é Engenheiro da Eletronorte

Instruments tem Interface CB-68LP (777145-01) e Cabo RC68-68 (187252-01) para conexão ao módulo de condicionamento de sinal.

O módulo de condicionamento de sinal instalado em uma maleta contém:

- Entrada para a alimentação do sistema em 127V AC;
- Entrada do cabo de ligação da placa de aquisição;
- Entradas para os 12 canais de aquisição.

Internamente o condicionador é composto por diversas funções integradas por componentes ou módulos prontos, os quais serão responsáveis, desde a alimentação dos sensores e aquisição dos sinais, até a entrega desses sinais de uma forma acessível à placa de aquisição.

No projeto são utilizados dois tipos de sensores:

- Acelerômetros ICP de uso geral, tipo 784A com sensibilidade de 100mV/g, a 25 graus, tolerância de sensibilidade de 20%, faixa de aceleração até 50 g de pico, frequência de ressonância 25KHz;
- Sensores de corrente constituídos de três pontas de provas de corrente, Tektronix A622, com saídas compatíveis com as entradas de aquisição de sinais;

Para a leitura dos contatos auxiliares não foi utilizado nenhum sensor específico, desenvolvendo-se circuitos para medição dos tempos de abertura e fechamento.

A Figura 1 mostra os componentes do Sistema de Aquisição e Condicionamento de Sinais.



(a)



(b)

FIGURA 1 – Sistema de Aquisição e Condicionamento de Sinais
(a) Condicionador, Sensores de Corrente e Acelerômetro;
(b) Notebook, Condicionador e Sensores

III. SOFTWARE E INSTALAÇÃO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE SINAIS

O software do sistema de aquisição de sinais instalado em Notebook, com soft PCMCIA para a placa de aquisição, foi desenvolvido através de duas ferramentas principais: o LabVIEW e o SQL Server.

O LabVIEW é responsável pela realização de diversas funções, como:

- Administração de usuários;
- Cadastro de disjuntores;
- Cadastro de aquisições;

- Configuração da placa de aquisição de sinais;
- Aquisitar os sinais;
- Gravar sinais no banco de dados;
- Visualizar sinais coletados;
- Importar dados para arquivos padrão ASCII.

O SQL Server tem uma dupla função no projeto, ou seja, no desenvolvimento e o gerenciamento do banco de dados, precisando para isso, estar ativo durante a aquisição dos sinais.

A instalação do sistema de aquisição nos disjuntores é feita de maneira rápida e simples, consistindo na fixação dos acelerômetros na base dos disjuntores, ligação dos sensores à caixa de condicionamento para a aquisição dos sinais de aceleração e ligação dos contatos auxiliares dos disjuntores à caixa de condicionamento para aquisição dos sinais de fechamento e abertura dos disjuntores.

A caixa de condicionamento de sinais foi inicialmente projetada para adquirir um canal de vibração e um canal de contato, para testes e consolidação dos circuitos de condicionamento. A partir dos testes realizados em campo, a caixa de condicionamento foi ampliada para dez canais de vibração, três canais de corrente da bobina de abertura e fechamento, e três canais de contatos auxiliares de abertura/fechamento dos disjuntores.

O sinal do sensor de vibração é levado até a placa de condicionamento através de um cabo coaxial para evitar sobreposição de ruídos induzidos pelo ambiente de operação. Na placa de condicionamento de sinais é feito um tratamento de filtragem dos sinais indesejáveis e amplificação do sinal de vibração, antes da captura do evento pelo sistema de software de aquisição do sinal.

Um dos contatos auxiliares de abertura/fechamento do disjuntor localizado no painel de comando é conectado à caixa de condicionamento utilizando cabos comuns de alimentação.

A alimentação dos circuitos de condicionamento é fornecida pelo painel de comando dos disjuntores, através do cabo de alimentação.

A Figura 2 apresenta detalhes do processo de instalação do Sistema de Aquisição de Sinais de um Disjuntor.



(a)



Figura 2 – Instalação e Aquisição de Sinais de um Disjuntor
 (a) Instalação do Sensor;
 (b) Instalação do Módulo de Aquisição e Condicionamento de Sinais;

IV. RECONHECIMENTO DAS ASSINATURAS DOS SINAIS DE VIBRAÇÕES

O Método da Transformada *Wavelet* incorpora técnicas de multi-resolução para extrair características dos sinais transitórios, enquanto retém as propriedades de localização tempo-frequência. A análise multi-resolucional apresenta as seguintes vantagens quando comparada a Técnica de Fourier: [8 – 10]

- Uma boa localização na frequência e no tempo implica em que, desvios transitórios, curtos e longos de um espectro de vibração não-estacionário, podem ser identificadas e localizadas simultaneamente no tempo e na frequência com mais flexibilidade que através da Transformada de *Fourier*;
- Uma boa localização espacial significa que, grandes conjuntos de dados podem ser compactados em poucos coeficientes diferentes de zero;
- Algoritmos rápidos são obtidos;
- Capacidade de analisar uma área localizada de um sinal (instante de ocorrência do evento transitório).

A Transformada *Wavelet* discreta transforma um sinal discreto no domínio do tempo para o domínio *Wavelet* usando o processo de codificação por sub-bandas, realizada através da filtragem digital, ou seja, uma convolução do sinal com a resposta impulso do filtro. O algoritmo de codificação decompõe o sinal original em diferentes escalas (ou níveis) com diferentes resoluções no tempo e na frequência, conforme ilustra a Figura 3.

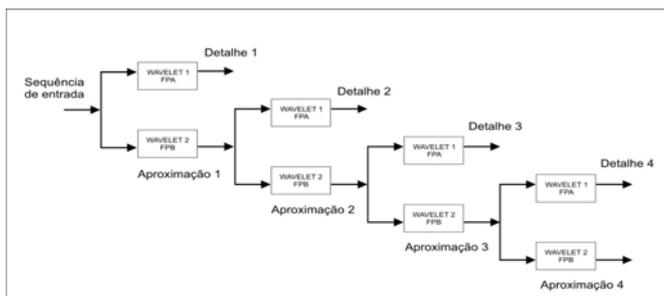


Figura 3 – Multi-Resolução e Decomposição de um Sinal em 4 Níveis.

A Figura 4 mostra a decomposição de um sinal de abertura de um disjuntor e as saídas dos filtros *Wavelet* de Daubechies de ordem 10, até o nível 2.

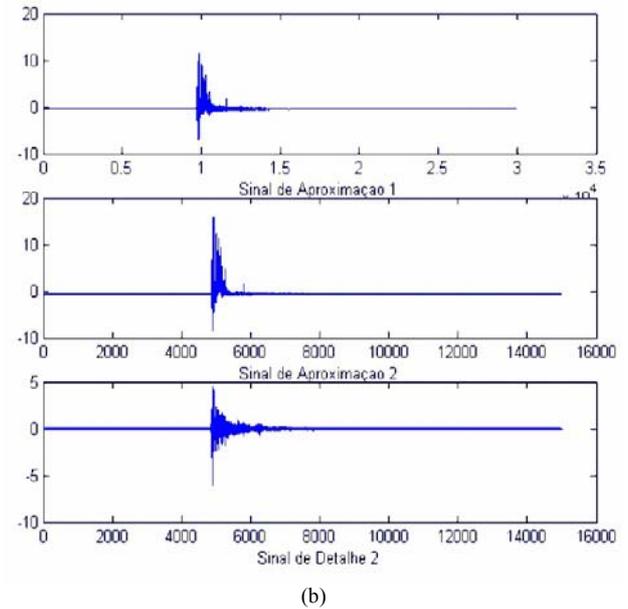
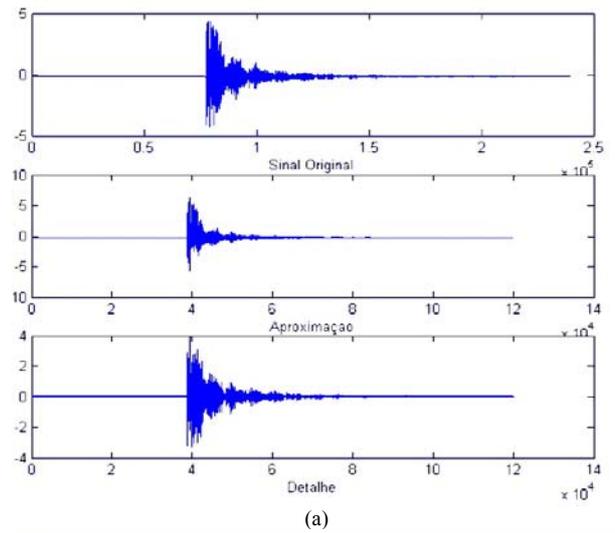


Figura 4 – Saída dos filtros *Wavelets* de Daubechies de Ordem 10, nos níveis 1 e 2
 (a) Saída do Nível 1; (b) Saída do Nível 2.

O coeficiente de *Wavelet* dos sinais de aproximação e detalhes, bem como a energia associada a estes sinais podem caracterizar a assinatura de um sinal de vibração adquirido pelos acelerômetros. A metodologia proposta foi desenvolvida em um programa digital implementado para utilizar a plataforma MATLAB, ou LABVIEW.

V. SISTEMA INTELIGENTE PARA O DIAGNÓSTICO DE DISJUNTORES

Várias metodologias foram analisadas para o desenvolvimento do sistema inteligente de diagnóstico, entre as quais: Redes Neurais Artificiais (Perceptron, Kohonen, Rede de Base Radial) e Lógica Difusa (Takagi-Sugeno de ordem zero, Takagi-Sugeno de primeira ordem).

Procurando aliar as vantagens oferecidas por ambos os métodos (redes neurais e lógica difusa) e suprir as desvantagens dos mesmos, optou-se pelo desenvolvimento do sistema inteligente de diagnóstico baseado em uma nova metodologia chamada TFRENN (Extração de regras difusas a partir de redes neurais artificiais), que permite a extração de regras difusas transparentes a partir de redes neurais [11-13]. A importância de se obter regras difusas transparentes

deve ser ressaltada devido ao fato de que estas permitem uma completa compreensão por parte dos seres humanos (especialistas, operadores,...) do conhecimento capturado pela rede neural para um determinado problema. Para o desenvolvimento do sistema inteligente de diagnóstico, usando a metodologia TFRENN, as seguintes fases devem ser realizadas:

- Treinamento da Rede Neural do Tipo Perceptron: Backpropagation com restrições;
- Dados de entrada da rede neural: Características wavelets extraídas dos sinais de vibração para cada situação (falta ou situação normal);
- Dados de Saída da rede neural: Tipo de falta no disjuntor ou indicação de situação normal;
- Testes e Validação da Rede Neural Perceptron:
- Após treinamento da rede, testes devem ser realizados para validação da mesma a partir de dados não utilizados durante a fase de treinamento;
- Extração das regras difusas: Com a rede neural devidamente validada, pode-se então iniciar o processo de extração das regras difusas transparentes (Metodologia TFRENN) que nos propiciará um sistema com regras de acordo com a Figura 5.

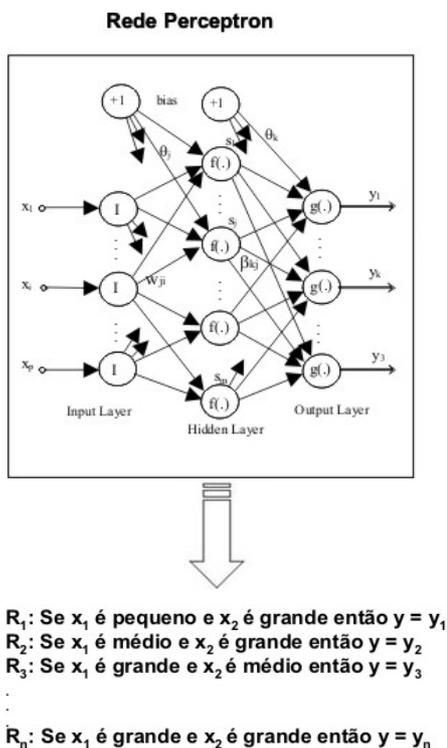


Figura 5 – Sistema Difuso a ser Extraído da RNA

Com x₁, x₂ e x₃ sendo os coeficientes wavelets utilizados como entrada para o sistema e as funções de pertinência do sistema difuso transparente de acordo com a Figura 6.

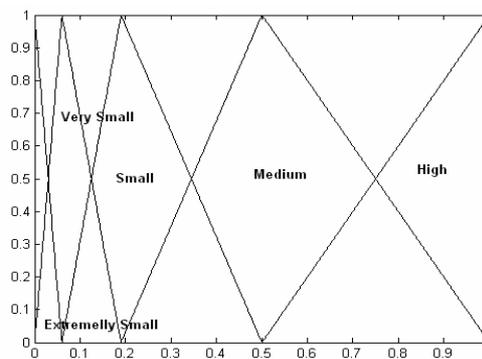
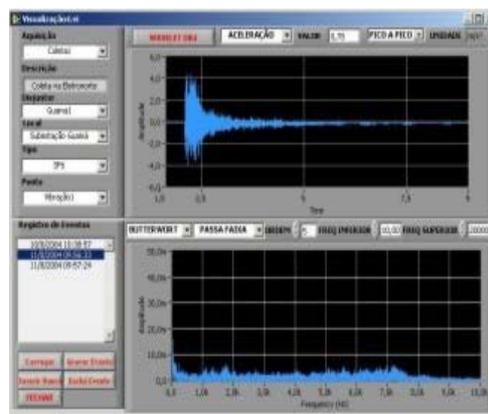


Figura 6 – Funções de Pertinência do Sistema Difuso Extraído

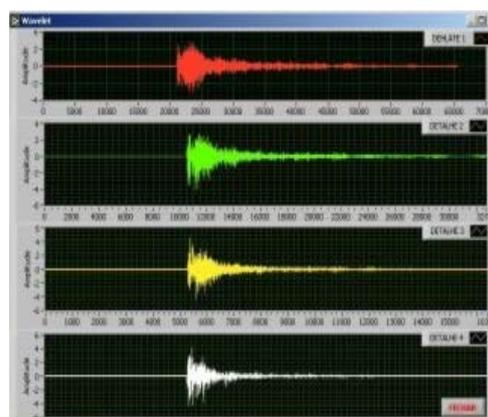
VI. MEDIDAS EM CAMPO

Para teste e validação do Sistema de Monitoramento e Diagnóstico em desenvolvimento foram realizadas ensaios em Disjuntores de Subestações da Eletronorte em Belém – Guamá, Belém – Utinga e Vila do Conde – Barcarena.

A Figura 7 mostra alguns resultados obtidos através do Sistema de Aquisição e Condicionamento de Sinais em um disjuntor SF6 da subestação Guamá em situação normal, após o processamento pelo software SISMD.



(a)



(b)

Figura 7 – Identificação das Assinaturas dos Sinais

(a) Sinal de Vibração;

(b) Decomposição em Detalhes, usando Daubechies – 4.

Para ilustrar a aplicação da metodologia utilizada para diagnosticar o estado operativo do disjuntor, considera-se o caso de abertura de um disjuntor, em condição operativa normal, realizando-se 8 decomposições do sinal através da Wavelet de Daubechies de ordem 10 (db10).

Um programa, DECWAVEN em matlab, faz a decomposição esboçando o gráfico do sinal original e de suas aproximações e detalhes. O programa fornece na saída, os coeficientes de aproximação, detalhes e energia. O sinal adquirido e processado são mostrados na Figura 4, sinal original. Os coeficientes dos Filtros Wavelets de ordem 10 com 8 níveis de decomposição, são mostrados na Tabela 1.

TABELA 1 – Coeficientes Wavelet de Daubechies – db10 - Abertura de Disjuntor

Filtros de Decomposição		Filtro de reconstituição	
Passa Baixa FPB	Passa Altas FPA	Passa Baixa FPB	Passa Altas FPA
-0.0000	-0.0267	0.0267	-0.0000
0.0001	0.1882	0.1882	-0.0001
-0.0001	-0.5272	0.5272	-0.0001
-0.0007	0.6885	0.6885	0.0007
0.0020	-0.2812	0.2812	0.0020
0.0014	-0.2498	-0.2498	-0.0014
-0.0107	0.1959	-0.1959	-0.0107
0.0036	0.1274	0.1274	-0.0036
0.0332	-0.0931	0.0931	0.0332
-0.0295	-0.0714	-0.0714	0.0295
-0.0714	0.0295	-0.0295	-0.0714
0.0931	0.0332	0.0332	-0.0931
0.1274	-0.0036	0.0036	0.1274
-0.1959	-0.0107	-0.0107	0.1959
-0.2498	-0.0014	0.0014	-0.2498
0.2818	0.0020	0.0020	-0.2818
0.6885	0.0007	-0.0007	0.6885
0.5272	-0.0001	-0.0001	-0.5272
0.1882	-0.0001	0.0001	0.1882
0.0267	0.0000	-0.0000	-0.0267

Os vetores contendo os coeficientes wavelets de aproximação, detalhes e energia constituirão a assinatura do sinal de vibração adquirido do disjuntor. Repetindo-se os ensaios para outras condições operativas, envolvendo operação de abertura e fechamento do disjuntor, pode-se construir um banco de assinaturas de falhas, necessário para o treinamento da rede responsável pelo diagnóstico inteligente.

VII - CONCLUSÕES

Este artigo apresentou o desenvolvimento do protótipo de um Sistema de Monitoramento e diagnóstico on – line das Condições Operativas de Disjuntores de Subestações de Transmissão da Eletronorte, baseado nas Assinaturas de sinais de vibração adquiridos por Acelerômetros instalados nos Disjuntores e um Sistema de Diagnóstico Inteligente Constituído de uma Rede Neural desenvolvida com bases na metodologia TFRENN (Extração de Regras Difusas a partir de Redes Neurais Artificiais).

No estágio atual de desenvolvimento do projeto é impossível a formulação de um diagnóstico, uma vez que, para o treinamento e validação da Rede Neural, necessita-se de um grande volume de ensaios nos disjuntores, simular os

modos de falhas mecânicas e melhorar aspectos relacionados à compatibilidade eletromagnética do Sistema de Medição.

Os resultados obtidos são altamente promissores, apesar do curto-tempo disponibilizado para o desenvolvimento do projeto. Benefícios do Sistema, como, diminuição do tempo de indisponibilidade, ganhos financeiros decorrentes da ampliação dos intervalos de manutenção, apontam para uma relação custo / benefício que justifica a viabilidade da aplicação de técnicas modernas de processamento de Sinais e Inteligência Computacional a problemas de Manutenção Preditiva.

VIII - REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] M. Milaschy, “Manutenção de Disjuntores de Alta Tensão”, Gráfica Cervantes, Editora Ltda – 1993;
- [2] J. L. Aravena, “A New Approach to Fast Fault Detection in Power Systems”, Proceeding of the International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems, pp 328-331, Orlando, Jan-Feb, 1996;
- [3] W. Zhenyuan, “Artificial Intelligence in Power Equipment Fault Diagnosis”, Proceedings of IEEE PES Winter Meeting, Singapore, Jan 2000;
- [4] M. Runde, “Vibration Analysis of Diagnostic Testing of Circuit-Breakers”, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol 11, N° 4, October, pp 1816-1823, 1996;
- [5] M. Stanek, K. Frohlich, “Model – Aided / Diagnosis – A New Method for On-Line Condition Assesment of High Voltage Circuit-Breakers”, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol 15, N° 2, April, pp 585-591, 2000;
- [6] A. A. Polycarpou, A. Soom; V. Swarnakar, J. W. Porter, “Event Timming and Shape Analysis of Vibration Bursts from Power Circuit Breakers”, IEEE – Trans. on Power Delivery Vol. 11, N° 2 – April 1996 – pp. 848 – 857;
- [7] D. S. S. Lee, B. J. Lithgow, R. E. Morrison, “New Fault Diagnosis of Circuit Breakers”, IEEE – Trans. On Power Delivery, Vol. 18, n° 2 – April 2003 – pp. 454 – 457.
- [8] C. H. Kim, R. Aggarwal, “Wavelet Transforms in Power Systems” Part 1: General Introduction – Power Eng. Journal – April 2000, pp. – 81.87;
- [9] C. H Kim, R. Aggarwal, “Wavelet transforms in Power Systems” Part 2: Examples of Application to Actual Power System Transients – Power Eng. Journal – August 2001, pp. – 193 - 2002;
- [10] G. G. Yen, K. C. Lin, “Wavelet Packet Feature Extraction for Vibration Monitoring”, IEEE – Trans. Industrial Electronics, Vol. 47, N° 3, June 2000 – pp. 650 – 667;

Dissertações e Teses:

- [11] A. R. G. Castro, “Knowledge Extraction from Artificial Neural Networks – Application to Transformer Incipient Fault”, Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, Agosto 2004;

Artigos em Anais de Conferências (Publicados):

- [12] A. R.G. Castro, V. Miranda, “ An Interpretation of Neural Networks as Interference Engines With Application to Transformer Failure Diagnosis”, 8th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems – PMAPS’2004, Ames Iowa, USA, 2004;
- [13] A. R. G. Castro, V. Miranda, “Mapping Neural Networks Into Rules Sets and Making Their Hidden Knowledge Explicit”, 14th Power Systems Computation Conference, 2002, Seville – Proceedings of 14th Power Systems Computation Conference, 2002;