

Giscard Francimeire Cintra Veloso

**Localização de Descargas Parciais em
Transformadores pela Análise da Emissão
Acústica**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Itajubá como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração:
Automação e Sistemas Elétricos Industriais

Orientador:
Luiz Eduardo Borges da Silva

Co-orientador:
Germano Lambert Torres

Itajubá, Março de 2006

Aos meus pais Gildésio e Cacilda

Agradecimentos

Aos professores Luiz Eduardo e Germano pela orientação, incentivo e apoio que resultaram neste trabalho.

Aos meus pais e minhas irmãs que não só me incentivaram, mas, com seu amor incondicional, me deram todo o apoio nesta caminhada, principalmente nos momentos difíceis.

À minha esposa Walkiria, que teve toda a paciência e me deu todo o carinho que me foram necessários para enfrentar os obstáculos.

À CAPES pelo apoio financeiro.

E, principalmente, a Deus que me inspirou e protegeu nesta jornada.

Sumário

Agradecimentos	i
Sumário	ii
Resumo	v
Abstract	vi
Lista de Figuras	vii
Lista de Tabelas	xi
CAPÍTULO 1	1
Introdução	1
1.1.- Considerações Iniciais	1
1.2.- O Monitoramento Acústico e a Localização de Descargas Parciais	2
1.3.- Organização da Dissertação	3
CAPÍTULO 2	4
Descargas Parciais	4
2.1.- Introdução	4
2.2.- Definição e Conceitos	4
2.2.1.- Características das Descargas Parciais	5
2.2.2.- Tipos de Descargas Parciais	7
2.3.- Descargas Parciais em Transformadores	10
2.4.- Medição de Descargas Parciais em Transformadores	11
2.4.1.- Medição Elétrica	12
2.4.2.- Medição Acústica	14
2.4.3.- Considerações sobre a Localização da Fonte de Descargas Parciais	15
2.5.- Breve Histórico sobre o Estudo de Descargas Parciais	15
2.6.- Considerações Finais	17
CAPÍTULO 3	18
O Método Acústico para Medição de Descargas Parciais	18
3.1.- Introdução	18
3.2.- A Técnica de Emissão Acústica	18
3.3.- Características das Ondas Acústicas Geradas por Descargas Parciais em Óleo	19
3.3.1.- Conceitos Básicos de Acústica	20
3.3.2.- Ondas de Superfície no Tanque do Transformador	25
3.4.- A Técnica de Emissão Acústica Aplicada em Transformadores	26
3.5.- Considerações Finais	27
CAPÍTULO 4	28
A Localização Física da Fonte de Descargas Parciais	28
4.1.- Introdução	28

4.2.- O Problema da Localização da Fonte de Descargas Parciais.....	28
4.3.- Estratégias para a Solução do Problema da Localização das Descargas Parciais	33
4.3.1.- A Detecção de Sinais.....	33
4.3.2.- A Solução do Sistema Não-linear	35
4.4.- Conclusões Preliminares	36
CAPÍTULO 5.....	37
Transformada Wavelet Discreta	37
5.1.- Introdução	37
5.2.- Visão Geral – Análise de Multi-resolução	37
5.2.1.- O Problema da Detecção de um Sinal Transitório	38
5.2.2.- Expansão de Sinais.....	41
5.2.2.1.- Espaço de Sinais.....	41
5.2.2.2.- Obtenção dos Coeficientes de Expansão.....	43
5.2.2.3.- Obtenção do Sinal	44
5.2.2.4.- Um Exemplo de Expansão de Sinais: A Série de Fourier.....	44
5.2.3.- A Transformada Wavelet Discreta.....	46
5.2.3.1.- Wavelets	46
5.2.3.2.- Expansão Wavelet e Multi-resolução.....	47
5.2.3.3.- Como Funciona a Transformada Wavelet.....	50
5.2.3.4.- Como são Calculados os Coeficientes	51
5.2.4.- Considerações sobre a Multi-resolução.....	54
5.3.- O Algoritmo da Transformada Wavelet Discreta	55
5.3.1.- Expansão no Espaço \mathcal{L}^2	56
5.3.2.- A Função Escala.....	57
5.3.2.- A Função Wavelet.....	63
5.3.4.- Bancos de Filtros e a Transformada Wavelet Discreta	68
5.3.4.1.- Análise.....	68
5.3.4.2.- A Análise Vista no Domínio da Frequência.....	72
5.3.4.3.- Níveis da Transformada Wavelet Discreta e os Coeficientes de Entrada..	73
5.3.4.4.- Síntese	75
5.3.4.5.- Teorema de Parseval	76
5.3.5.- Considerações sobre o Algoritmo da Transformada Wavelet Discreta	77
5.4.- Aplicação na Detecção de Sinais	77
5.5.- Conclusões Preliminares	81
CAPÍTULO 6.....	82
Algoritmos Genéticos na Estratégia de Localização	82
6.1.- Introdução	82
6.2.- Algoritmos Genéticos – Conceitos Básicos	82
6.3.- Descrição do Algoritmo Genético para a Localização de Descargas Parciais em Transformadores.....	85
6.4.- Simulação e Teste do Algoritmo Genético Desenvolvido	87
6.5.- Considerações Finais.....	90
CAPÍTULO 7.....	92
Experimentos	92
7.1.- Introdução	92
7.2.- O Tanque de Testes	92

7.3.- Os Sensores de Emissão Acústica.....	94
7.4.- O Equipamento de Aquisição de Dados.....	96
7.5.- As Experiências.....	96
7.5.1.- Medição de Velocidade.....	97
7.5.2.- Influência da Frente de Onda de Superfície.....	98
7.5.3.- Ensaio de Frentes de Onda Direta e de Superfície.....	100
7.5.4.- Ensaio para Teste do Algoritmo de Localização.....	101
7.6.- Considerações Finais.....	101
CAPÍTULO 8.....	103
Resultados.....	103
8.1.- Introdução.....	103
8.2.- Característica das Frentes de Onda Direta e de Superfície.....	103
8.3.- Teste do Algoritmo de Localização.....	114
8.4.- Considerações Finais.....	115
CAPÍTULO 9.....	116
Conclusões.....	116
9.1.- Trabalhos Futuros.....	116
Referências Bibliográficas.....	118

Giscard Francimeire Cintra Veloso

**Localização de Descargas Parciais em
Transformadores pela Análise da Emissão
Acústica**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Itajubá como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração:
Automação e Sistemas Elétricos Industriais

Orientador:
Luiz Eduardo Borges da Silva

Co-orientador:
Germano Lambert Torres

Itajubá, Março de 2006

Resumo

Os transformadores estão entre os equipamentos mais importantes do sistema elétrico. Interrupções não programadas geram grandes transtornos e enormes prejuízos financeiros. A única forma de se evitar paradas inesperadas por defeitos de qualquer natureza nestes equipamentos é através de uma boa estratégia de manutenção.

Um tipo de defeito que merece destaque por se desenvolver silenciosamente e ser capaz de produzir uma interrupção inesperada no transformador é a descarga parcial. Trata-se de um problema no sistema de isolamento, que se manifesta através de minúsculos arcos elétricos no interior do material dielétrico, causando sua degradação até culminar com a falha completa e possível destruição do equipamento. A atividade de descargas parciais em transformadores deve ser monitorada de forma a acompanhar a evolução deste problema para se planejar uma intervenção antes de ocorrer uma falha catastrófica.

Dentre as diferentes formas de medição de descargas parciais em transformadores, destaca-se a técnica de emissão acústica. Através dela, é possível captar sinais acústicos emitidos pelas descargas em um ponto qualquer do transformador. Uma de suas principais vantagens em relação às demais técnicas é sua capacidade de localizar as descargas parciais no interior do equipamento. Caracterizar os sinais acústicos emitidos por elas é uma tarefa muito importante para os métodos de localização.

Apenas detectar a atividade de descarga parcial no interior de um transformador não é suficiente para realizar uma manutenção eficiente deste equipamento. É necessário conhecer o local onde o defeito está se desenvolvendo, possibilitando uma avaliação do risco e o planejamento da intervenção.

Este trabalho tem como objetivo apresentar o desenvolvimento de um algoritmo de localização de descargas parciais em transformadores utilizando sinais acústicos. Trata-se de um trabalho inicial, onde são desenvolvidas as ferramentas básicas para realização desta tarefa, que se divide em duas etapas: extrair características dos sinais e fazer a localização propriamente dita. A extração de parâmetros dos sinais é feita com a Transformada Wavelet Discreta. O cálculo da posição onde ocorrem as descargas é realizado através de um Algoritmo Genético. Experimentos em um tanque de testes simulam descargas parciais em óleo isolante, fornecendo sinais para análise de características e para testes do algoritmo de localização.

Abstract

The transformers are among the most important equipments in the electric system. Non-scheduled suspensions can bring considerable nuisance and large financial losses. The only way to avoid the problems caused by flaws in transformers is through a good maintenance strategy.

A typical flaw that deserves special attention is the partial discharge because its silent development and capability to cause non-scheduled suspensions in the transformer. Partial discharge is a problem in the electrical insulation that reveals itself over tiny arcs into the dielectric material. It degrades the insulation until the complete fault and possible destruction of the equipment. Partial discharge activity in transformer must be monitored in the way to keep track its evolution and plan an intervention before the occurrence of a catastrophic fault.

Among of different measurement methods of partial discharge in transformers, the acoustic emission technique deserves attention. It captures acoustic signals emitted by discharges in every location into the transformer. One of its advantages is the ability to locate the source of partial discharge. However, to feature theses acoustic signals is an important task of the location methods.

Only detect partial discharge activity into de transformer is not enough to an efficient maintenance in this equipment. It's imperative to know the location where the defect is developing itself to make possible an assessment of the risk and the planning an intervention.

The objective of this work is to present the development of a partial discharge localization algorithm using acoustic emissions. This is an initial work where the basic tools are developed to realize this task. The localization algorithm is divided in two stages: to extract features of the signals and the localization itself. The feature extraction is accomplished through the Discrete Wavelet Transform. The localization is performed by a Genetic Algorithm. Experiments in a test tank simulate partial discharges in insulation oil and provide signals to analyze its features and to test the localization algorithm.

Giscard Francimeire Cintra Veloso

**Localização de Descargas Parciais em
Transformadores pela Análise da Emissão
Acústica**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Itajubá como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração:
Automação e Sistemas Elétricos Industriais

Orientador:
Luiz Eduardo Borges da Silva

Co-orientador:
Germano Lambert Torres

Itajubá, Março de 2006

Referências Bibliográficas

- [1.1] E. Vellucci, A. Cavallini, G.C. Montanari, D. Fabiani, "Experience on partial discharge monitoring of power transformers", *Conference Record of the 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, Indianapolis, IN USA, September 2004.
- [1.2] D.W. Gross, M. Söller, "Partial discharge diagnosis on large power transformers", *Conference Record of the 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, Indianapolis, IN USA, pp. 186-191, September 2004.
- [1.3] P.M. Eleftherion, "Partial discharge XXI: acoustic emission-based pd source location in transformers", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 11, no. 6, pp. 22-26, November/December 1995.
- [2.1] G.J. Paoletti, A. Golubev, "Partial discharge theory and technologies related to medium-voltage electrical equipment", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 37, no. 1, pp. 90-103, January/February 2001.
- [2.2] S.A. Boggs, "Partial discharge: overview and signal generation", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 6, no. 4, pp. , July/August 1990.
- [2.3] R. Bartnikas, "Partial discharge: ther mechanism, detection and measurement", *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. 9, no. 5, pp. 763-808, October 2002.
- [2.4] M.M.A. Olivieri, "Utilização de técnica de medição de sinais acústicos para detecção e localização de descargas parciais em transformadores de Potência", Dissertação submetida ao Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da COPPE/UFRJ para obtenção do grau de Mestre em Ciências, Rio de Janeiro, 1999.
- [2.5] H. Borsi, "A PD measuring and evaluation system based on digital signal processing", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 7, no. 1, February 2000.
- [2.6] H. Debruyne, O. Lesaint, "About the significance of PD measurement in liquids", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 10, no. 3, pp. 385-392, June 2003.
- [2.7] M. Pompili, C. Mazzetti, R. Bartnikas, "Partial discharge pulse sequence patterns and cavity development times in transformer oils under ac conditions", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 12, no. 2, pp. 395-403, April 2005.
- [2.8] I. Shim, J.J. Soraghan, W.H. Siew, "Digital signal processing applied to the detection of partial discharge: an overview", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 16, no. 3, pp. 6-12, May/June 2000.
- [2.9] X. Ma, C. Zhou, I.J. Kemp, "Automated wavelet selection and thresholding for PD detection", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 18, no. 2, pp. 37-145 March/April 2002.

- [2.10] B.R. Varlow, D.W. Auckland, C.D. Smith, J. Zhao, "Non-destructive diagnostics of insulating systems: acoustic emission analysis of high voltage insulation", *IEE Proc. Scie. Measurement Technologies*, vol. 146, no. 5, pp. 260-263, September 1999.
- [2.11] D.A. Nattrass, "Partial discharge XVII: the early history of partial discharge research", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 9, no. 4, pp. 27-31, July/August 1993.
- [2.12] R. Bartnikas, "Detection of partial discharges (corona) in electrical apparatus", *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. 25, no. 1, pp. 111-124, February 1990.
- [2.13] R. Bartnikas, J.P. Novak, "On the character of different forms of partial discharge and their related terminologies", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 28, no. 6, pp. 956-968, December 1993.
- [2.14] S.A. Boggs, "Partial discharge – part II: detection sensitivity", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 6, no. 5, pp. 35-42, September/October 1990.
- [3.1] ACOUSTIC Emission Sensors. *Fuji Ceramics Corporation*, Tokio, Japão. Disponível em: <<http://www.fujicera.co.jp>>. Acesso em 7 junho 2005.
- [3.2] ACOUSTIC Emission Resource. *Physical Acoustic Corporation*, Princeton, USA. Disponível em: <<http://www.pacndt.com>>. Acesso em 10 maio 2005.
- [3.3] L.E. Lundgaard, "Partial discharge – part XIII: acoustic partial discharge – fundamental considerations", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 8, no. 4, pp. 25-31, July/August 1992.
- [3.4] T. Sakoda, T. Arita, H. Nieda, K. Ando, M. Otsu, C. Honda, "Studies of elastic waves caused by corona discharges in oil", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 6, no. 6, pp. 825-830, December 1999.
- [3.5] INTRODUCTION to Ultrasonic Testing. *NDT Resource Center*, Cowley County Community College, Arkansas City, Kansas. Disponível em: <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/cc_ut_index.htm>. Acessado em 7 junho 2005.
- [3.6] Phung B.T., Blackburn T.R., Liu Z., "Acoustic Measurements of Partial Discharge Signals", *Journal of Electrical & Electronics Engineering*, no. 21(1), pp. 41-48, Australia, 2001.
- [3.7] D.J. Kweon, S.B. Chin, H.R. Kwak, J.C. Kim, K.B. Song, "The analysis of ultrasonic signals by partial discharge and noise from the transformer", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 3, pp. 1976-1983, July 2005.

- [3.8] D.W. Auckland, A.J. McGrail, C.D. Smith, B.R. Varlow, J. Zhao, D. Zhu, "Application of ultrasound to the inspection of insulation", *IEE Proc. Scie. Measurement Technologies*, vol. 143, no. 3, pp. 177-181, May 1996.
- [3.9] T. Sakoda, H. Nieda, K. Ando, "Characteristics of elastic waves caused by corona discharges in an oil-immersed pole transformer", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 8, no. 2, pp. 276-283, April 2001.
- [4.1] S.M. Markalous, K. Feser, "All-acoustic pd measurements of oil/paper-insulated transformers for pd-localization", *Proceedings Second International Conference on Advances in Processing, Testing and Application of Dielectric Materials (APTADM)*, September 2004.
- [4.2] L.E. Lundgaard, "Partial discharge XIV: acoustic partial discharge detection – practical application", *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 8, no. 5, pp. 34-43, September/October 1995.
- [4.3] D.W. Auckland, J.R. Hyde, A.J. McGrail, B.R. Varlow, "The ultrasonic location of discharges in transformers – a new approach", *Conference Record of 1994 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, Pittsburgh, PA USA, June 1994.
- [5.1] C.S. Burrus, R. A. Gopinath, H. Guo, *Introduction to wavelets and wavelet transforms*. New Jersey: Prentice Hall, 1998.
- [5.2] Z. Wang, P. Willet, "A performance study of some transient detectors", *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 48, no. 9, pp 2682-2685, September 2000.
- [5.3] N. Drakos, R. Moore. *Wavelets and filter banks course notes*. Mcquire University, 1999. Disponível em: <http://www.engmath.dal.ca/courses/engm6610/notes/node1.html>. Acessado em 10 outubro 2004.
- [5.4] A. Graps, "An introduction to wavelets", *IEEE Computational Science and Engineering*, vol. 2, no. 2, USA, 1995.
- [5.5] P. Willet, B. Chen, R. Streit, "Transient detection using a homogeneity test", *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 48, no. 9, pp. 2682-2686, 1999.
- [5.6] Z. Wang, P. Willet, "All-purpose and plug-in power-law detectors for transient signals", *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 49, no. 11, November 2001.
- [5.7] D.C. Robertson, O.I. Camps, J.S. Mayer, W.B. Gish, "Wavelets and electromagnetic power system transients", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, no. 2, April 1996.

- [5.8] C.D. Meyer, *Matrix analysis and applied linear algebra*. Soc for Industrial & Applied Math, 2001.
- [5.9] H.L. Resnikoff, R. O. Wells, *Wavelet analysis – the scalable structure of information*. New York: Springer-Verlag, 1998.
- [5.10] E.C. Ifeachor, B.W. Jervis, “Digital Signal Processing”, Prentice Hall, 2002.
- [5.11] LEBESQUE Space. *Wikipedia*. Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/Lebesgue_space>
Acessado em 30 janeiro 2006.
- [6.1] J.H. Holland, *Adaptation in natural and artificial systems*, The University of Michigan Press, 1975.
- [6.2] M. Mitchell, *An introduction to genetic algorithms*, MIT Press, 1996.
- [6.3] J.C.H. Barcellos, *Algoritmos genéticos adaptativos – um estudo comparativo*.
Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da USP, 2000.