

# Sumário

Agradecimentos .....	i
Sumário .....	ii
Resumo .....	v
Abstract .....	vi
Lista de Figuras .....	vii
Lista de Tabelas .....	xii
Lista de Nomenclatura e Símbolos .....	xiii
CAPÍTULO 1.....	1
INTRODUÇÃO.....	1
1.1 _ Considerações Iniciais .....	1
1.2 _ Estabelecimento dos Problemas.....	2
1.3 _ Contribuições.....	5
1.4 _ Organização da Tese.....	5
CAPÍTULO 2.....	6
A Técnica de Análise da Assinatura da Corrente do Motor .....	6
2.1 _ Introdução.....	6
2.1.1 _ Classificação das Atividades de Manutenção.....	7
2.1.2 _ Técnicas de Análise Preditiva .....	8
2.1.2.1 – A Monitoração da Vibração .....	8
2.1.2.2 – MCSA Versus Vibração.....	12
2.2 _ O Histórico da Técnica de MCSA.....	13
2.3 _ A Técnica de MCSA.....	16
2.4 – Padrões de Falha.....	21
2.5 – Considerações Finais.....	47
CAPÍTULO 3.....	48
A Teoria de Conjuntos Aproximados.....	48
3.1 _ Introdução.....	48
3.2 _ O Conhecimento .....	48
3.2.1 _ Base de Conhecimento .....	48
3.2.2 _ Definição de Equivalências, Generalização e Especialização de Conhecimento .....	49
3.3 _ Categorias Imprecisas, Aproximações e Conjuntos Aproximados.....	50
3.3.1 _ Rough Sets .....	50

3.3.2 _ Aproximações de Conjunto .....	50
3.3.3 _ Propriedades da Aproximação .....	52
3.3.4 _ Aproximações e Relações de Pertinência .....	53
3.3.5 _ Caracterização Numérica da Imprecisão.....	53
3.3.6 _ Caracterização Topológica de Imprecisão .....	54
3.3.7 _ Aproximação de classificações .....	55
3.3.8 _ Igualdade Aproximada de Conjuntos .....	56
3.3.9 _ Inclusão Aproximada de Conjuntos.....	56
3.4 _ Redução de Conhecimento.....	57
3.4.1 _ Reduct e Core do Conhecimento .....	57
3.4.2 _ Reduct Relativo e Core Relativo do Conhecimento.....	58
3.4.3 _ Redução de Categorias .....	59
3.4.4 _ Reduto Relativo e CORE Relativo de Categorias.....	59
3.5 _ Dependências na Base de Conhecimento .....	59
3.5.1 _ Dependência de Conhecimento .....	60
3.5.2 _ Dependência Parcial de Conhecimento .....	60
3.6 _ Representação do Conhecimento.....	60
3.6.1 _ Definição Formal de SRC.....	61
3.6.2 _ Significância dos Atributos .....	63
3.7 _ Tabelas de Decisão .....	64
3.7.1 _ Definição formal.....	64
3.7.2 _ Simplificação da Tabela de Decisão .....	64
3.8 _ Raciocínio sobre o Conhecimento.....	65
3.8.1 _ A Linguagem da Lógica de Decisão.....	65
3.8.2 _ Semântica da Linguagem da Lógica de Decisão.....	66
3.8.3 _ Dedução em Lógica de Decisão.....	68
3.8.4 _ Forma Normal.....	69
3.8.5 _ Regras e Algoritmos de Decisão.....	70
3.8.6 _ Verdade e Indiscernibilidade .....	71
3.8.7 _ Dependência de Atributos.....	71
3.8.8 _ Redução de Algoritmos Consistentes .....	72
3.8.9 _ Redução de Algoritmos Inconsistentes .....	73
3.8.10 _ Redução de Regras de Decisão.....	74
3.8.11 _ Minimização de Algoritmos de Decisão.....	76
3.9 _ Aplicações .....	82
3.9.1 _ Tomada de decisão.....	82
3.9.2 _ Análise de dados .....	83

3.9.3 _ Outras Aplicações .....	90
3.9.4 _ Conclusões Preliminares .....	91
3.10 _ Desenvolvimentos Recentes de Aplicação de Técnicas de Inteligência Artificial ao Diagnóstico de Falhas em MIT .....	91
CAPÍTULO 4.....	95
Resultados	95
4.1 _ Introdução.....	95
4.2 _ Casos Reais da Aplicação dos Padrões de Falhas .....	95
A) Falhas no próprio motor .....	95
1) Desalinhamento Rotórico.....	96
2) Desequilíbrio Mecânico .....	99
3) Barras Quebradas .....	103
4) Falhas elétricas .....	105
B) Falhas no sistema de transmissão .....	110
1) Polias	110
2) Correias	111
C) Falhas na carga acoplada .....	114
1) Bombas	114
2) Compressores .....	123
3) Ventiladores.....	132
4.3 _ Resultados da Aplicação de TCA à Manutenção preditiva de MIT's.....	136
CAPÍTULO 5.....	161
Conclusões	161
5.1 _ Trabalhos Futuros.....	162
Referências Bibliográficas .....	163

## Resumo

Atualmente, as necessidades de redução dos custos de produção e aumento da produtividade fazem com que a confiabilidade do processo produtivo se torne cada vez mais importante. Desta forma, a importância do setor de manutenção é cada vez maior, favorecendo o aparecimento de novas técnicas de manutenção, principalmente técnicas preditivas que se utilizam de sistemas de monitoração contínua do equipamento.

As indústrias continuam a procura de métodos de identificação e predição de falhas em equipamentos. Uma prova disso é que os fabricantes de equipamentos buscam a cada dia colocar novas tecnologias no mercado. Um dos novos métodos que vem ganhando espaço na indústria é a análise do sinal de corrente de uma das fases do motor, conhecida como Motor Current Signature Analysis (MCSA).

Um dos problemas dessa técnica era que, até o presente momento, quando se falava em MCSA logo se associava ao diagnóstico de barras quebradas e excentricidade do *air gap*. A localização de problemas puramente mecânicos através do espectro de corrente ficava sempre em segundo plano, principalmente o diagnóstico de problemas na carga acoplada. Tal fato limitava a aplicação de MCSA no meio industrial. Por esta razão, este trabalho propõe, como uma de suas contribuições, o estabelecimento de padrões inéditos de falhas na carga acoplada.

Outro avanço que vem sendo perseguido é o diagnóstico automático de falhas. Neste caso, este trabalho propõe a aplicação inédita da Teoria de Conjunto Aproximados ao diagnóstico de avarias em motores de indução trifásicos (MIT). No decorrer desta tese o leitor poderá identificar as razões que justificam essa aplicação e os ganhos que podem ser obtidos com a aplicação de TCA à manutenção preditiva.

Com as duas contribuições apresentadas neste trabalho, espera-se que a monitoração de motores de indução via sinais elétricos passe a ser cada vez mais utilizada na indústria, complementando o trabalho executado por outras técnicas de predição e aumentando a confiabilidade do processo produtivo.

Além do aumento da confiabilidade do processo, outros impactos são esperados como a redução do custo com homem-hora na coleta de dados, aumento da segurança dos funcionários coletores, suporte ao diagnóstico de falhas e aumento da disponibilidade de máquina e o conseqüente aumento da produtividade.

Desta forma, se estes impactos forem sentidos na indústria este trabalho terá atingido seu objetivo.

- [1.1] Xavier, J. N. "Manutenção Classe Mundial". [www.bhnet.com.br](http://www.bhnet.com.br)
- [1.2] Bonaldi, E. L.: "Manutenção Preditiva em Motores de Indução Trifásicos através do Espectro de Corrente do Estator", Dissertação de Mestrado, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 2002.
- [1.3] Jean Altweg, Jean-Pierre Dupraz, Joseph Martin, and Christophe Baudart. "O Telediagnóstico como Ferramenta de Otimização da Manutenção". In Proceedings of the XV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Outubro de 1999.
- [1.4] Dallas Fossum, Allied Services Group. "How to Identify Mechanical Faults With Motor Current Signature Analysis". In Proceedings of the Reliability World 2005.
- [2.1] Antônio T. L. de Almeida, Marcelo E. C. Paulino. "Manutenção e Operação de Motores de Indução Trifásicos". Itajubá, FUPAI 2001.
- [2.2] Marcio T. Almeida e Ricardo D. Góz. "Análise de Vibrações". Itajubá, FUPAI 2000.
- [2.3] Thomson, W. T. "Condition Monitoring of Induction Drives". Virginia, Spectra Quest 2002.
- [2.4] Cardoso, A. J. M.: "Diagnóstico de Avarias em Motores de Indução Trifásicos". Coimbra Editora, 1991.
- [2.5] Oktsu, H.; Suzuki, T. and Morita, I.: "Failure Diagnosis of Electric Motors by Means of Frequency Analysis of the Current"; Proceedings of the International Conference on Electrical Machines, Athens, Greece, Part 3, GP5/4, pp.1947-1954, September 15-17, 1980.
- [2.6] Hargis, C.; Gaydon, B. G. and Kamash, K.: "The Detection of Rotor Defects in Induction Motors"; International Conference on Electrical Machines – Design and Applications, IEE Conference Publication Number 213, pp. 231-235, 13-15 July 1982.
- [2.7] Steele, M. E.; Ashen, R. A. and Knight, L. G.: "An Electrical Method for Condition Monitoring of Motors"; International Conference on Electrical Machines – Design and applications, IEE Conference Publication Number 213, pp. 216-220, 13-15 July 1982
- [2.8] Thomson, W. T.; Deans, N. D.; Leonard, R. A. and Milne, A. J.: "Condition Monitoring of Induction Motors for Availability Assessment in Offshore Installations" 4<sup>th</sup> Euredata Conference, Venice, Italy, March, 1983.

- [2.9] Thomson, W. T.; Deans, N. D.; Leonard, R. A. and Milne, A. J.: "Monitoring Strategy for Discriminating between Different Types of Rotor Defects in Inductions Motors"; 18<sup>th</sup> Universities Power Engineering Conference, University of Surrey, England, pp. 241-246, April, 1983.
- [2.10] Thomson, W. T.; Leonard, R. A.; Milne, A. J. and Penman, J.: "Failure identification of Offshore Motor Systems using On-condition Monitoring"; Reliability Engineering Journal, Vol. 9, pp. 49-64, August, 1984.
- [2.11] Gol, O.: "Effect of Cage Fractures on the Performance of Asynchronous Machines"; Proceedings of the International Conference on Electrical Machines, Lausanne, Switzerland, Part 3, pp. 1141-1144, September 18-21, 1984.
- [2.12] Kliman, G. B.: "The Detection of Faulted Rotor Bars in Operating Induction Motors"; Proceedings of the International Conference on Electrical Machines, Munchen, Germany, Part 2, pp. 500-502, 8-10 September, 1986.
- [2.13] Kliman, G. B.; Koegl, R. A.; Stein, J.; Endicott, R. D. and Madden, M. W.: "Noninvasive Detection of Broken Rotors Bars in Operating Induction Motors"; IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. EC-3, pp. 873-879, December, 1998.
- [2.14] Thomson, W. T. and Rankin, D.: "Case Histories of On-line Rotor Cage Fault Diagnosis"; Condition Monitoring'87, Ed. Mervin H. Jones, Pub. Pineridge Press, Swansea, U. K., pp. 798-819, 1987.
- [2.15] Thomson, T. W.; Chalmers, S. J. and Rankin, D.: "On-line Current Monitoring Fault Diagnosis in HV Induction motors - Case Histories and Cost Savings in Offshore Installations": Offshore Europe 87, Aberdeen, U. K., SPE16577/1 – SPE16577/10, 8-11 September 1987.
- [2.16] Leith,, D.; Deans, N. D. and Thomson, W., T.: "A Real-time Expert System for Machine Condition Monitoring"; International Conference on Software Engineering for Real Time Systems, IERE Publication No. 77, 28-30 September, 1987.
- [2.17] Leith,, D.; Deans, N. D. and Thomson, W., T.: "Application of Expert Systems in the Condition Monitoring of Electrical Machines"; IEE Computing and Control Division Colloquium on Knowledge Based Advisory Systems for Monitoring and Supervisory Control, Savoy Place, London, U. K., 20 October, 1987.
- [2.18] Leith,, D.; Deans, N. D. and Stewart, I. D.: "Condition Monitoring of Electrical Machines Using a Real-time Expert System"; Proceedings of the International Conference on Electrical Machines, Pisa, Italy, Vol. III, pp. 297-302, September 12-14, 1988.

- [2.19] Fillipetti, F.; Franceschini, G.; Martelli, M. and Tassoni, C.: "An Approach to a Knowledge Representation about Induction Machine Diagnostic en Expert Systems"; Proceedings of the International Conference on Electrical Machines, Pisa, Italy, Vol. III, pp. 289-295, September 12-14, 1988.
- [2.20] Tavner, P. J.; Armin, K. K. and Hargis, C.: "An Electrical Technique for Monitoring Induction Motor Cages"; Third International Conference on Electrical Machines and Drives, IEE Conference Publication Number 282, pp. 43-46, 16-18 November, 1987.
- [2.21] Thomson, W. T. and Stewart, I. D.: "On-line Current Monitoring for Detecting Air gap Eccentricity and Broken Rotor Bars in Inverter Variable Speed Drives"; Proceedings of the International Conference on Electrical Machines, Pisa, Italy, Vol. III, pp. 211-214, September 12-14, 1988.
- [2.22] Notelet, F. and Ravalitera, G.: "Assessment of the Induction Motor Eccentricity Deduced from the Fluctuations of the Feeding Currents"; Proceedings of the International Conference on Electrical Machines, Lausanne, Switzerland, Part 3, pp. 1177-1179, September 18-21, 1984.
- [2.23] Cameron, J. R.; Thomson, W. T. and Dow, A. B.: "Vibration and Current Monitoring for Detecting air gap Eccentricity in Large Induction Motors"; Second International Conference on Electrical Machines – Design and Applications, IEE Conference Publication Number 254, pp. 173-179, 17-19 September, 1985.
- [2.24] Thomson, W. T.; Cameron, J. R and Dow, A. B.: "On-line Diagnosis of Large Induction Motors"; NATO Advanced Research Workshop on Mechanical Vibration and Audible Noise in Alternating Current Machines"; K. U. Leuven, Belgium, August 4-8, 1986.
- [2.25] Edwards, D. G.: "Condition Monitoring of Electrical Insulation in High-Voltage Motors"; Condition Monitoring'87, Ed. Mervin H. Jones, Pub. Pineridge Press., Swansea, U. K., pp. 788-797, 1987.
- [2.26] Randy R. Schoen, Thomas G. Habetler, Farruk Kamram and R. G. Bartheld. "Motor Bearing Damage Detection Using Stator Current Monitoring". IEEE Transactions on Industrial Eletronics, Vol. 31, NO. 6, November/December 1995, pp. 1274-1279.
- [2.27] Randy R. Schoen, Brian K. Lin, Thomas G. Habetler, Jay H. Schlag and Samir Farag. "An Unsupervised, On-line System for Induction Motor Fault Detection Using Stator Current Monitoring". IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 31, NO. 6, November/December 1995, pp. 1280-1286.
- [2.28] A.Bellini, F.Filippetti, G.Franceschini, C.Tassoni, R.Passaglia, M.Saottini, G.Tontini, M.Giovannini, and Mohamed El Hachemi Benbouzid. "ENEL's Experience with On-line

- Diagnosis of Large Induction Motors Cage Failures". In Proceedings of the 35th Annual Meeting and World Conference on Industrial Application of Electrical Energy, July 2000.
- [2.29] Ramzy R.Obaid, Thomas G.Habetler, and David J.Gritter. " A Simplified Technique for Detecting Mechanical Faults Using Stator Current in Small Induction Motors", In Proceedings of the 35th Annual Meeting and World Conference on Industrial Application of Electrical Energy, July 2000.
- [2.30] Mohamed El Hachemi Benbouzid. A Review of Induction Motors Signature Analysis as a Medium for Faults Detection. IEEE Transactions on Industrial Eletronics, Vol. 47, NO. 5. October 2000, pp. 984-993.
- [2.31] Penrose, H.: "Practical Motor Current Signature Analysis: Taking the Mystery Out of MCSA". [www.bjmc Corp.com](http://www.bjmc Corp.com).
- [2.32] Mohamed El Hachemi Benbouzid, Michelle Vieira, and Céline Theys. "Induction Motor's Faults Detection and localization Using Stator Current Advanced Signal Processing Techniques". IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 14, NO. 1, January 1999, pp. 14-22.
- [2.33] Diagnostic Technologies India Pvt. Ltd. E-mail: [diatech@vsnl.com](mailto:diatech@vsnl.com).
- [3.1] Pawlak, Z.: "Rough Sets: Theoretical Aspects of Reasoning About Data". Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [3.2] Silva de Carvalho, J. C.: "Aplicação de Conjuntos Aproximados Utilizando Banco de Dados Relacionais". Dissertação de Mestrado, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 2000.
- [3.3] Assunção, F. O. et alli: "Classificador Baseado na Teoria de Conjuntos Aproximados Aplicado ao Diagnóstico de Falhas em Motores de Indução Trifásicos monitorados através de Sinais Acústicos, Elétricos e de Vibração". Anais do VI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, Setembro de 2003.
- [4.1] Payne, B. S, Ball, A. D, Gu, F, Li, W.: "A Head-to-Head Assessment of the Relative Fault Detection and Diagnosis Capabilities of Conventional Vibration and Airborne Acoustic Monitoring". Proceedings of Comadem 2000.
- [4.2] Benbouzid, M. E. H, Vieira, M. and Theys, C: "Induction Motor's Faults Detection and Localization Using Stator Current Advanced Signal Processing Techniques". IEEE Transactions on Power Electronics, Vol 14, NO. 1, pp 14 -22
- [4.3] Thomson, W. T. and Fenger M: "Current Signature Analysis to Detect Induction Motor Faults". IEEE Industry Applications Magazine, July/August 2001.