

SISTEMA PARA DETECÇÃO E DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM MOTORES ELÉTRICOS DE INDUÇÃO UTILIZANDO FASORES E LÓGICA FUZZY

Hélio Henrique Cunha Pinheiro, André Laurindo Maitelli e Andrés Ortiz Salazar

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte - IFRN
helio.pinheiro@ifrn.edu.br

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
maitelli@dca.ufrn.br

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
andres@dca.ufrn.br

Resumo

Os motores de indução constituem-se num dos equipamentos mais importantes da indústria moderna. Contudo, em muitas situações, ficam sujeitos a condições inadequadas como temperaturas e pressões elevadas, variações de carga e vibrações constantes, por exemplo. Tais condições, deixa-os mais susceptíveis a falhas, seja de natureza externa ou interna, indesejadas no processo industrial. Neste contexto, a manutenção preditiva desempenha um papel relevante, onde a detecção e o diagnóstico de falhas conseguidos em tempo hábil possibilita o aumento do tempo de uso do motor e a possibilidade de diminuição de custos, causados principalmente, com a parada da produção e com a manutenção corretiva do próprio motor. Diante desta conjuntura, este trabalho propõe a concepção de um sistema que seja capaz de detectar e de diagnosticar falhas em motores de indução, a partir da leitura e da interpretação de diagramas fasoriais de tensão e de corrente de linha, executados por um sistema inteligente baseado em lógica *fuzzy*.

Palavras Chaves – Motor de indução, detecção de falhas, lógica *fuzzy*.

1 Introdução

No acionamento de cargas mecânicas, utilizam-se motores elétricos por serem capazes de promover a transformação de energia elétrica em energia mecânica com pequenas perdas, o que o torna uma máquina com rendimento energético elevado. Entre os diversos tipos existentes no mercado, o motor elétrico de indução, também conhecido como motor assíncrono, destaca-se por apresentar princípio de funcionamento simples, construção robusta, pouca necessidade de manutenção, baixo custo e possibilidade de emprego em praticamente qualquer aplicação, incluindo ambientes hostis, explosivos, com poeiras, aplicações navais, etc. [16].

Embora os motores de indução sejam confiáveis, eles estão sujeitos a alguns esforços indesejáveis, os quais desgastam-os, causando-lhes algumas falhas [38]. Pesquisadores tem estudado uma variedade de falhas nesses motores, entre as quais podemos destacar: falha nos enrolamentos, estator ou rotor desbalanceados, barras quebradas do rotor, excentricidades e falhas nos rolamentos [38]. A necessidade de condições de monitoramento tem aumentado recentemente por causa do uso difundido da automação e na conseqüente redução de custos com o advento da IHM (Interface Homem-Máquina) e dos sistemas SCADA na supervisão do sistema de operação. A tendência é monitorar os parâmetros de saída da máquina com o propósito de detecção, análise e correção dos problemas antes que eles aconteçam, reduzindo danos e paradas para manutenção não-programada, e por conseqüência, aumentando a sua disponibilidade, performance e vida útil [38].

A detecção e o diagnóstico de falhas em motores de indução tem despertado o interesse de muitos pesquisadores de tal maneira, que já existe uma quantidade considerável de publicações sobre este tema. Entre os métodos de detecção tradicionais, destacam-se a Assinatura de Corrente do Motor, a Análise de Campo Magnético e a Análise de Vibração. No concernente ao diagnóstico, técnicas baseadas em sistemas inteligentes como Redes Neurais Artificiais, Lógica Fuzzy e sistemas neurofuzzy, tem-se destacado. Entre as falhas mais pesquisadas, destacam-se barras quebradas no rotor, curto-circuito nos enrolamentos e problemas nos rolamentos.

Neste contexto, o nosso trabalho se propõe a desenvolver um algoritmo que visualize as condições de operação do motor de indução e possa identificar e classificar eventuais falhas que venham a ocorrer. Para isso, são capturados sinais elétricos de tensão e de corrente da máquina e o diagnóstico é executado por um algoritmo baseado em lógica fuzzy.

2 Sistema Proposto

Métodos avançados de supervisão e gerenciamento de falhas são embasados por processos de detecção e diagnósticos que se fundamentam, respectivamente, pela coleta de variáveis mensuráveis por meio de instrumentos, e pelo seu acompanhamento feito por operadores humanos. Isto quer dizer que, em se tratando de um processo automatizado, ele não deve se limitar somente à medição de variáveis em tempo real, mas requer também, conhecimento analítico do processo e a análise da evolução das variáveis medidas deve ser realizada por um perito experiente com um vasto conhecimento, o qual chamamos de conhecimento heurístico [21]. Neste contexto, a lógica fuzzy pode desempenhar este papel, uma vez que ela possibilita estratégias de tomadas de decisão [37].

O sistema proposto pode ser melhor visualizado através do fluxograma da figura 1. O processo para a detecção e diagnóstico de falhas em motores de indução deve ser dividido em três etapas. A primeira, trata da aquisição de dados, isto é, coletar parâmetros do motor que possam ser relevantes na busca por informações sobre o seu estado, particularmente para a nossa proposta, utilizaremos as senóides da tensão e da corrente de linha, extraídas a partir de instrumentos específicos. Esses sinais serão conduzidos para a segunda etapa, a qual a chamaremos de pré-processamento. Nela, será realizado o condicionamento do sinal oriundo do primeiro bloco, de modo a transformá-lo em um outro tipo de sinal que permita melhor visualizar a condição do motor. Para esta finalidade, utilizaremos o Diagrama Fasorial. A terceira e última etapa, a qual denominamos de processamento, refere-se a utilização de técnicas que possam fornecer o diagnóstico de falhas. No caso em questão, usaremos a lógica fuzzy.

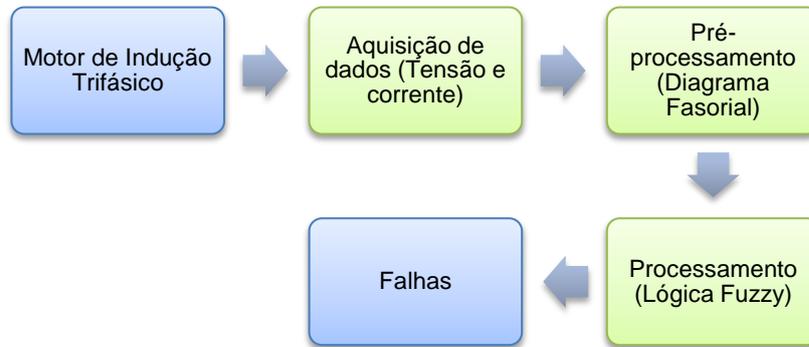


Figura 1 – Fluxograma do sistema proposto.

3 Simulação do Sistema Proposto

Com o intuito de pôr em prática a nossa proposta, foi desenvolvido em MATLAB®, um modelo de máquinas que simulam o comportamento dinâmico do motor de indução, sendo possível a introdução de algumas falhas, e que fornecem também, o diagrama fasorial de tensões e correntes da rede.

O modelo dinâmico da máquina foi simulado a partir das seguintes equações:

$$\begin{aligned}
 v_{as} &= r_s i_{as} + \frac{d\lambda_{as}}{dt} \\
 v_{bs} &= r_s i_{bs} + \frac{d\lambda_{bs}}{dt} \\
 v_{cs} &= r_s i_{cs} + \frac{d\lambda_{cs}}{dt}
 \end{aligned} \tag{1}$$

onde, v_{as} é a tensão do estator na fase a , v_{bs} é a tensão do estator na fase b , v_{cs} é a tensão do estator na fase c , i_{as} é a corrente do estator na fase a , i_{bs} é a corrente do estator na fase b , i_{cs} é a corrente do estator na fase c , λ_{as} é o fluxo magnético do estator na fase a , λ_{bs} é o fluxo magnético do estator na fase b , λ_{cs} é o fluxo magnético do estator na fase c e r_s é a resistência do estator.

$$\begin{aligned}
 v_{ar} &= r_r i_{ar} + \frac{d\lambda_{ar}}{dt} \\
 v_{br} &= r_r i_{br} + \frac{d\lambda_{br}}{dt} \\
 v_{cr} &= r_r i_{cr} + \frac{d\lambda_{cr}}{dt}
 \end{aligned} \tag{2}$$

onde, v_{ar} é a tensão do rotor na fase a , v_{br} é a tensão do rotor na fase b , v_{cr} é a tensão do rotor na fase c , i_{ar} é a corrente do rotor na fase a , i_{br} é a corrente do rotor na fase b , i_{cr} é a corrente do rotor na fase c , λ_{ar} é o fluxo magnético do rotor na fase a , λ_{br} é o fluxo magnético do rotor na fase b , λ_{cr} é o fluxo magnético do rotor na fase c e r_r é a resistência do rotor.

$$\begin{bmatrix} \lambda_s^{abc} \\ \lambda_r^{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ss}^{abc} & L_{sr}^{abc} \\ L_{rs}^{abc} & L_{rr}^{abc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \lambda_s^{abc} &= [\lambda_{as} \quad \lambda_{bs} \quad \lambda_{cs}]^t \\ \lambda_r^{abc} &= [\lambda_{ar} \quad \lambda_{br} \quad \lambda_{cr}]^t \\ i_s^{abc} &= [i_{as} \quad i_{bs} \quad i_{cs}]^t \\ i_r^{abc} &= [i_{ar} \quad i_{br} \quad i_{cr}]^t \end{aligned} \quad (4)$$

onde, λ_s^{abc} é o fluxo magnético concatenado total do estator, λ_r^{abc} é o fluxo magnético concatenado total do rotor, i_s^{abc} é a corrente total do estator, i_r^{abc} é a corrente total do rotor, L_{ss}^{abc} é a submatriz de indutância do enrolamento do estator, L_{rr}^{abc} é a submatriz de indutância do enrolamento do rotor, L_{sr}^{abc} representa as indutâncias mutuas das fases do estator em relação ao rotor e L_{rs}^{abc} representa as indutâncias mutuas das fases do rotor em relação ao estator.

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_{em} - T_c - T_D \quad (5)$$

onde, J é o momento de inércia, ω é a velocidade angular do rotor, T_c é o torque de carga aplicada c , T_{em} é o torque eletromagnético e T_D é o torque de inércia total.

Tabela 1 – Valores Nominais do Motor (E – Environmental, F – Functional, I – Initialization, S – Stop Criteria).

Parâmetro	Classe	Valor	Parâmetro	Classe	Valor
Potência	E	1 HP	Número de pólos	E	4
Resistência do estator	E	3,35 Ω	Momento de inércia	E	0,1 Kg.m ²
Resistência do rotor	E	1,99 Ω	Coefficiente de fricção	E	0,001 N.m.s/rad
Indutância de Dispersão do estator	E	6,94 mH	Tensão de fase	E	200 V
Indutância de Dispersão do rotor	E	6,94 mH	Velocidade	E	1800 rpm
Indutância de Magnetização	E	163,73 mH	Ligação	E	Estrela
Frequência	E	60 Hz			

As equações (1) e (2) representam as equações elétricas, (3) e (4) as equações de fluxo concatenado e (5) a equação do sistema mecânico. A efeito de simulação, as equações de (1) a (5) foram trabalhadas com o auxílio da Transformada de Park. A tabela 1 mostra os valores nominais do motor de indução usado como modelo em nossa proposta.

A rotina computacional deverá também contemplar o algoritmo fuzzy que a partir das informações fornecidas pelos diagramas fasoriais, diagnosticará o tipo de falha ocorrida.

4 Resultados Preliminares e Discussões

Os resultados alcançados até o presente momento, expressam o comportamento das tensões de linha e das correntes de linha sob a forma de fasores, considerando o motor sem falhas e com falhas específicas. A figura 2 mostra o diagrama fasorial das tensões e das correntes trifásicas para o motor saudável. Neste caso, tanto para a tensão quanto para a corrente, os fasores apresentam um defasamento de 120° elétricos e os módulos estão em seus valores nominais.

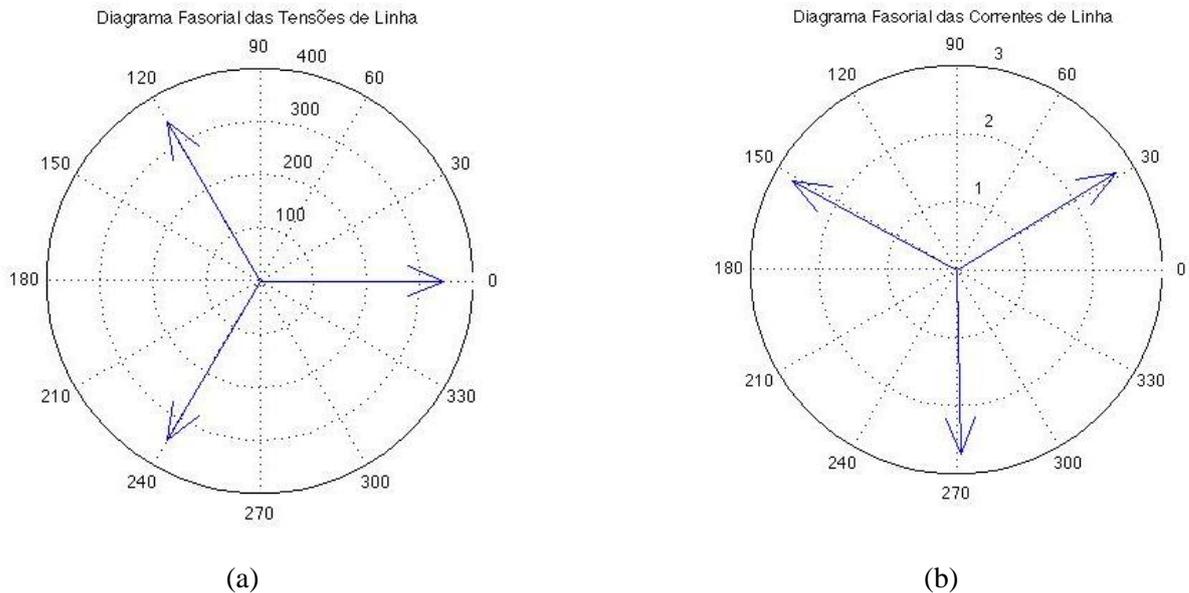


Figura 2 – Diagrama fasorial das tensões (a) e das correntes (b), para o motor saudável a plena carga.

A tabela 2 traz um resumo do comportamento dos diagramas fasoriais de tensão e de corrente, mostrando mudanças de módulo, de defasagem entre fasores e de seqüência, para diferentes falhas. A coluna *defeito* representa o estado do motor perante situações de falhas ou não. Entre as possibilidades temos: sem defeito, barras quebradas, curto-circuito entre espiras do estator e defeitos nos enrolamentos. A coluna *módulo* representa o valor rms de tensão e de corrente. Entre as possibilidades estão: nominal, aumenta ou diminui. A coluna *defasagem entre fasores* registra o ângulo de defasagem entre fasores da mesma grandeza. O valor de 120° significa que o sistema permanece equilibrado e nomenclatura pequenas variações significa que os defasamentos entre os fasores será diferente de 120° . A coluna *seqüência* representa se a seqüência trifásica é positiva ou negativa. A coluna *defasagem entre tensão e corrente* registra se há aumento ou diminuição do ângulo de defasagem entre as duas grandezas.

Tabela 2 – Comportamento do diagrama fasorial durante a ocorrência de falhas.

DEFEITO	TENSÃO DE LINHA (V)			CORRENTE DE LINHA (A)			DEFASAGEM ENTRE TENSÃO E CORRENTE
	MÓDULO	DEFASAGEM ENTRE FASORES	SEQUÊNCIA	MÓDULO	DEFASAGEM ENTRE FASORES	SEQUÊNCIA	
Sem defeito	Nominal	120°	Positiva	Nominal	120°	Positiva	Nominal
Barras quebradas	Nominal	120°	Positiva	Aumenta	120°	Positiva	Aumenta
Curto-circuito entre espiras do estator	Nominal	120°	Positiva	variável	Pequenas variações	Positiva	Aumenta
Defeitos nos enrolamentos	Nominal	120°	Positiva	Aumenta	120°	Positiva	Diminui

Observando a tabela 2, constatamos que para as três falhas consideradas, em nenhuma delas acontece mudança no diagrama de tensão, quando comparada com a linha de referência (sem defeito). Já com relação ao diagrama de corrente, ocorre mudanças significativas: para a falha *barras quebradas*, o módulo do fasor de corrente e o ângulo de defasagem com a tensão aumentam; para *curto-circuito entre espiras do estator*, os módulos dos três fasores de correntes apresentam valores distintos (o que caracteriza um desequilíbrio) e o ângulo de defasagem com a tensão aumenta; quanto a *defeitos nos rolamentos*, o módulo do fasor de corrente aumenta e o ângulo de defasagem com a tensão diminui.

As informações contidas na tabela 2 podem funcionar como dados de entrada para um algoritmo *fuzzy* capaz de diagnosticar com exatidão o tipo de falha a qual o motor está acometido.

5 Conclusões

Os motores de indução se constituem numa peça fundamental no processo industrial atual. Paradas em situações inoportunas ou até mesmo para manutenção corretiva, demandam tempo e custo elevados, sendo cada vez mais necessário, o desenvolvimento de técnicas avançadas para a manutenção preditiva online. Por isso, a detecção e o diagnóstico em tempo real, para falhas em motores de indução tem motivado inúmeras pesquisas.

A lógica fuzzy, consolidada como uma das técnicas mais utilizadas para diagnósticos, apresenta-se propícia à nossa proposta por possuir características como capacidade de inferência e de multivalência. As modificações ocorridas nos diagramas fasoriais de tensão e de corrente servirão com dados de entrada para o algoritmo fuzzy que será encarregado de proferir com exatidão tipo de falha ocorrida no motor.

6 Referências Bibliográficas

- [1] ALEXANDER, Charles K.; SADIKU, Matthew N. O., Fundamentos de Circuitos Elétricos. 3ª Edição. Volume Único. São Paulo: **McGraw-Hill**, 2008, 901 p., pp 370-386.
- [2] BALLAL, Makarand S.; KHAN, Zafar J.; SURYAWANSHI, Hiralal M.; SONOLIKAR, Ram L., Adaptive Neural Fuzzy Inference System for the Detection of Inter-Turn Insulation and Bearing Wear Faults in Induction Motor. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, Vol. 54, No. 1, Fevereiro de 2007.
- [3] BENBOUZID, Mohamed El Hachemi; VIEIRA, Michelle; THEYS, Céline., Induction Motors' Faults Detection and Localization Using Stator Current Advanced Signal Processing Techniques. **IEEE Transactions on Power Electronics**, Vol. 14, No. 1, Janeiro de 1999.
- [4] BLOCH, Heinz P.; GEITNER, Fred K., Machinery Failure Analysis and Troubleshooting. 3ª Ed. Volume 2, **Gulf Professional Publishing**, Houston, 1999.
- [5] BONALDI, E. L.; SILVA, L. E. Borges da; TORRES, G. Lambert; OLIVEIRA, L. E. L., A Rough Sets Based Classifier for Induction Motors Fault Diagnosis. **WSEAS Transactions on Systems, Londres**, 2002, v. 2, n. 2, p. 230-237.
- [6] BONNET, Austin H.; SOUKUP, George C., Analysis of Rotor Failures in Squirrel-Cage Induction Motors. **IEEE Transactions on Industry Applications**, Vol. 24, No. 6, Novembro e Dezembro de 1988, pp 1124-1130
- [7] BRITO, Jorge Nei, Desenvolvimento de um Sistema Inteligente Híbrido para Diagnóstico de Falhas em Motores de Indução Trifásicos. **Universidade Estadual de Campinas**, Campinas, 2002, 214 pp.
- [8] BRITO, Jorge Nei; FILHO, Paulo César Monteiro Lamim; PEDERIVA, Robson, Detecção de Falhas em Motores Elétricos Através da Análise de Fluxo Magnético. **X Seminário Brasileiro de Manutenção Preditiva e Inspeção de Equipamento**, 2004.
- [9] BRITO, Jorge Nei; FILHO, Paulo César Monteiro Lamim; PEDERIVA, Robson, Utilização da Lógica Nebulosa Para Detecção de Defeitos em Motores de Indução Trifásicos. **8º Congresso Iberoamericano em Engenharia Mecânica**, Outubro de 2007.
- [10] CHO, K. Rae; LANG, Jeffrey H.; UMANS, Stephen D., Detection of Broken Rotor Bars in Induction Motors Using State and Parameter Estimation. **IEEE Transactions on Industry Applications**, Vol. 28, No. 3, Maio e Junho de 1992.
- [11] CHOW, Mo-yuen; YEE, Sui Oi, Methodology for On-line Incipient Fault Detection in Single-Phase Squirrel-Cage Induction Motors Using Artificial Neural Networks. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Vol. 6, No. 3, Setembro de 1991.
- [12] CHOW, Mo-Yuen, Guest Editorial Special Section on Motor Fault Detection and Diagnosis. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, Vol. 47, No. 5, Outubro de 2000, pp 982-983.
- [13] EMATSU, Márcio Yoshikazu, Análise Espectral da Corrente de Partida de Motores de Indução Para Detecção de Falhas nas Barras do Rotor. **UFSC, Florianópolis**, 2008, 88 pp.
- [14] GAZZANA, Daniel da Silva; PEREIRA, Luís Alberto; PEREIRA, Luís F. A., Motor Current Signature Analysis and Fuzzy Logic Applied to the Diagnosis of Short-Circuit Faults in Induction Motors. 2005, pp 275-280.
- [15] GAZZANA, Daniel da S.; PEREIRA, Luís A.; FERNANDES, Dênis; SILVA, Jonas dos Santos, Método da Análise da Assinatura de Corrente do Motor (MCSA) Aplicado a Detecção de Falhas de Curto-Circuito do Enrolamento do Estator de

- Motores de Indução. **CINDUSCON: VII Conferência Internacional de Aplicações Industriais**, Poços de Caldas – MG, 2008.
- [16] GUEDES, Manuel Vaz, O Motor de Indução Trifásico: Seleção e Aplicação. **Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto**, 1994.
- [17] HAN, Tian; YANG, Bo-Suk; CHOI, Won-Ho; KIM, Jae-Sik, Fault Diagnosis System of Induction Motors Based on Neural Network and Genetic Algorithm Using Stator Current Signals. **International Journal of Rotating Machinery**, 2006, Article ID 61690, Pages 1–13.
- [18] HATTANGADI, A. A., Plant and Machinery Failure Prevention. **McGraw-Hill**, 2005.
- [19] HE, Qing; DU, Dong-Mei, Fault Diagnosis of Induction Motor Using Neural Networks. **Proceedings of the Sixth International Conference on Machine Learning and Cybernetics**, Hong Kong, 19-22 August 2007
- [20] IEEE Power Engineering Society, **IEEE Guide for Induction Machinery Maintenance Testing and Failure Analysis**. Nova York, 2007.
- [21] ISERMANN, Rolf, Fault-Diagnosis Systems: An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance. **Berlin**, 2006.
- [22] JUNG, Jee-Hong; LEE, Jong-Jae; KWON, Bong-Hwan, Online Diagnosis of Induction Motors Using MCSA. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, Vol. 53, No. 6, Dezembro de 2006.
- [23] KABAODLU, Nihat; AKAN, Aydyn, Detection of Machinery Failure by Using Time-Frequency Analysis. **Journal of Electrical & Electronics**, Vol. 1, No 2, 2001.
- [24] KOLLA, Sri; VARATHARASA, Logan, Identifying Three-Phase Induction Motor Faults Using Artificial Neural Networks. **ISA Transactions**, Vol. 39, 2000, pp 433-439.
- [25] LEMOS, J. W.; GEHRKE, C. S.; SALVADORI, F.; CAMPOS, M. de; CAMARGO, R. F. de; OLIVEIRA, A. C., Sistema Híbrido para Monitoramento, Diagnose e Detecção de Falhas em Motores de Indução. **CINDUSCON: VII Conferência Internacional de Aplicações Industriais**, Poços de Caldas – MG, 2008.
- [26] LI, Bo; GODDU, Gregory; CHOW, Mo-Yuen., Detection of Common Motor Bearing Faults Using Frequency-Domian Vibration Signals and a Neural Network Based Approach. **Proceedings of the American Control Conference**, Philadelphia, Pennsylvania, Junho de 1998, pp. 2032-2036.
- [27] LI, Lingxin; MECHEFSKE, C. K.; LI, Weidong, Electric Motor Faults Diagnosis Using Artificial Neural Networks. Vol. 46, No. 10, Outubro de 2004.
- [28] MARÇAL, Rui F. M.; SUSIN, Altamiro A., Detectando Falhas Incipientes em Máquinas Rotativas. **Revista Gestão Industrial**, v. 01, n 021: pp 087-096, 2005.
- [29] NANDI, Subhasis; TOLIYAT, Hamid A.; LI, Xiaodong, Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors – A Review. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Vol. 20, No. 4, Dezembro de 2005, pp 719-729.
- [30] ONG, Chee-Mun, Dynamic Simulation of Electric Machinery. New Jersey: **Prentice-Hall**, 1998, 626 p.
- [31] PEREIRA, Luís Alberto, Introdução à Máquina de Indução. **PUCRS**, 1999.
- [32] Premrudeepreechacharn, Suttichai; Utthiyoung, Tawee; Kruepengkul, Komkiat; Puongkaew, Pongsatorn, Induction Motor Fault Detection and Diagnosis Using Supervised and Unsupervised Neural Networks. **IEEE ICIT'02**, Bangkok, Tailândia, 2002.
- [33] REIS, Aderson Jamier Santos, Reconhecimento de Padrões de Falhas em Motores Trifásicos Utilizando Redes Neurais. **UFRN**, Natal, 2010.
- [34] RILEY, Caryn M.; LIN, Brian K.; HABETLER, Thomas G.; KLIMAN, Gerald B., Stator Current Harmonics and Their Causal Vibrations: A Preliminary Investigation of Sensorless Vibration Monitoring Applications. **IEEE Transactions on Industry Applications**, Vol. 35, No. 1, Janeiro e Fevereiro de 1999.
- [35] RODRÍGUEZ, Pedro Vicente Jover; NEGREA, Marian; ARKKIO, Antero, A Simplified Scheme for Induction Motor Condition Monitoring Mechanical Systems and Signal Processing. 2008, pp. 1216-1236.
- [36] SCHOEN, Randy R.; LIN, Brian K.; HABETLER, Thomas G.; SCHLAG, Jay H.; FARAG, Samir., An Unsupervised, On-line System for Induction Motor Fault Detection Using Stator Current Monitoring. **IEEE Transactions on Industry Applications**, Vol. 31, No. 6, Novembro e Dezembro de 1995.
- [37] SHAW, Ian S.; SIMÕES, Marcelo Godoy, Controle e Modelagem Fuzzy. 1ª Edição. Volume Único. São Paulo: **Edgard Blücher Ltda**, 1999, 165 p.
- [38] SIDDIQUE, Arfat; YADAVA, G. S.; SINGH, Bhim., A Review of Stator Fault Monitoring Techniques of Induction Motors. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Vol. 20, No. 1, Março de 2005, pp 106-114.
- [39] TRUTT, Frederick C.; CRUZ, Carlos Santa; KOHLER, Jeffery L.; SOTTILE, Joseph., Prediction of Electrical Behavior in Deteriorating Induction Motors. **IEEE Transactions on Industry Applications**, Vol. 29, No. 6, Novembro e Dezembro de 1993, pp 1239-1243.
- [40] WALLISER, R. F.; LANDY, C. F., Determination of Interbar Current Effects in the Detection of Broken Rotor Bars in Squirrel Cage Induction Motors. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Vol. 9, No. 1, Março de 1994.
- [41] YANG, Jia-Qiang; HUANG, Jin; LIU, Tong., Diagnosis of Stator Faults in Induction Motor Based on Zero Sequence Voltage After Switch-off. Journal of Zhejiang University Science, 2007, pp. 165-172.
- [42] YE, Zhongming; WU, Bin; SADEGHIAN, Alireza., Current Signature Analysis of Induction Motor Mechanical Faults by Wavelet Packet Decomposition. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, Vol. 50, No. 6, Dezembro de 2003.
- [43] ZERAOULIA, M.; MAMOUNE, A.; MANGEL, H.; BENBOUZID, M. E. H., A Simple Fuzzy Logic Approach for Induction Motors Stator Condition Monitoring, **J. Electrical Systems** 1-1 (2005): 15-25.