

DETECÇÃO E DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM MOTORES ALIMENTOS POR INVERSORES DE FREQUÊNCIA UTILIZANDO TÉCNICAS INTELIGENTES.

FARLON RABELO DE MELO, LANE MARIA RABELO BACCARINI, LÍVIA DE FÁTIMA S. MENDES

Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de São João del Rei - UFSJ
E-mails: farlonmelo@yahoo.com.br, rabelo@ufsj.edu.br,
livia_eletrica_ufsj@yahoo.com.br

Abstract— The short circuit in the stator windings is a failure that can result in high currents, increasing losses, reduction in yield and the machine will overheat. This overheating causes a rapid deterioration of insulating varnish from other sections of the windings. Therefore fault diagnosis is essential so that there is an unexpected interruption in the production process of an industry. The Support Vector Machines and Response Surface Methodology are tools that have been used in various pattern recognition tasks. So, this work shows that they can identify the presence of a short circuit facilitates maintenance of inverter-fed induction motors drives.

Keywords— Fault diagnosis, Support Vector Machines, Response Surface Methodology.

Resumo— O curto-circuito nos enrolamentos do estator é uma falha que pode acarretar a circulação de elevadas correntes, aumento das perdas, diminuição do rendimento e sobreaquecimento da máquina. Este sobreaquecimento provoca uma rápida deterioração do verniz isolante de outras seções dos enrolamentos. Portanto o diagnóstico de falhas iniciais é imprescindível para que não haja uma interrupção inesperada do processo produtivo de uma indústria. As Máquinas de Vetores de Suporte e de Superfície de Respostas são ferramentas que vem sendo utilizadas em diversas tarefas de reconhecimento de padrões. Assim, este trabalho mostra que essas técnicas podem identificar a presença de curto-circuito inicial em enrolamentos de motores alimentados por inversores de frequência facilitando a manutenção dos motores.

Palavras-chave— Diagnóstico de falhas, Máquinas de Vetores de Suporte, Superfície de resposta.

1 Introdução

O estudo da projeção da demanda de energia elétrica elaborada pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) para o horizonte decenal 2013-2022 mostra uma expansão significativa das indústrias de base que deverão ganhar espaço na matriz industrial do País. Os grandes consumidores industriais considerados contemplam a cadeia do alumínio, siderurgia, ferro ligas, pelotização, cobre, petroquímica (produção de eteno), soda-cloro, papel e celulose, e cimento. Estes segmentos industriais são produtores de insumos básicos que entram na composição de grande quantidade de materiais usados nas mais diversas atividades da economia, desde a construção civil, incluindo obras de infraestrutura, a produção de utensílios de uso cotidiano, passando pela fabricação de máquinas e equipamentos, entre outras aplicações (EPE, 2013).

Esses insumos básicos e os materiais a partir deles fabricados estão intimamente ligados ao modelo de desenvolvimento econômico da sociedade contemporânea. Apesar das legítimas pressões ambientais, que vêm ganhando maior força nos últimos anos e cuja intensidade se prevê crescente, não se visualiza uma ruptura do atual modelo de desenvolvimento econômico, contemplando mudanças fundamentais do paradigma de comportamento da sociedade no horizonte de dez anos (EPE, 2013).

Portanto, com a projeção do aumento da produção industrial e, considerando que o motor de indução trifásico é o responsável pelo acionamento de mais de 90% das cargas motrizes, projetos para a

redução de gastos com manutenção devem ser incentivados.

Falhas em motores de indução geralmente provocam o colapso de todo o sistema de acionamento no qual estão inseridos (Araújo, 2011). Assim, a demanda para estes sistemas de monitoramento cresce, uma vez que a detecção antecipada das falhas permite um alto grau de confiabilidade ao funcionamento dos sistemas, evitando eventuais paradas de produção, perdas materiais, quedas na qualidade de produção e até mesmo acidentes envolvendo seres humanos (Silva, 2012). Este fato resultou na necessidade destes sistemas de supervisão, que possuem como finalidade a automatização dos processos do Gerenciamento de Eventos Anormais (Venkatasubramanian e outros, 2003).

A utilização de inversores de frequência no acionamento do motor de indução é cada vez mais difundida. A economia de energia, as melhorias do processo de controle e o aumento da eficiência são fatores que, dentre outros, têm influenciado fortemente na crescente utilização de sistemas de acionamentos a velocidade variável. Entretanto, a utilização de inversores aumenta os percentuais de falhas que podem ocorrer nos motores.

Falhas nos enrolamentos do estator representam um percentual significativo de falhas (Benbouzid e Kliman, 2003). Estudos mostram que a utilização dos inversores aumenta o percentual de falhas de curto-circuito devido aos transitórios de tensão, que não são aplicados de forma uniforme nas bobinas do enrolamento. Além disso, os transitórios podem chegar a três vezes o valor da tensão nominal do motor (de Paula, 2005; de Paula e outros, 2008).

Atualmente existem diversos métodos utilizados para isto na área de manutenção preditiva, porém muitos deles se mostram de baixo custo/benefício, ineficazes ou mesmo de difícil aplicação em processos reais (Baccarini e outros, 2010). Outra questão existente é o fato de que muitos processos operam de forma contínua ou então em ambientes agressivos, exigindo que o monitoramento ideal seja feito sem parada da máquina, de forma não invasiva e, principalmente, sem expor o técnico ao contato direto com a máquina.

Considerando: i) a ampla utilização de motores de indução trifásicos acionados por inversores PWM em acionamentos industriais; ii) o alto índice de falhas de curto-circuito em enrolamentos do estator; iii) a importância de redução de custo de manutenção e o aumento da disponibilidade desses equipamentos; este trabalho propõe um método não invasivo de diagnóstico de falhas iniciais de curto-circuito em motores alimentados por inversores.

2 Descrição de falhas nos enrolamentos do estator e descrição do modelo assimétrico

A deterioração do isolamento do estator normalmente começa com curto-circuito envolvendo poucas espiras de uma mesma fase. A corrente de falta que é de aproximadamente duas vezes a corrente de partida provoca aquecimento localizado que rapidamente se estende para outras seções do enrolamento. Assim, a detecção de falhas entre espiras é especialmente importante, pois é o começo para a ocorrência das demais falhas nos enrolamentos, tais como: curto-circuito entre bobinas de uma mesma fase e entre bobinas de fases diferentes e, curto-circuito entre fase e terra, que podem resultar em perdas irreversíveis no núcleo do estator (Jagadanand e outros, 2012).

O tempo de evolução de falhas de curto-circuito entre espiras para as demais falhas não pode ser estimado, pois depende das condições de operação do motor. O que se sabe é que a velocidade de evolução é rápida, justificando, dessa forma, o monitoramento contínuo do motor para a detecção da falha. Mas, estudos mostram que o impacto da falha nas características do motor é pequeno, dificultando a sua detecção (Baccarini e outros, 2010).

A representação do funcionamento do acionamento do motor através de modelos matemáticos é uma ferramenta útil uma vez que permite analisar sistemas de diferentes características não ficando limitado aos protótipos presentes nos laboratórios.

O modelo dinâmico simétrico da máquina de indução é conhecido na literatura (Krause, Wasynczuk and Sudhoff, 2002). Existem alguns trabalhos que permitem analisar a operação da máquina na situação de falhas de curto-circuito nos enrolamentos do estator (Baccarini, 2005; Jagadanand e outros, 2012; Liang, 2002). Neste trabalho será adotado o modelo proposto por Baccarini (2005), pois é de baixo custo computacional, necessita do conhecimento de parâ-

metros que o usuário possui e tem similaridade com o modelo simétrico.

A seguir apresenta-se uma breve descrição do modelo, sendo que os sub índices s e r, representam as grandezas do estator e rotor, respectivamente, i_f a corrente de falta, d e q são as grandezas em coordenadas de eixo direto e quadratura e as letras v, i, λ , r e L são utilizadas para tensão, corrente, fluxo, resistência e indutância, respectivamente.

O percentual de espiras em curto é expresso pela equação abaixo:

$$\mu = \frac{n_{as2}}{n_{as1} + n_{as2}} = \frac{n_{as2}}{n_{as}} \quad (1)$$

Onde:

n_{as1} – número de espiras que não estão em curto;

n_{as2} – número de espiras em curto;

n_{as} - número total de espiras de uma fase.

As tensões do estator (V_{as} , V_{bs} e V_{cs}) são transformadas para o eixo dq através da aplicação da *Transformada de Park*, obtendo-se as seguintes expressões:

$$v_{qs} + \frac{2}{3}\mu r_s i_f \cos \theta = r_s i_{qs} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} + \omega \lambda_{ds} \quad (2)$$

$$v_{ds} + \frac{2}{3}\mu r_s i_f \sin \theta = r_s i_{ds} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} - \omega \lambda_{qs} \quad (3)$$

As equações do circuito do rotor são idênticas às do rotor do modelo tradicional. As equações em coordenadas dq para o cálculo dos fluxos do estator e do rotor são dadas pelas equações (4) – (7), sendo L_s e L_m as indutâncias próprias e mútuas do estator.

$$\lambda_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} - \frac{2}{3}\mu L_s i_f \cos \theta, \quad (4)$$

$$\lambda_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} - \frac{2}{3}\mu L_s i_f \sin \theta, \quad (5)$$

$$\lambda_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} - \frac{2}{3}\mu L_m i_f \cos \theta, \quad (6)$$

$$\lambda_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} - \frac{2}{3}\mu L_m i_f \sin \theta, \quad (7)$$

A corrente i_f representa a corrente nas espiras em curto-circuito. A tensão e o enlace de fluxo nas espiras em curto-circuito podem ser explicitados em função das correntes de eixo dq . Assim:

$$V_{as2} = \mu r_s (i_{ds} \cos \theta + i_{qs} \sin \theta - i_f) + \frac{d\lambda_{as2}}{dt} = r_f i_f, \quad (8)$$

$$\lambda_{as2} = \mu L_{ls} (i_{ds} \cos \theta + i_{qs} \sin \theta - i_f) + \mu L_m (i_{ds} \cos \theta + i_{qs} \sin \theta + i_{dr} \cos \theta + i_{qr} \sin \theta - \frac{2}{3}\mu i_f) \quad (9)$$

O conjugado é obtido pela equação (10). O 1º termo representa o conjugado desenvolvido pelo

motor que é idêntico ao do motor simétrico. O 2º termo é consequência da falha de curto-circuito e depende do número de espiras em curto e da corrente de curto-circuito:

$$T = \frac{3p}{2} L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) + \frac{p}{2} \mu L_m i_f (i_{qr} \sin \theta - i_{dr} \cos \theta), \quad (10)$$

As implementações das equações de (1) a (10) permitem obter os fluxos, a velocidade, o torque e as correntes para a operação do motor em condições de curto-circuito. As componentes em coordenadas dq podem ser transformadas para as coordenadas de fase abc . Os sinais no tempo podem ser analisados no domínio da frequência utilizando a Transformada Rápida de Fourier.

3 Metodologia Utilizada

As cargas industriais são classificadas em cinco grandes grupos: constante, linear, quadrática, inversa e não uniforme. Nesta pesquisa foram consideradas as cargas de conjugado constante, linear e quadrática, que são as mais encontradas.

Os inversores de frequência são conversores estáticos indiretos de frequência com tensão imposta PWM e atualmente estão sendo bastante aplicados para o controle de velocidade de motores de indução trifásicos em indústrias. A modulação PWM utilizado no projeto foi proposta por Hava, Kerkman e Lipo (1999). As tensões de saída do inversor de frequência são dadas pelas equações (11) - (13), onde S_{ap} , S_{an} , S_{bp} , S_{bn} , S_{cp} e S_{cn} representam os estados dos transistores e recebem valores 0 (aberto) ou 1 (fechado) de acordo com a interseção entre ondas de referência e a triangular.

$$V_{as} = (S_{ap} - S_{an}) \frac{V_{dc}}{2}, \quad (11)$$

$$V_{bs} = (S_{bp} - S_{bn}) \frac{V_{dc}}{2}, \quad (12)$$

$$V_{cs} = (S_{cp} - S_{cn}) \frac{V_{dc}}{2}, \quad (13)$$

Quatro motores de indução trifásicos de diferentes características foram analisados. Os parâmetros do circuito equivalente e os valores nominais de cada motor seguem abaixo:

Motor 1: 3hp, 220V, 60 Hz, 1710 rpm, 11.9N.m

$$r_s = 0.435\Omega; r'_r = 0.816\Omega \\ X_{ls} = 0.754\Omega; X'_{lr} = 0.754\Omega; X_m = 26.13\Omega$$

Motor 2: 50hp, 460V, 60 Hz, 1705 rpm, 198N.m

$$r_s = 0.087\Omega; r'_r = 0.228\Omega \\ X_{ls} = 0.302\Omega; X'_{lr} = 0.302\Omega; X_m = 13.08\Omega$$

Motor 3: 500hp, 2.3kV, 60Hz, 1773rpm, 1980N.m

$$r_s = 0.262\Omega; r'_r = 0.187\Omega \\ X_{ls} = 1.206\Omega; X'_{lr} = 1.206\Omega; X_m = 54.02\Omega$$

Motor 4: 2250hp, 2.3kV, 60Hz, 1786rpm, 8.9kN.m

$$r_s = 0.029\Omega; r'_r = 0.022\Omega \\ X_{ls} = 0.226\Omega; X'_{lr} = 0.226\Omega; X_m = 13.04\Omega$$

A tabela 1 mostra a variação dos parâmetros usados nas simulações:

Tabela 1. Variação dos parâmetros usados nas simulações

Parâmetro	Menor valor (%)	Maior Valor (%)
Carga	30	70
Tensão	50	110
Frequência	50	110
Espiras em curto-circuito (percentual de falhas)	0	5

Neste trabalho serão apresentados os resultados para o Motor 1. Foi construído para cada motor um banco de dados com 600 simulações, sendo 400 com percentual de curto-circuito inicial e os outros 200 sem falhas. Estes bancos de dados foram formados pelas amplitudes da componente fundamental das tensões e das correntes do estator e de suas respectivas amplitudes da componente de terceiro harmônico dos mesmos, extraídos através da Transformada Rápida de Fourier. Além das componentes das tensões e correntes, os bancos de dados possuem também informações da carga, da tensão de referência do inversor, da frequência e do percentual de espiras em curto-circuito, que são escolhidos aleatoriamente.

4 Método de diagnóstico proposto

As Máquinas de Vetores de Suporte (SVMs, do Inglês *Support Vector Machines*) constituem uma técnica de aprendizado que vem recebendo crescente atenção da comunidade acadêmica (Vapnik, 1999). Os resultados da aplicação dessa técnica são comparáveis e muitas vezes superiores aos obtidos por outros algoritmos de aprendizado, como as Redes Neurais Artificiais (RNAs). Exemplos de aplicações de sucesso podem ser encontrados em diversos domínios, como na categorização de textos, na análise de imagens e em Bioinformática.

Avelar, Baccarini e Amaral (2011) comprovaram a eficiência da utilização de Máquinas de Vetores de Suporte (SVMs) no diagnóstico de curto-circuito entre espiras em motores alimentados diretamente da rede. O método proposto utiliza apenas os sinais dos sensores de corrente. Assim, neste trabalho a técnica será aplicada em motores alimentados por inversores PWM.

A metodologia de Superfícies de Resposta (MSR) é uma técnica que emprega métodos estatísticos para criar funções tipicamente polinomiais para representar a resposta ou o resultado de um experimento numérico em termos de diversas variáveis independentes. O objetivo principal da MSR é obter uma relação funcional aproximada entre uma determinada resposta de interesse e um conjunto de variáveis de entradas (Montgomery, 2001).

Logo, com a técnica de Superfície de Respostas e dados do espectro de corrente do MIT nas frequências características das falhas é possível gerar modelos que permitem o diagnóstico das condições de operação do motor. A utilização da técnica para diagnóstico inicial de curto-circuito em motores alimentados por inversores também foi analisada e comparada com a utilização de SVM.

As funções de primeira e segunda ordem que modelam a superfície de resposta são demonstradas nas expressões (14) e (15). Nessas equações y representa a saída, β os coeficientes do modelo, x as variáveis independentes e ε outras formas de variação possíveis como erros ou falta de convergência numérica. O cálculo dos coeficientes do modelo é feito através do método dos mínimos quadrados.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k \quad (14)$$

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k + \beta_{11} x_1^2 + \dots + \beta_{kk} x_k^2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \dots + \beta_{(k-1)k} x_{k-1} x_k + \varepsilon \quad (15)$$

5 Resultados

As componentes fundamentais das correntes do estator estão distribuídas no plano R^3 na Figura 1, para a situação de operação simétrica ou com presença de curto-circuito inicial entre espiras de uma mesma bobina. Nota-se que as componentes estão bastante difundidas facilitando a classificação da falha por uma técnica inteligente.

A Figura 2 mostra as componentes de terceiro harmônico das correntes no plano R^3 do Motor 1. Observa-se que alguns padrões se misturam dificultando o diagnóstico. Analisando as Figuras 1 e 2, percebe-se que não é preciso utilizar as componentes de terceiro harmônico das correntes como entradas do sistema de diagnóstico. Essas análises foram realizadas para os quatro motores de indução descritos na seção 3.

Com os bancos de dados de treinamento e os bancos de dados de validação, foram avaliados todos os testes simulados computacionalmente. Os parâmetros de regularização foram variados entre 1 a 1000000 e a variância da função RBF entre 0,1 a 10.

Tanto para a etapa de treinamento quanto para a de validação o sistema **apresentou índice de acerto de 100%**, ou seja, o sistema diagnosticou a presença de curto-circuito inicial e não forneceu falsos alarmes.

Para o método da superfície de resposta foram utilizadas as amplitudes da componente fundamental das correntes. A matriz y foi formada de valores 1 para pontos correspondentes a testes de operação normal e -1 para pontos correspondentes a testes de curto-circuito. Logo, a superfície deve encontrar valores positivos para a condição normal e negativos para a condição com presença de curto-circuito. Então, por meio da equação 14 foi calculado o modelo correspondente de primeira ordem (Equação 16) e de segunda ordem (Equação 17).

$$y = -0,7660 - 0,9043x_1 - 1,0822x_2 + 1,9674x_3 \quad (16)$$

$$y = -0,8418 - 2,7648x_1 - 2,2260x_2 + 4,9567x_3 - 0,9480x_1^2 - 0,7064x_2^2 - 3,1105x_3^2 - 1,4614x_2 + 3,3822x_1x_3 + 2,8459x_2x_3 \quad (17)$$

Sendo:

x_1 a componente fundamental da corrente na fase a (I_a);

x_2 a componente fundamental da corrente na fase b (I_b);

x_3 a componente fundamental da corrente na fase c (I_c).

A Figura 3 exibe as respostas calculadas pela superfície de resposta de primeira ordem a partir dos dados de validação e a Figura 4 exibe as respostas calculadas pela superfície de resposta de segunda ordem. Os dados foram organizados de forma que os primeiros 60 pontos correspondem à condição normal, os demais pontos correspondem aos testes com curto-circuito. Utilizando apenas as componentes fundamentais das três correntes os modelos obtiveram resultados satisfatórios. O modelo de primeira ordem obteve 98% de acertos e 1% de falso alerta e o modelo de segunda ordem obteve 100% de acertos, o que é claramente observado nas Figuras 3 e 4.

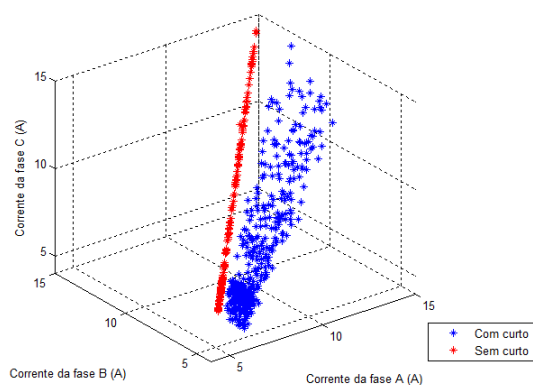


Fig. 1. Gráfico das componentes fundamentais das correntes.

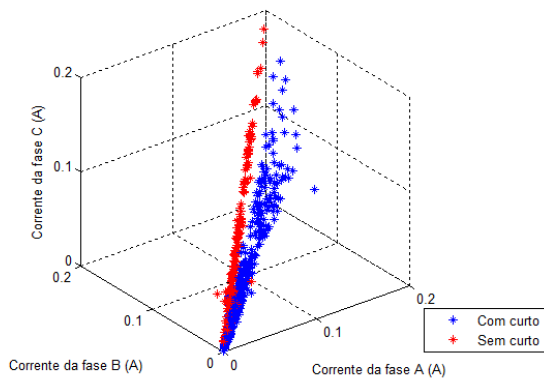


Fig. 2. Gráfico das componentes de terceiro harmônico das correntes.

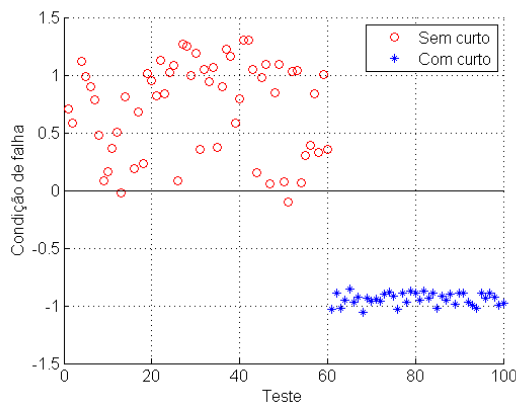


Fig. 3. Gráfico demonstrativo dos testes do método da superfície de resposta de primeira ordem.

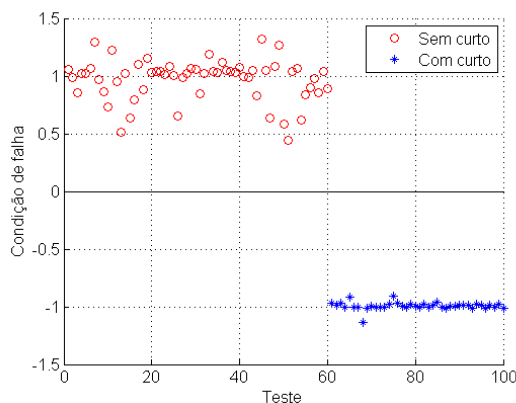


Fig. 4. Gráfico demonstrativo dos testes do método da superfície de resposta de segunda ordem.

6 Conclusão

O projeto mostrou a eficiência das Máquinas de Vetores de Suporte no diagnóstico de falhas iniciais de curto-circuito entre espiras do estator em motores alimentados por inversores de frequência. O desempenho dos testes utilizando o SVM foi totalmente efetivo, pois o sistema proporcionou um índice de acertos de 100% diferenciando quando há ou não a falha inicial.

O diagnóstico de curto-circuito inicial também foi testado utilizando a técnica de Superfície de Resposta (RSM) que também alcançou resultados significativos com fácil visualização para diferenciar situações de falhas de operação simétrica. Apesar do modelo de primeira ordem ter apresentado bons resultados, o modelo de segunda ordem apresentou melhor qualidade no diagnóstico. Como o aumento do esforço computacional para a solução deste é ínfimo comparado ao modelo de primeira ordem, este é o melhor modelo para diagnosticar o curto-circuito inicial entre espiras do estator.

A partir das análises realizadas o presente trabalho propõe como método de diagnóstico de curto-circuito inicial entre espiras do estator a utilização da técnica de Superfície de Resposta, pois é de fácil implementação e baixo custo computacional, podendo ser utilizada em uma planta industrial.

O método proposto é não invasivo, pois necessita do conhecimento de sinais de sensores normalmente presentes na planta que são os sensores de corrente.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPEMIG, Projeto Demanda Universal 01/2011, TEC APQ-00589-11.

Referências Bibliográficas

- Araújo, R. de S. (2011) Desgaste Prematuro e Falhas Recorrentes em Rolamentos de Motores de Indução Alimentados por Inversores: Análise e Proposta de Solução, Dissertação de Mestrado, UFMG.
- Avelar, V. S.; Baccharini, L. M. R.; Amaral, G. F. V. (2011). Desenvolvimento de um sistema inteligente para diagnóstico de falhas nos enrolamentos do estator de Motores de indução. X SABI – Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente. São João Del Rei – MG – Brasil.
- Baccharini, L. M. R. (2005). *Detecção e Diagnóstico de Falhas em Motores de Indução*, Faculdade de Engenharia Elétrica, UFMG, 179 p. Tese.
- Baccharini, L. M. R.; Menezes, B. R. de; Caminhas, W. M. (2010). *Fault induction dynamic model for computer simulation: simulation results and experimental validation*. Mech. Syst. Signal Process. 24 (1) 300-311.
- Benbouzid, M. E. H., Kliman, G. B. (2003). What Stator Current Processing-Based Technique to Use for Induction Motor Rotor Faults Diagnosis? IEEE Transaction on Energy Conversion, v.18 (2), pp. 1078-1084.
- de Paula, H. (2005). Uma nova metodologia para a determinação dos fenômenos de alta frequência em sistemas de acionamento de motores de indução através de inversores pwm. Tese de doutorado, Universidade Federal de Uberlândia.

- de Paula, H., de Andrade, D. A., Chaves, M. L. R., Domingos, J. L., and de Freitas, M. A. A. (2008). Methodology for cable modeling and simulation for high frequency phenomena studies in pwm motor drives. *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, vol. 23, n. 2, pp. 744 - 752.
- EPE (2013), Projeção da demanda de energia elétrica para os próximos 10 anos, endereço eletrônico: <http://www.epe.gov.br/mercado/Documentos>
- Jagadanand G., Lalgy G., Saly G. and Jeevamma J, (2012). Inter-turn fault detection in induction motor using stator current wavelet decomposition, *International Journal of Electrical Engineering & Technology*, 3 (2), pp. 103-122.
- Hava, A. M.; Kerkman R. J.; Lipo T. A. (1999). Simple analytical and graphical methods for carrier-based PWM-VSI drives. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 14 (1), pp 49-61.
- Krause, P. C.; Wasynczuk, O.; Sudhoff, S. D. (2002). *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*. IEEE Computer Society Press/John Wiley. New York.
- Montgomery, D.C (2001), Design and analysis of experiments, John Wiley & Sons, London, UK.
- Liang B., Payne B.S., Ball A.D. and Iwnicki, S.D. (2002). Simulation and fault detection of three-phase induction motors, *Mathematics and Computers in Simulation* 61 (2002), pp. 1–15.
- Silva G. C. (2012). Teoria e Aplicações de Algoritmos Imunoinspirados para Detecção e Diagnóstico de Falhas em Sistemas Dinâmicos, Trabalho de Qualificação, Universidade Federal de Minas Gerais, Engenharia Elétrica, 2012.
- Vapnik, V. N. (1999). *An overview of statistical learning theory*. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 10(5): pp. 988-999.
- Venkatasubramanian, V., Rengaswamy, R., and Kavuri, S. N. (2003a) A review of process fault detection and diagnosis - part I: Quantitative model-based methods. *Computers and Chemical Engineering*, 27(3):293–311.
- Venkatasubramanian, V., Rengaswamy, R., and Kavuri, S. N. (2003b). A review of process fault detection and diagnosis - part II: Qualitative models and search strategies. *Computers and Chemical Engineering*, 27(3):313–326.