

ACOMPANHAMENTO PREDITIVO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS ATRAVÉS DA ANÁLISE DE FLUXO MAGNÉTICO

PREDICTIVE MONITORING OF THREE-PHASE INDUCTION MOTORS THROUGH THE MAGNETIC FLUX ANALYSIS

Paulo César Monteiro Lamim Filho ⁽¹⁾

Jorge Nei Brito ⁽²⁾

André Luis Christoforo ⁽³⁾

Resumo

Este trabalho propõe a implementação de um transdutor (bobina de fluxo) sensível às ondas eletromagnéticas dentro dos motores de indução trifásicos, identificando as frequências determinísticas relacionadas ao defeito de barras quebradas. Os espectros coletados com este novo sensor são comparados com os advindos de um sensor comercial, o que permite demonstrar sua eficiência. A análise de fluxo apresentou maior sensibilidade quando comparada à análise de corrente, acarretando em menores valores para a severidade. As bobinas implementadas, tanto na posição radial quanto na axial, apresentaram resultados mais significativos. Pôde-se observar, ainda da análise de fluxo magnético, que é possível diagnosticar o problema na frequência $1 \times f_1 - 1 \times f_s$, mesmo sendo comum o diagnóstico na frequência $1 \times f_1 \pm 2 \times f_s$.

Palavras-Chave: Bobina de fluxo. Frequências determinísticas. Manutenção.

¹ Engenheiro Eletricista, Dr. em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João Del-Rei, UFSJ, E-mail: plamim@ufsj.edu.br

² Engenheiro Mecânico, Dr. em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João Del-Rei, UFSJ, E-mail: brito@ufsj.edu.br

³ Engenheiro Civil, Dr. em Engenharia de Estruturas, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São João Del-Rei, UFSJ, E-mail: alchristoforo@ufsj.edu.br

Abstract

This paper considers the implementation, inside the three-phase induction motors, of a special sensor (flux coil) sensitive to electromagnetic waves, thus permitting to identify the deterministic frequencies related with broken rotor bars. The spectra acquired with the special sensor are compared with the ones come from a commercial sensor, which shows the efficiency of the first. The coils implemented in radial and in axial positions showed more significant results. It could still be seen from the analysis of magnetic flux that it is possible to diagnose the problem in frequency $f_l \times 1 - x 1 f_s$, even though diagnosis in the frequency $1 \times 2 \times f_l \pm f_s$ is common.

Keywords: *Flux coil. Deterministic frequencies. Maintenance.*

1 Introdução

A maioria das máquinas modernas opera a partir de motores de indução trifásicos que podem, com o uso, desenvolver falhas. Estas falhas podem causar paradas da máquina e ou diminuição do nível de eficiência do processo produtivo. Quando uma máquina desenvolve uma falha, ela apresenta indícios de defeitos de várias formas: mudanças nos sinais de vibrações, variação na temperatura, ruídos e alterações no campo eletromagnético.

Os motores de indução trifásicos são largamente utilizados nos acionamentos de bombas, compressores, ventiladores, equipamentos para processamento e manuseio de cargas e em várias outras diferentes aplicações na indústria, devido à sua solidez e versatilidade. Vários trabalhos têm sido desenvolvidos, destacando-se as questões-chave relativas à confiabilidade e ao custo efetivo de operação dos motores que são: a alta qualidade, o conhecimento minucioso da aplicação, a escolha certa do tipo do motor para uma aplicação específica e a manutenção correta (BRITO, 2002).

A detecção de defeitos quando estão ainda em fase de desenvolvimento, através da comparação de espectros de fluxo magnético, vibração e corrente elétrica, possibilita ao engenheiro de manutenção planejar uma ação corretiva com relação ao defeito previsto.

O diagnóstico de defeitos a partir da análise de fluxo magnético tem sido proposto por fabricantes de equipamentos da área de monitoramento de máquinas. Entretanto, esta técnica tem sido pouco estudada de forma aprofundada por pesquisadores. Através de estudos preliminares já realizados, constatou-se algumas vantagens em relação às técnicas convencionais de análise de corrente, como por exemplo, a não necessidade do conhecimento

da carga do motor e do número de barras e ranhuras para a detecção de curto-circuito entre espiras (LAMIM FILHO *et al.*, 2000; LAMIM FILHO *et al.*, 2001; BACCARINI *et al.*, 2001).

Segundo Thomson *et al.* (1983), por definição os motores elétricos produzem fluxo magnético. Qualquer pequeno desbalanceamento no fluxo ou no circuito elétrico é refletido no fluxo transmitido axialmente. As principais causas da mudança de características da simetria são: barras quebradas do rotor, desequilíbrio de fases e anomalias nos enrolamentos do estator: curto entre espiras e curto entre fases.

Este trabalho propõe uma metodologia alternativa para o monitoramento do fluxo magnético para o acompanhamento preditivo de motores de indução trifásicos através da detecção de barras quebradas. Para isto, foi-se implementado um transdutor (*bobina de fluxo*) sensível às ondas eletromagnéticas dentro dos motores de indução trifásicos, identificando as frequências determinísticas relacionadas aos defeitos comuns a estes tipos de máquinas. Os espectros coletados com este novo sensor são comparados com um sensor comercial, mostrando sua eficiência.

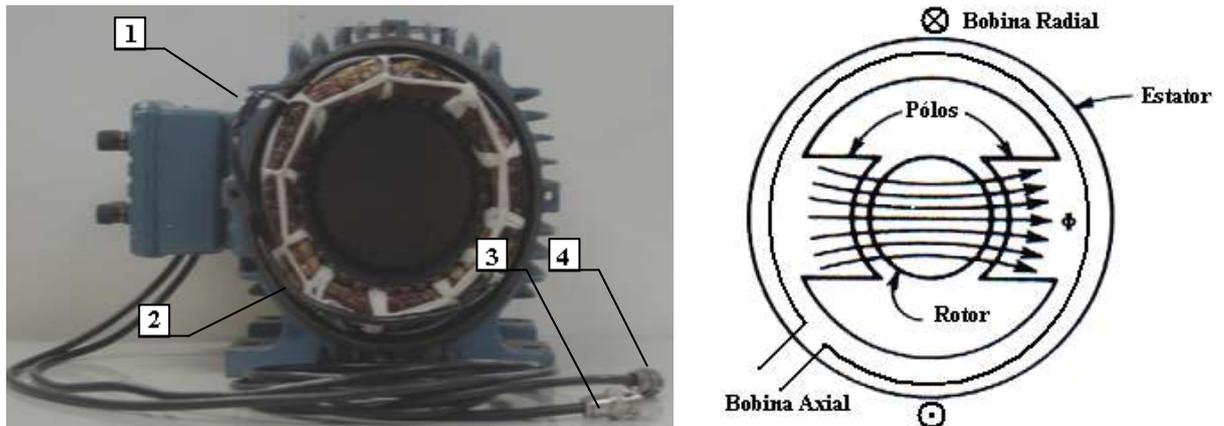
O estudo foi realizado em um motor de 5 CV e 4 pólos, a partir de resultados experimentais obtidos em uma bancada de teste, identificando-se suas frequências determinísticas. Os espectros de corrente e de fluxo magnético foram obtidos para a condição normal de funcionamento ("assinatura do motor") e com a introdução de sete barras quebradas.

2 Implementação do transdutor (bobina de fluxo)

Um transdutor se caracteriza por um dispositivo capaz de responder ao fenômeno físico, ou estímulo, de forma a converter sua magnitude em um sinal elétrico conhecido, proporcional à amplitude desse estímulo. Os transdutores também são conhecidos como conversores de sinais.

O transdutor proposto constitui-se de uma bobina de fio de cobre contendo uma espira na posição radial [1] e duas espiras na posição axial [2], assim como ilustrado na Figura 1.

FIGURA 1 - Estator com as bobinas implementadas.

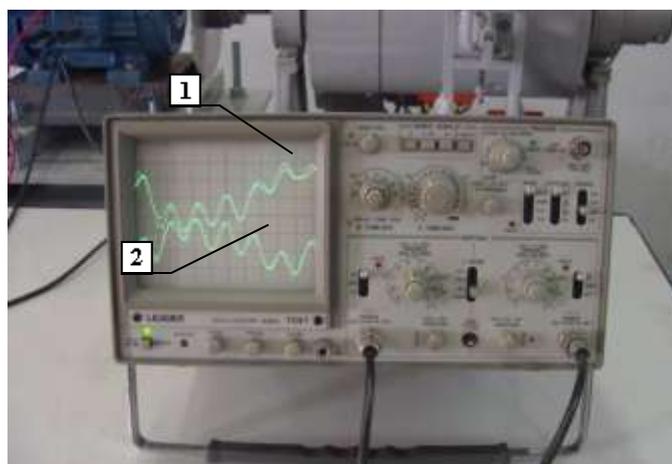


Partindo-se do princípio de funcionamento do motor de indução trifásico, segundo Lamim Filho (2003), as bobinas encontram-se imersas no campo girante produzido pelas correntes no estator. Conseqüentemente, nos terminais de saída [3] e [4] tem-se uma tensão induzida compatível com os níveis de entrada para os coletores de sinais existentes no mercado.

Neste trabalho utilizou-se o coletor Ultraspec 8000 da CSI - Computational System Incorporated para coletar os espectros através dos sensores: alicate amperímetro (análise de corrente), bobina de fluxo CSI e bobina de fluxo implementada (análise de fluxo magnético).

A Figura 2 apresenta o sinal da bobina de fluxo proposta na posição axial [1] e radial [2]. Os sinais foram monitorados através de um osciloscópio, garantindo que os níveis de tensão estivessem dentro da faixa permitida (± 12 V) pelos coletores de sinais encontrados no mercado. A amplitude dos sinais das bobinas de fluxo implementadas foram ajustadas em ± 1 V, valor aproximado da bobina comercial.

FIGURA 2 - Medição dos sinais obtidos das bobinas.



Qualquer variação na intensidade do campo magnético é responsável por causar uma mudança na forma de onda da tensão induzida na bobina de fluxo [1] e [2]. Isto permite, através da *Fast Fourier Transform (FFT)*, identificar o tipo de problema que está causando perturbação no comportamento dinâmico da máquina elétrica.

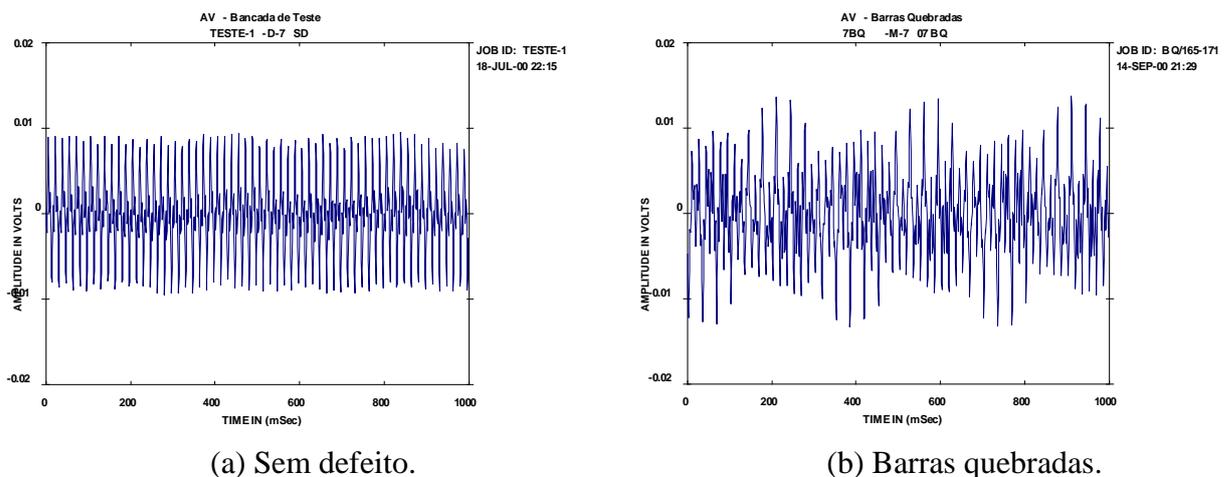
2.1 Análise de fluxo magnético (barras quebradas)

Em um motor de indução trifásico com rotor de gaiola, barras quebradas ou trincadas perturbam o fluxo magnético fazendo flutuar a frequência do rotor e, conseqüentemente, a rotação e a corrente do motor (ALMEIDA, 1994).

Vários autores têm pesquisado o problema de barras quebradas e o desenvolvimento de técnicas para realizar o seu diagnóstico, tais como Lamim Filho (2003), Brito (2002), Bernardo (2002), Brito *et al.* (2001), Milimonfared *et al.* (1998), Penman e Stavrou (1996), Walliser e Landy (1994) entre outros.

Medindo-se o fluxo magnético no interior do motor elétrico, a análise da forma de onda permite visualizar as modulações causadas pelo rompimento das barras do rotor, assim como ilustrado na Figura 3.

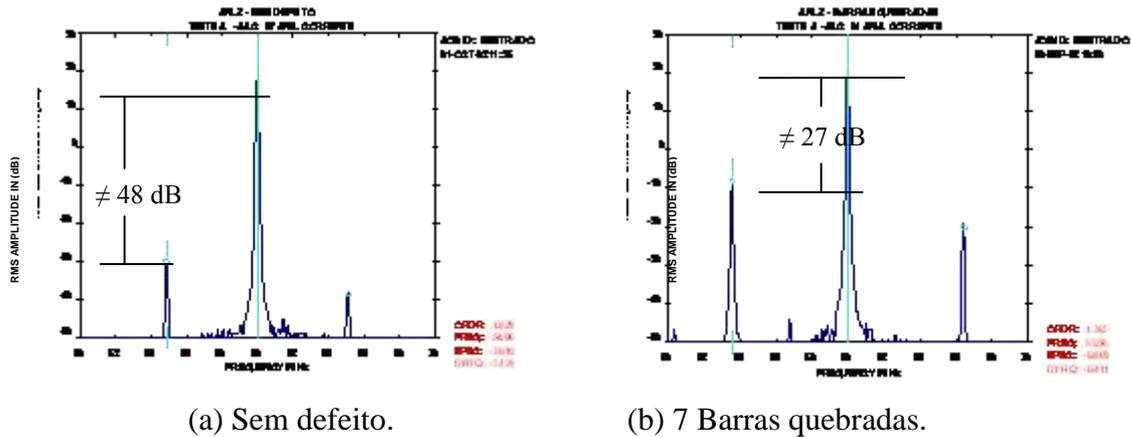
FIGURA 3 - Exemplo da mudança detectada na densidade de fluxo magnético.



A detecção do problema de barras quebradas é feita pela verificação das bandas laterais de duas vezes a frequência de escorregamento (f_s) em torno da frequência de linha (f_1)

(Figura 4). Quanto menor a diferença em dB das duas amplitudes maior o número de barras quebradas (LAMIM FILHO, 2003).

FIGURA 4. Espectro com barras quebradas.



(a) Sem defeito.

(b) 7 Barras quebradas.

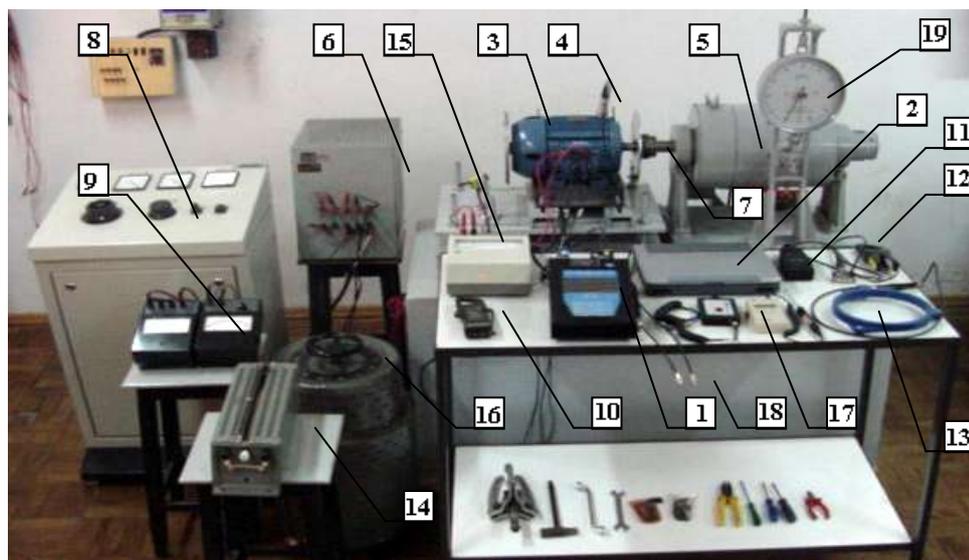
2.2 Testes experimentais

Os testes experimentais foram realizados no Laboratório de Acionamentos Elétricos da UFSJ-Universidade Federal de São João del Rei. Os sinais foram coletados através do coletor e analisador de sinais *UltraSpec 8000* [1], que digitaliza e memoriza as informações nele contidas. Estas informações podem ser analisadas diretamente no próprio equipamento ou então transferidas para o computador [2] através do software de apoio *UltraManager*. Nesta opção, tem-se um ambiente mais confortável de trabalho, permitindo análises detalhadas, geração de relatórios técnicos e montagem dos bancos de dados.

O defeito foi introduzido num motor de indução trifásico [3], WEG (FH 88747), rotor gaiola, 5 CV, 1730 rpm, 220 V, 60 Hz, 4 pólos, categoria N, 44 barras, 36 ranhuras, rolamento SKF 6205-2Z, ID-1, carcaça 100L, classe de isolamento B, FS 1,15, Ip/In 7,5, IP 55, 13,8 A, cedido pela WEG Motores.

Um gerador CC [5] alimentando um banco de resistência [6] foi utilizado como sistema de carga. Aplicou-se a carga no motor através do ajuste da corrente de campo do gerador CC. O gerador está acoplado ao motor elétrico através de um acoplamento flexível [7], cedido pela Flender do Brasil Ltda. A Figura 5 apresenta a montagem da bancada de teste instrumentada.

FIGURA 5 - Bancada experimental.



Usou-se também uma monitoração paralela através de um voltímetro de precisão *Engro* [15] modelo 600, voltímetro e amperímetro *CC H & B do Brasil* [9], alicate digital *Dawer* [10] modelo CM-600, termômetro digital *Mit Exata* [17] modelo ME 1200 K, dinamômetro *Oswaldo Filizola* [19], capacidade de 10 kg x 50 g, e tacômetro *Opto Tako* [11]. O objetivo desta monitoração consiste em garantir o funcionamento do motor em teste com carga nominal, simulando a condição real de funcionamento. A estrutura flexível da bancada experimental e o motor trabalhando com carga nominal possibilitaram que os defeitos introduzidos se tornem mais perceptíveis nos espectros.

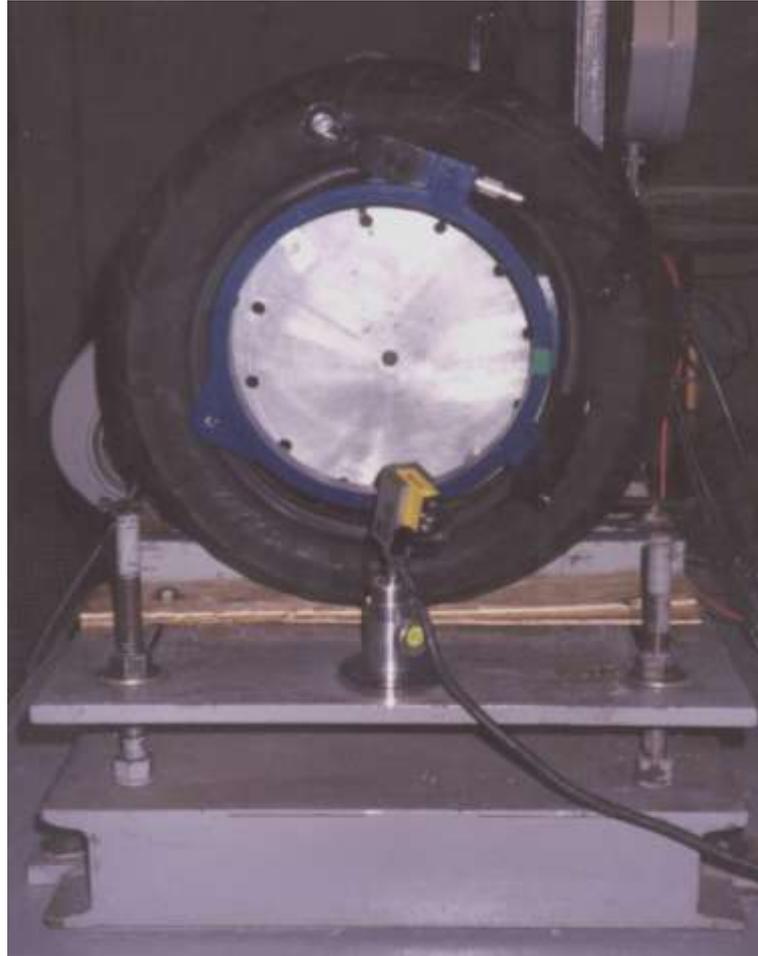
Através das leituras do voltímetro tem-se a informação dos níveis de tensão nas três fases de alimentação do motor. No painel de controle do gerador *CC* [8] também é possível monitorar a corrente de armadura, tensão de armadura e velocidade.

Através de firmwares específicos do *UltraSpec 8000*, fez-se o balanceamento e alinhamento a *laser* da bancada de teste e verificou-se possíveis folgas mecânicas (base frouxa do motor). Com isso pode-se obter os espectros de corrente e fluxo magnético para a condição considerada sem defeito, ou seja, “assinatura do motor”.

Para a análise do comportamento do motor submetido à condição de barras quebradas, realizou-se uma série aleatória de 10 testes para as seguintes situações: sem a introdução de defeito e com sete barras quebradas.

Os espectros de fluxo magnético foram coletados através da bobina de fluxo implementada na posição radial, axial e da bobina de fluxo (343 *Flux Coil*) da *CSI*, afixada central e axialmente ao motor elétrico, mantendo-se sempre a mesma posição (Figura 6).

FIGURA 6 - Bobina de fluxo fixada axialmente.



Devido à necessidade de colocação do disco de balanceamento no lado da ventoinha, instalou-se a bobina de fluxo num suporte (pneu), fixado à estrutura da bancada. A Figura 7 apresenta a bobina de fluxo CSI e um exemplo da medição em campo.

FIGURA 7 - Medição em campo com a bobina CSI.



3 Análise de corrente e fluxo magnético

Neste item apresentam-se os espectros coletados através da análise de corrente e análise de fluxo magnético com a bobina de fluxo CSI e bobina de fluxo implementada. Para cada tecnologia são apresentados os espectros e a análise dos resultados para barras quebradas ou trincadas.

Brito (2002) apresentou novos resultados para a detecção de barras quebradas através da análise de corrente, fluxo magnético e vibração, tendo como parâmetros de análise as frequências de $1 \times f_r \pm 2 \times f_s$ para análise de vibração e $1 \times f_1 \pm 2 \times f_s$ para análise de corrente e fluxo magnético.

Geralmente, nas análises de corrente e fluxo o diagnóstico é feito em $1 \times f_1 \pm 2 \times f_s$. Neste trabalho, além dessas frequências propõe-se a análise também em $1 \times f_1 \pm 1 \times f_s$.

O rompimento das 7 barras do rotor foi feito através de uma broca com diâmetro de 5mm. A Figura 8 apresenta uma vista do rotor com as sete barras rompidas.

FIGURA 8 - Rotor com as sete barras rompidas.



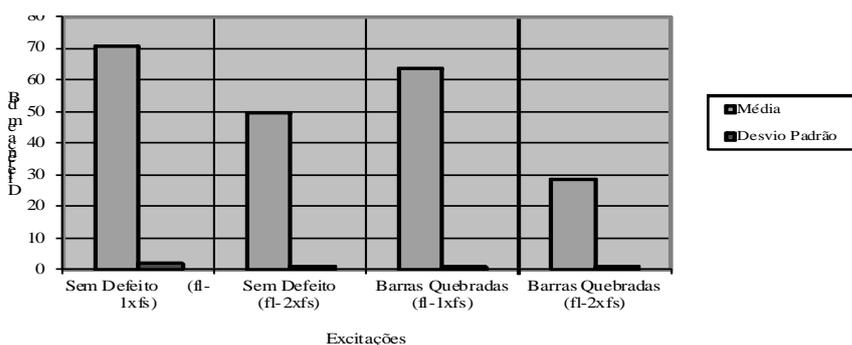
Os sinais foram coletados através do transdutor (bobina de fluxo) implementado na posição radial e axial do motor, bobina de fluxo CSI e alicate amperímetro CSI. O analisador foi configurado para janela *Hanning*, 3200 linhas, 10 médias, faixa de frequência de 0 a 200 Hz e amplitudes medidas em dB. Os espectros de fluxo magnético apresentados em dB são referenciados à tensão de 1 V e os de corrente elétrica apresentados em dB são referenciados à corrente de 1 A.

3.1.1 Detecção de barras quebradas através da análise de corrente

Os espectros de corrente das barras quebradas foram coletados através de um alicate amperímetro (*AC Current Probe*), modelo MM 185 da *AEMC instruments* e colocado sempre na fase "c" de alimentação do motor elétrico. Este sensor tem entrada de 150 A, AC saída de 1 mA/A AC, relação de 1 para 0,005.

Na Figura 9 são apresentadas a média e o desvio padrão amostral da diferença em dB da amplitude da frequência da linha (f_1) e as bandas laterais de uma e duas vezes a frequência de escorregamento (f_s) para os dez testes realizados. Observa-se que para a situação sem defeito (SD) as diferenças estão em torno de 70 e 47 dB e para 7 barras quebradas (BQ), essa diferença diminui para 63 e 27 dB.

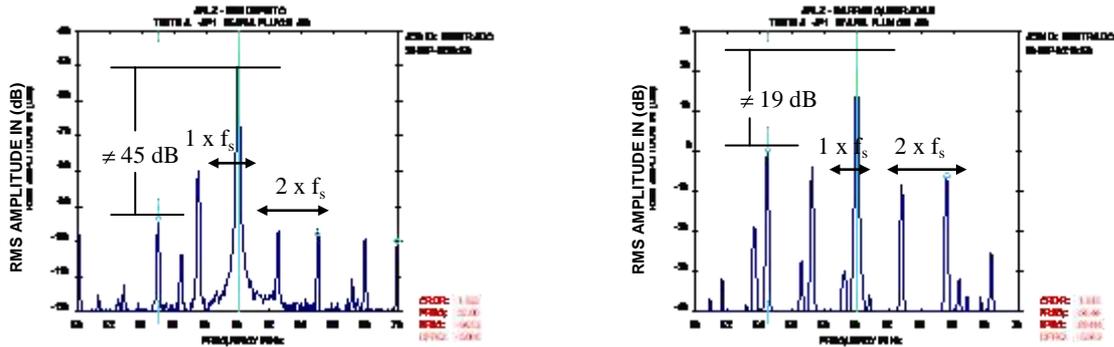
FIGURA 9 - Média e desvio padrão amostral das diferenças em dB.



3.1.2 Detecção de barras quebradas através da análise de fluxo magnético (bobina CSI)

A Figura 10 apresenta os espectros escolhidos aleatoriamente para a condição normal de funcionamento e sete barras quebradas respectivamente.

FIGURA 10 - Espectro de fluxo magnético (bobina CSI).

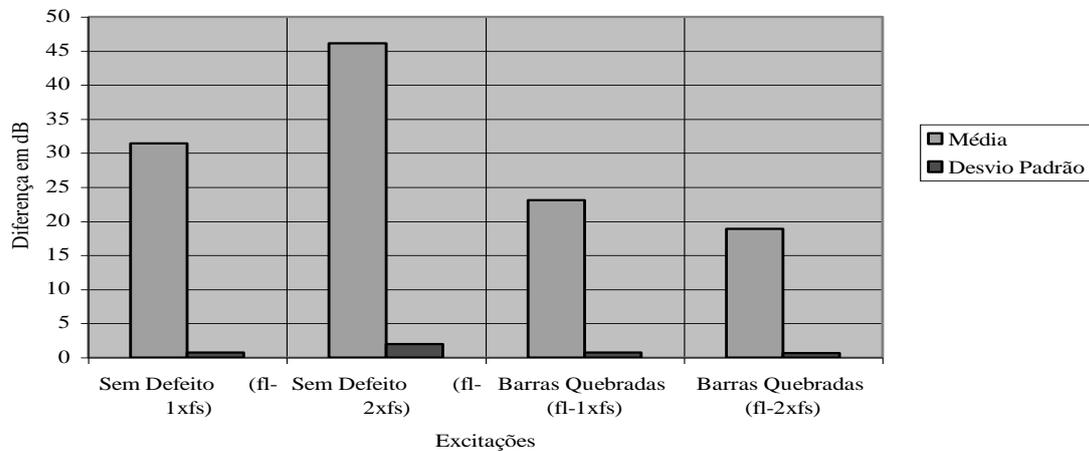


(a) Espectro de fluxo sem defeito.

(b) Espectro de fluxo com 7 barras quebradas.

A Figura 11 apresenta a média e o desvio padrão amostral da diferença em dB da amplitude da frequência da linha (f_1) e as bandas laterais de uma e duas vezes a frequência de escorregamento (f_s) para os dez testes realizados. Observa-se que para a situação sem defeito (SD) as diferenças estão em torno de 31 e 46 dB e para 7 barras quebradas (BQ), essa diferença diminui para 23 e 18 dB.

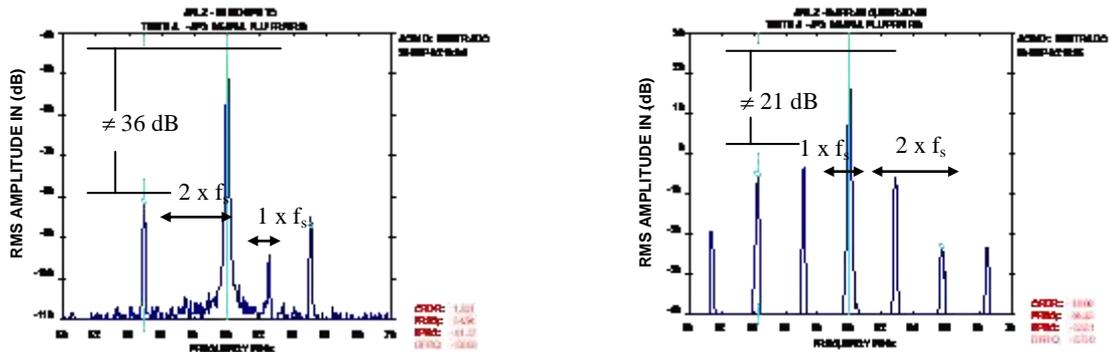
FIGURA 11 - Média e desvio padrão amostral das diferenças em dB.



3.1.3 Detecção de barras quebradas através da análise de fluxo magnético (bobina radial)

A Figura 12 ilustra os espectros escolhidos aleatoriamente para a condição normal de funcionamento e sete barras quebradas, respectivamente.

FIGURA 12 - Espectro de fluxo magnético (bobina radial).

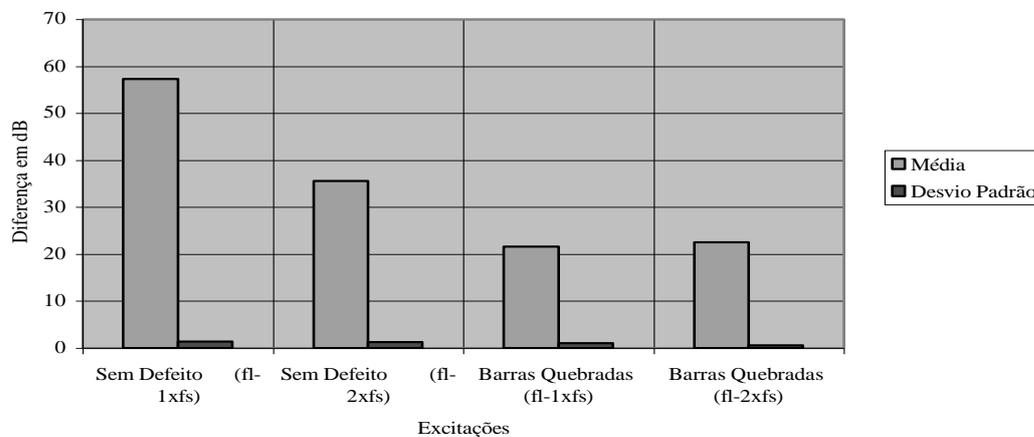


(a) Espectro de fluxo sem defeito.

(b) Espectro de fluxo com 7 barras quebradas.

Na Figura 13 são apresentadas a média e o desvio padrão amostral da diferença em dB da amplitude da frequência da linha (f_1) e as bandas laterais de uma e duas vezes a frequência de escorregamento (f_s). Observa-se que para a situação sem defeito (SD) as diferenças estão em torno de 57 e 36 dB. Para 7 barras quebradas (BQ) essa diferença diminui para 21 e 22 dB.

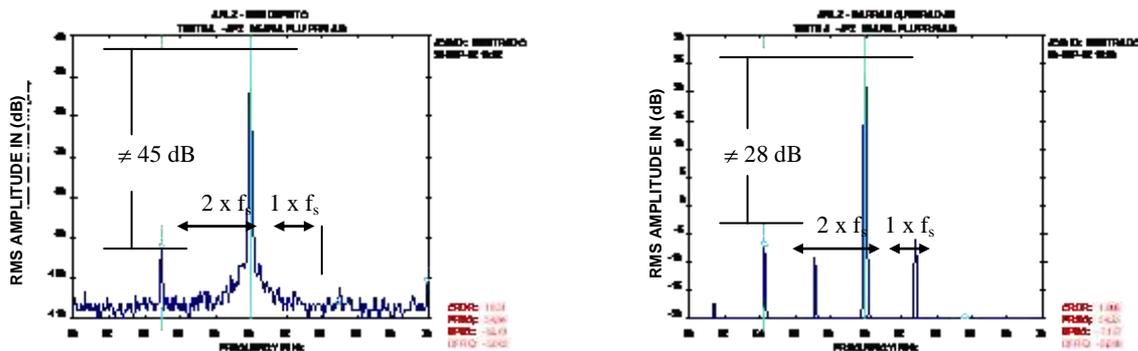
FIGURA 13 - Média e desvio padrão amostral das diferenças em dB.



3.1.4 Detecção de barras quebradas através da análise de fluxo magnético (bobina axial)

A Figura 14 ilustra os espectros escolhidos aleatoriamente para a condição normal de funcionamento e sete barras quebradas, respectivamente.

FIGURA 14 - Espectro de fluxo magnético (bobina axial).

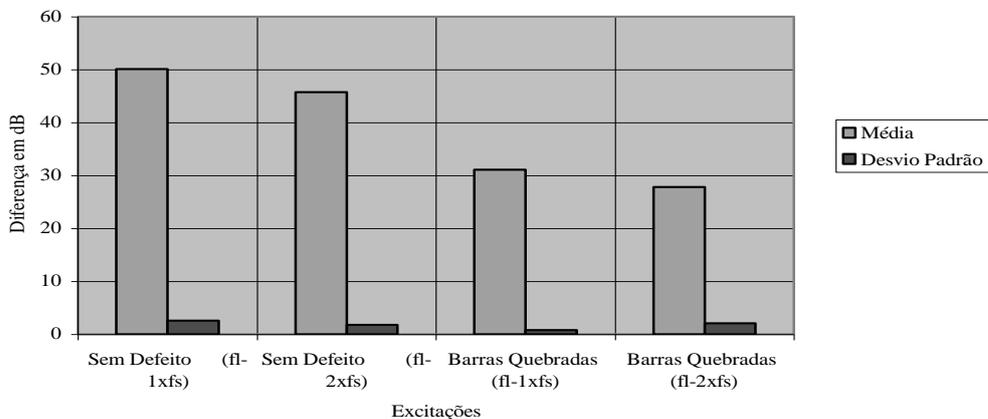


(a) Espectro de fluxo sem defeito.

(b) Espectro de fluxo com 7 barras quebradas.

A Figura 15 apresenta a média e o desvio padrão amostral da diferença em dB da amplitude da frequência de linha (f_l) e as bandas laterais de uma e duas vezes a frequência de escorregamento (f_s). Observa-se que para a situação sem defeito (SD) as diferenças estão em torno de 50 e 45 dB. Para 7 barras quebradas (BQ), essa diferença diminui para 31 e 27 dB.

FIGURA 15 - Média e desvio padrão amostral das diferenças em dB.

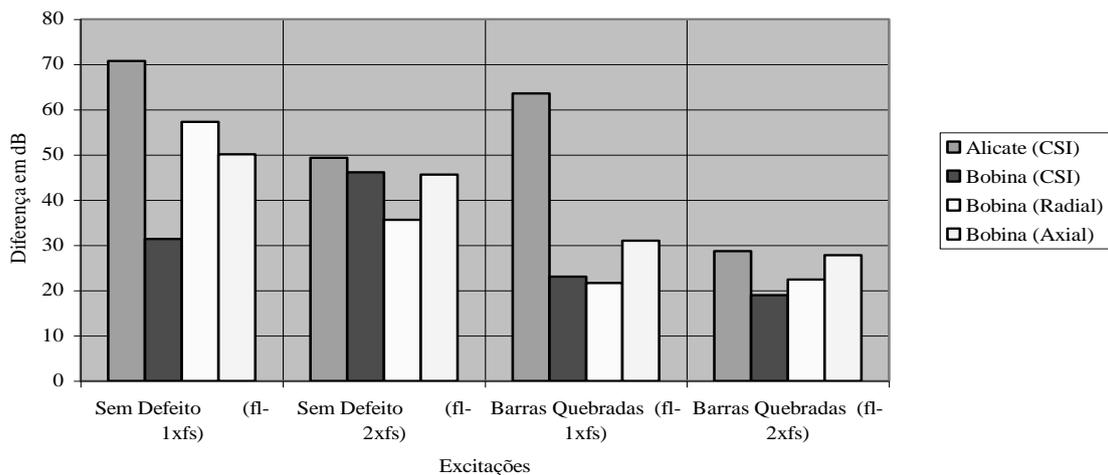


4 Conclusões

A excitação devido a barras quebradas foi pesquisada usando-se três sensores, alicate amperímetro (análise de corrente), bobina de fluxo CSI e bobina de fluxo implementada (análise de fluxo), sendo as amplitudes (A) em dB .

Geralmente, nas análises de corrente e fluxo o diagnóstico de barras quebradas ou rompidas é feito em $1 \times f_1 \pm 2 \times f_s$. Porém, pôde-se observar através da análise de fluxo magnético que é possível diagnosticar o problema na frequência $1 \times f_1 - 1 \times f_s$. A Figura 16 apresenta o quadro comparativo da média para os dez testes realizados com as tecnologias supra citadas.

FIGURA 16 - Quadro comparativo entre as técnicas.



A análise de fluxo apresenta maior sensibilidade do que a análise de corrente, conseqüentemente, os valores para severidade são menores. Enquanto para a análise de corrente um determinado valor em dB é considerado "sem defeito", para análise de fluxo este mesmo valor pode ser um indicativo de barras quebradas.

As bobinas implementadas, tanto na posição radial quanto na axial, apresentaram resultados mais significativos. A diferença em dB, da condição sem e com defeito, são mais nítidas devido à bobina ser instalada dentro do motor. Este procedimento ajuda a minimizar a dispersão do fluxo magnético. A bobina implementada tem os sinais mais nítidos, permitindo um diagnóstico mais seguro em $f_1 - 1 \times f_s$.

5 Referências

ALMEIDA, M. T.; GÓZ, R. D. S. **Apostila do Curso de Vibrações em Motores**. FUPAI, Itajubá, MG, 1994.

BACCARINI, L. M. R.; BRITO, J. N.; LAMIM FILHO, P. C. M.; PEDERIVA, R. **Influência do desequilíbrio de fase no comportamento dinâmico de motores de indução trifásico**. Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 2001.

BERNARDO, J. D. S. **Análise preditiva de defeitos em motores de indução trifásicos utilizando a corrente de alimentação.** Dissertação (Mestrado), 91 p. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 2002.

BRITO, J. N. **Desenvolvimento de um Sistema Inteligente Híbrido para Diagnóstico de Falhas em Motores de Indução Trifásicos.** Tese (Doutorado), 214 p. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 2002.

BRITO, J. N.; GARCIA, E. M.; PEDERIVA, R. **Desarrollo de un sistema experto para el diagnostico de problemas en motores eléctricos.** Memorias del V Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, Mérida, Venezuela, pp.423-428, 2001.

LAMIM FILHO, P. C. M.; BRITO, J. N.; BACCARINI, L. M. R.; ÁLVARES, P. A. S.; BRAGA, L. **Plano de manutenção preditiva para o maquinário da planta unidade Motor Fire.** Seminário de Confiabilidade, Tecém - Tecnologia Empresarial Ltda., pp. 1-10, 2000.

LAMIM FILHO, P. C. M. **Programa de manutenção preditiva da planta unidade Motor Fire Unidade 7514.** Relatório de Estágio Supervisionado, UFSJ, 2001, 110p.

LAMIM FILHO, P. C. M. **Acompanhamento Preditivo de Motores de Indução Trifásicos através da Análise de Fluxo Magnético.** Dissertação (Mestrado), 105 p. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 2003.

MILIMONFARED J.; KELLY H. M.; MINASSIANS A. D.; NAMDI S.; TOLIYAT H. A. **A Novel approach for broken rotor bar detection in cage induction motors.** IEEE Industry Application Society, pp. 286-290, 1998.

PENMAN, J.; STAVROU, A. **Broken rotor bars: their effects on the transient performance of induction machines.** In: Proceeding of IEE Electronic Power Apply, v.143 (6) pp.449-457, 1996.

THOMSON, W. T. R. A.; LEONARD, A. J.; MALNE, J. P. **Failure Identification of Offshore Induction Motor Systems Using On-condition Monitoring.** Proceedings of 4th National Reability Conference, Birmingham, UK, 1983.

WALLISER, R. F.; LANDY, C. F. **Determination of interbar current effects in the detection of broken rotor bars in squirrel cage induction motors.** IEEE Transaction on Energy Conversion, v.9 (1), pp. 152-158, 1994.