

PROPOSTA DE DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE DIAGNÓSTICO PARA DETECÇÃO DE BARRAS ROMPIDAS, EM MOTORES DE INDUÇÃO COM ROTOR EM GAIOLA, BASEADO EM TRANSFORMADA DE WAVELET

Masamori Kashiwagi, masamorika@uol.com.br¹

Cesar da Costa, cost036@attglobal.net²

Mauro Hugo Mathias, mathias@feg.unesp.br¹

¹ UNESP-Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita, 12516-410, Guaratinguetá, São Paulo, Brasil

² IFSP- Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, 01109-010, São Paulo, São Paulo, Brasil

Resumo: Neste trabalho, apresenta-se uma proposta de desenvolvimento de um sistema de diagnóstico para detecção de barras rompidas, on - line, em motores de indução com rotor em gaiola, baseado em Transformada de Wavelet. Este método difere da grande maioria dos sistemas atualmente empregados, que se baseiam na técnica MCSA (Motor Current Signature Analysis). Tradicionalmente, o método MCSA tem sido utilizado para detecção de falhas de barras rompidas utilizando ferramentas matemáticas como a transformada rápida de Fourier(FFT) com capacidade computacional limitada. A Transformada Wavelet (DWT) atualmente é a solução mais recente para superar os problemas da transformada de Fourier.

Palavras-chave: motor de indução , barras quebradas, transformada Wavelet, diagnóstico

1. INTRODUÇÃO

Qualquer planejamento tem início na definição dos objetivos a serem alcançados. No caso de uma intervenção de manutenção, o principal objetivo é reconduzir o motor elétrico de indução às suas condições operacionais originais. Desta forma, busca-se a restauração da capacidade do motor elétrico de cumprir sua função no processo para o qual foi projetado. A partir deste ponto fundamental é que se iniciarão os estudos quanto à quantidade de mão de obra, ferramentas, peças sobressalentes e prazos necessários.

A crescente automação industrial é de extrema relevância na observação desta tendência, uma vez que se passa ao controle cada vez mais responsável das instalações industriais. A crescente pressão social e de legislação no que tange a preservação da segurança do usuário e do meio ambiente deve também ser levada em conta, uma vez que a responsabilidade sócia ambiental será consequência da robustez e da operacionalidade dos equipamentos (Didier et al., 2007; Andrew et al., 2006; Oviedo et al., 2011).

Em resposta a este contexto, o processo de manutenção passa a constituir um fator crítico de sucesso para o ambiente industrial, e a combinação ideal de técnicas, procedimentos, aplicação de novos instrumentos de análise e diagnósticos de máquinas, com novas tecnologias devem ser constantemente revisadas. Passam a ganhar força às técnicas de manutenção preditiva, nas quais os técnicos de manutenção e usuários passam a monitorar variáveis operacionais da máquina rotativa, e a analisar seus eventuais desvios (Ying, 2012; Pu et al., 2013; Romary et al., 2005).

Os motores de indução de gaiola de esquilo são robustos, confiáveis, baratos e, portanto, amplamente utilizados em processos industriais e de manufatura. No entanto, as suas falhas elétricas e mecânicas representam um desafio especial para a produção, que muitas vezes interrompem a produtividade e requerem manutenção. Na literatura, as falhas do rotor tipo gaiola têm se mostrado responsáveis por uma grande parte das falhas de motores de indução, às vezes eles são a maior causa de falha no campo. As falhas de barras rompidas do rotor de gaiola geralmente surgem a partir do desgaste operacional de funcionamento, que pode ser elétrico, mecânico, térmico ou por falha na sua fabricação (Ebrahimi et al., 2012; Thomas et al., 2003; Sadougui et al., 2006).

2. FALHAS DE BARRAS ROMPIDAS EM ROTORES TIPO GAIOLA DE ESQUILO

Os motores de indução, tipo gaiola de esquilo, são amplamente utilizados em muitos processos industriais e têm desempenhado um papel importante em uma variedade de indústrias de transformação (Lebaround et al., 2008). Apesar

de seu baixo custo, confiabilidade e robustez, motores de indução estão propensos a falhas devido a sua exposição a uma grande variedade de ambientes agressivos e condições de operações incorretas ou defeitos de fabricação (Oviedo et al., 2011). Essas falhas e deterioração gradual podem levar à interrupção do motor e o aumento do seu consumo de energia elétrica, se não forem identificados em tempo. Sabe-se que a detecção de falhas em máquinas de indução numa fase precoce pode não só minimizar avarias e reduzir o consumo de energia elétrica, mas também para impedir a propagação da falha ou limitar a sua escalada para graus severos. Portanto, sistemas de diagnóstico ou programas de monitoramento de condição do motor, tem recebido atenção considerável nos últimos vinte anos (Costa et al., 2004; Magdaleno et al., 2008).

Uma das principais falhas que podem ocorrer em um motor de indução do tipo gaiola de esquilo, durante sua operação, é o rompimento de uma ou mais barras, que compõe o seu rotor. A partir do estudo sobre diferentes tipos de falhas em motores de indução, as falhas relacionadas com rotor são cerca de 10%, incluindo barras de rotor rompidas (Douglas et al., 2005). Embora esta percentagem de falhas não seja a maior em relação as diferentes falhas de motores de indução, as falhas de barras rompidas do rotor são difíceis de diagnosticar devido à inacessibilidade do rotor (Ebrahimi et al., 2012). Além disso, este tipo de falha pode não apresentar nenhum sintoma durante a fase inicial até a propagação para as próximas barras, ocasionando um aumento do consumo de energia elétrica em indústrias de transformação.

As falhas de barras rompidas do rotor tipo gaiola de esquilo raramente causam falhas imediatas, especialmente em motores multipolo (velocidade lenta) de grande porte. No entanto, se houver uma quantidade suficiente de barras rompidas no rotor, o motor pode não partir uma vez que não pode desenvolver torque suficiente. Independentemente disso, a presença de barras de rotor rompida interfere diretamente na eficiência energética da planta industrial. A Figura 1 ilustra um rotor de gaiola de esquilo básico, com suas correntes nas barras e no anel final de terminação (Pu et al., 2013).

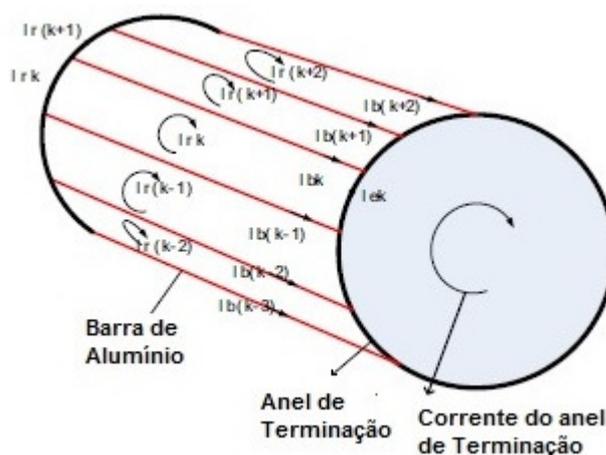


Figura 1. Rotor gaiola de esquilo básico com suas malhas e definições de correntes, conforme Pu et al., 2013).

A gaiola do rotor consiste de n barras, com n malhas idênticas, igualmente espaçadas. Cada malha é formada por duas barras adjacentes e conectada entre si, por um segmento de anel final de terminação. As n malhas de corrente do rotor são acopladas umas as outras e ao enrolamento do estator, por meio das indutâncias mutuas (PU et al., 2013).

Durante os últimos vinte anos, houve um grande esforço para estudar e diagnosticar falhas em motores de indução, em particular, diversos trabalhos de pesquisas foram dedicados ao estudo de barras quebradas em motores de indução e ao desenvolvimento de técnicas de diagnóstico não invasivas para detectar falhas em rotores tipo gaiola de esquilo (Thomas et al., 2003; Sadougui et al., 2006; Lebaround et al., 2008).

A Figura 2 apresenta um rotor tipo gaiola de esquilo, com defeito de barras quebradas, retirado de um motor trifásico de indução com potencia de 3000 HP, velocidade de 890 RPM, tensão 6000 V, frequência de 60 HZ, depois de decorrido um ano do defeito detectado. O rotor é composto de chapas finas de aço magnéticas tratadas térmicamente para reduzir ao mínimo as perdas por correntes parasitas e histerese. Essas chapas têm o formato de um anel com ranhuras internas de tal maneira que possam ser alojadas as barras de alumínio ou cobre, que por sua vez, quando em operação deverão criar um campo magnético.

3. ANÁLISE DA CORRENTE DO MOTOR EM REGIME PERMANENTE

Para efeitos deste trabalho, considera-se a existência de dois métodos para análise da corrente de estator de um motor de indução, em regime permanente:

- Método utilizando o MCSA (Motor Current Signature Analysis);
- Método utilizando a Transformada Discreta de Wavelet (DWT).



Figura 3. Rotor tipo gaiola de esquilo com barras rompidas.

3.1. Método Utilizando o MCSA

A análise espectral é um termo usado para descrever a representação do sinal de corrente no domínio da frequência. A transformada de Fourier (FT) define que qualquer forma de onda periódica no domínio do tempo pode ser representada por uma soma ponderada de senos e cossenos. A mesma forma de onda pode então ser representada no domínio da frequência, como um par de valores de amplitude e fase para cada componente de frequência.

A análise espectral da corrente no estator utiliza a transformada rápida de Fourier (FFT) para o diagnóstico do rompimento de barras no rotor. Segundo COSTA et al., 2004, em um motor de indução trifásico, tipo rotor de gaiola de esquilo, barras quebradas ou trincadas no anel de terminação do rotor, perturbam o fluxo magnético, fazem flutuar a frequência do rotor e consequentemente, alteram o espectro de corrente do motor.

Magdaleno et al., 2008; Niu et al., 2007; Ayhan et al., 2006; Douglas et al., 2005 e Cusido et al., 2006; utilizaram a transformada rápida de Fourier (FFT) para análise espectral da corrente do estator, com o objetivo de diagnosticar barras quebradas no rotor. A partir desses trabalhos desenvolvidos, a falha interna de barras quebradas do rotor pode ser determinada no espectro de frequência de corrente pela Eq.(1).

$$f_{falha} = f_0 \cdot \left[k \left(\frac{1-s}{p} \right) \pm s \right] \quad (1)$$

Onde:

f_{falha} é a frequência lateral provocada pelo rompimento de barras do rotor.

$\frac{k}{p} = 1, 3, 5, \dots$ (conforme a estrutura do enrolamento do motor).

f_0 é a frequência de alimentação do motor.

s é o escorregamento do motor.

p é o número de polos do motor.

Em geral, devido à assimetria do rotor, as seguintes frequências aparecem em diferentes espectros do sinal: (i) $(1 \pm 2ks)f_0$ na corrente do estator e na potência instantânea; (ii) $(2k-1)sf_0$ na corrente do rotor; (iii) $2ksf_0$ na velocidade e no torque; e (iv) ksf_0 no fluxo axial, onde $k = 1, 2, 3, \dots$

O diagnóstico de falhas de barras quebradas pode ser realizado pela determinação das frequências laterais de falhas, $(1 \pm 2s)f_0$, no espectro de corrente do estator, em torno da frequência fundamental de alimentação do motor (f_0). À medida que o número de barras quebradas aumenta, a diferença em dB, entre a amplitude da frequência fundamental e as amplitudes das frequências de falhas laterais diminui. Quanto menor for essa diferença, maior será o número de barras quebradas ou trincadas. Isto ocorre devido a alteração da uniformidade do fluxo magnético (Ayhan et al., 2006).

O método MCSA (Motor Current Signature Analysis) é o mais tradicional para detecção de falhas em máquinas rotativas de indução no ambiente industrial (Cusido et al., 2006).

A Figura 4(a) ilustra o espectro de frequência de um motor sem defeito e a Fig. 4(b) ilustra um motor com defeito de barras quebradas, utilizando-se o método MCSA. Pode-se observar na Fig.(4a), motor sem defeito, que a diferença entre a frequência fundamental (f_0) e a frequência lateral esquerda de falha $(1-2s)f_0$ é de 80 db. Na Fig. (4b), motor com defeito de barras quebradas, a diferença cai para 40 db.

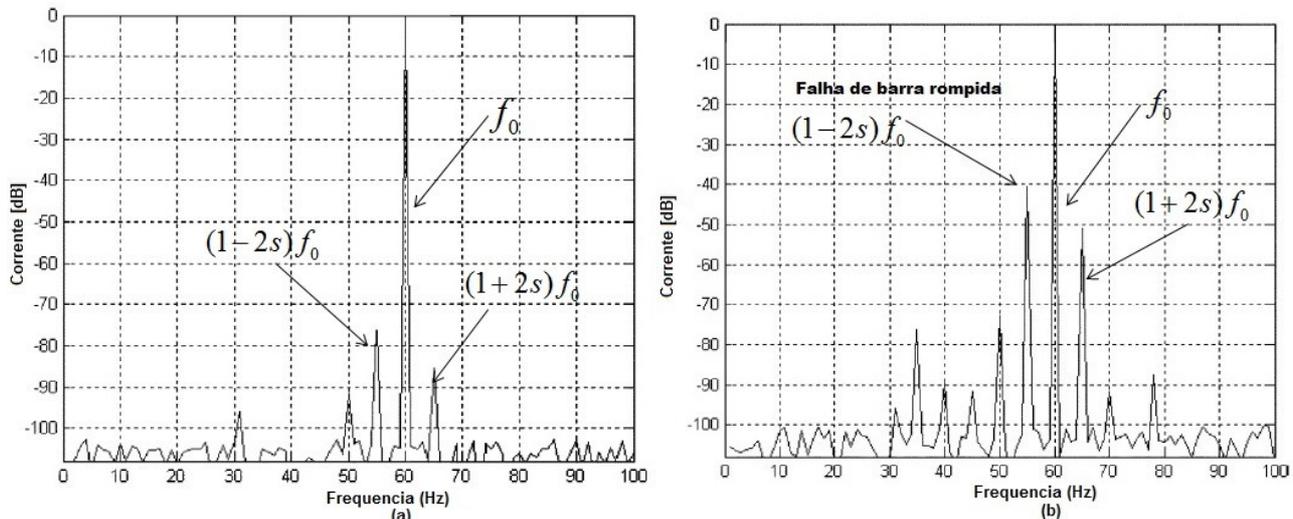


Figura 4 – Espectro de frequência de um motor sem defeito (a) e um motor com barras rompidas (b) obtidos pelo método MCSA.

O método MCSA é um método não invasivo, que permite a identificação rápida do defeito de barras quebradas. Entretanto, observa-se que com o aumento da carga fica mais evidente o crescimento das frequências laterais de falhas e também no distanciamento em relação à frequência da rede, devido ao aumento do escorregamento (s) (Daviu et al., 2006).

3.2. Método Utilizando a Transformada Discreta de Wavelet (DWT)

As wavelets têm sido aplicadas em diversos ramos da ciência, devido à sua característica peculiar de detalhar pontos específicos de um sinal (Kim, 2002; Adewusi et al., 2001). Nas aplicações em que uma maior precisão na análise em frequência é requerida, a tradicional transformada de Fourier (FT) não apresenta resultados satisfatórios por não possuir a capacidade de detalhar regiões de interesse do sinal. Em se tratando dos métodos de detecção de falhas de barras quebradas, em rotores tipo gaiola de esquilo, utilizando a corrente de partida do motor, as wavelets têm grande valia. Durante a partida do motor, a velocidade varia de zero até próximo à velocidade síncrona. Com isso, a falha não pode ser detectada numa frequência fixa, como no método MCSA tradicional, utilizando a corrente em regime permanente. A falha irá variar dentro do espectro de frequência e pelo método MCSA fica impossível visualizar qualquer falha de barra rompida no rotor. Desse modo, a Transformada Discreta de Wavelet (DWT) é uma ferramenta poderosa que pode ser utilizada com sucesso nestes casos.

A transformada wavelet é uma ferramenta que permite decompor um sinal em diferentes componentes de frequência, permitindo assim, estudar cada componente separadamente em sua escala correspondente. O termo wavelet significa "pequena onda" (*small wave* em inglês ou *ondelette* em francês).

A Transformada de Wavelet (WT) representa um avanço em relação à transformada de Fourier (FT), pois ela é uma técnica que usa escalas variáveis. A análise por wavelet permite o uso de uma escala menor quando se deseja maior resolução da informação contida no sinal em alta frequência, e uma escala maior quando se deseja maior resolução da informação contida no sinal em baixa frequência. As quantidades frequência e escala são inversamente relacionadas, isto é, uma escala menor implica uma alta frequência e vice-versa (Peng et al., 2004).

A transformada wavelet em tempo – frequência é um algoritmo de análise de multi resolução, que é o produto interno do sinal por uma família de wavelets. Para a wavelet mãe $\psi(t)$, existe uma família de wavelets correspondentes, que são chamadas de wavelets filhas $\psi_{a,b}(t)$. As séries de wavelets filhas são geradas por dilatação e contração da wavelet mãe (Zou et al., 2004). A Transformada Contínua de Wavelet (CWT) de um sinal $x(t)$ é definida pela Eq. (2).

$$CWT(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\psi_{a,b}^*(t)dt \quad (2)$$

Onde:

$\psi(t)$ é a wavelet mãe.

$\psi^*(t)$ é o conjugado complexo de $\psi(t)$.

$\psi(t)$ e $\psi_{a,b}$ são as wavelets filhas, transladadas por b e escalonada por a .

O parâmetro a é chamado escala, pois escala uma função por contração ou dilatação, o fator b é o mesmo da transformada de Fourier (FT) chamado de coeficiente de translação e simplesmente avança ou atrasa a posição da wavelet no eixo do tempo.

A transformada wavelet pode ser aplicada continuamente com a Transformada Contínua de Wavelet (CWT) ou discretamente com a Transformada Discreta de Wavelet (DWT). A CWT apresenta problemas intrínsecos como redundância e difícil implementação prática, enquanto a discretização da wavelet (DWT) numa escala diádica, torna possível a sua implementação computacional e a consequente análise de dados (Daviu et al., 2006).

Segundo Nikolaou et al (2002), a análise multi resolucional (MRA) de uma wavelet, mostra que um sinal pode ser decomposto e reconstruído, por meio de duas componentes chamadas aproximação e detalhe. A aproximação pode ser interpretada como um filtro passa-alta e o detalhe como um um filtro passa baixa. Isto significa que a aproximação contém informações de baixa frequência do sinal original e o detalhe contém informações de alta frequência deste mesmo sinal. A Figura 5 ilustra o processo de decomposição do sinal original em aproximações (A) e detalhes (D), que podem ser interpretados como filtros passa-baixa e passa-alta, respectivamente.

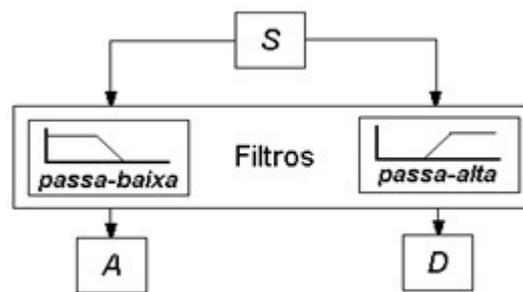


Figure 5- Diagrama esquemático da análise de multiresolução (MRA).

A Transformada de Wavelet Packet (WPT) é uma generalização da Transformada Discreta de Wavelet (DWT). Neste tipo de análise por wavelet, os detalhes e as aproximações são decompostos em duas outras componentes de aproximação e detalhe, a cada nível de decomposição $j = 1, 2, 3, \dots$, provendo dados refinados sobre todas as bandas de frequência do sinal original (Reis et al., 2009).

A Figura 6 ilustra uma árvore wavelet packet, exemplo de um processo de decomposição de 3 níveis ($j = 3$), de um sinal com frequência de 1024 Hz e 1024 amostras.

Existem diversas funções wavelets reais ou complexas que podem ser usadas como wavelet mãe, dentre elas destacam-se as wavelets de Haar, Morlet, Daubechies, Meyer, Coiflet, Gabor, Cauchy, Bessel, Marr ('Mexican hat'), Poisson, Bessel, Shannon, Franklin, etc. Neste trabalho, utilizou-se a wavelet de Daubechies porque ela é disponibilizada no toolbox de wavelet do software MATLAB (Nicolau et al., 2002; Reis et al., 2009).

3.3. Ensaios Práticos

A bancada experimental apresentada na Figura 7(a), foi montada no Laboratório de Mecatrônica do Departamento de Mecânica da FEG, Campus Guaratinguetá.

A bancada de teste é constituída por: (i) motor de indução trifásico tipo gaiola de esquilo, empresa WEG, modelo W22 plus 90s, 1,5kW (2,0 HP), 220/380V, 1750rpm (4 polos), 28 barras no rotor, 36 canais do estator (WEG, 2009); (ii) três rotores tipo gaiola de esquilo para motor WEG modelo W22 plus 90s, para simulação de defeitos de barras rompidas; (iii) Um gerador de corrente contínua, empresa ELETROMÁQUINA, modelo GC-4-B3/4 U-Lig 220S/SH/CP, 2kW, 1800rpm; (iv) sistema de aquisição de dados, módulo de aquisição de sinais dinâmicos, empresa National Instruments, modelo NI 9234, 4 canais, 25 kS/s, resolução de 24 bits; (v) três resistores de 100ohms/400W como carga elétrica do gerador de corrente contínua; (vi) uma garra de corrente, empresa Minipa, modelo HR-30,

relação de saída: 100mV/A, faixa de frequência efetiva: DC ~ 20kHz; (vii) condicionador de sinal, empresa ENDEVCO; (viii) tacômetro, empresa Minipa, modelo MDT-2245B, faixa: 0,5 ~ 19999 RPM; (ix) célula de carga, empresa HBM, modelo S40 -100kg.

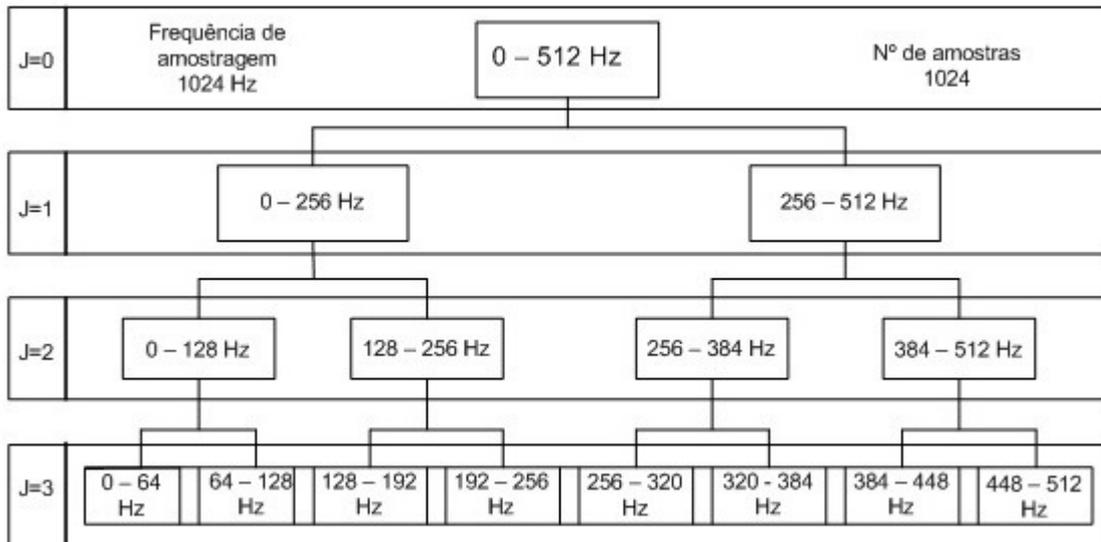


Figure 6- Diagrama de uma decomposição por wavelet em 3 níveis.

Um estator e três rotores originalmente idênticos foram utilizados para estudar o comportamento do motor de indução, com ou sem barras quebradas. Antes do início do processo de teste, dois dos três rotores são danificados deliberadamente por furos nas barras em toda a sua profundidade e usado com o mesmo estator, para garantir a precisão do teste. O rotor saudável é considerado aqui como referência. A configuração de teste de laboratório e dos rotores com barras rompidas são mostrados na Fig.(7b)

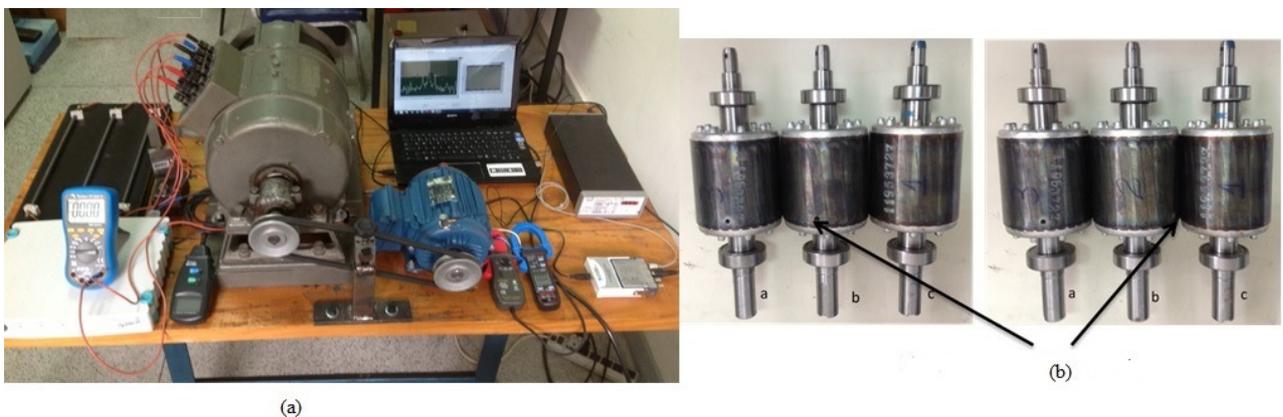


Figure 7- Bancada de teste (a) e rotores com falhas de barras rompidas (b)

A corrente do estator do motor de indução foi medida durante o regime estacionário e permanente de funcionamento do motor para os diferentes casos testados. A frequência de amostragem utilizada foi de 5000 amostras por segundo. A transformada discreta de wavelet (DWT) da corrente foi realizada usando o Wavelet Toolbox do MATLAB. Foram utilizados oito e seis níveis de decomposição. A wavelet mãe usada para análise do sinal de corrente foi a Daubechies-44. A Tabela 1 apresenta as bandas de frequências correspondentes ao sinal de corrente, decomposto por DWT em oito e seis níveis, resultantes da análise de acordo com o taxa de amostragem utilizado para os testes.

Tabela 1 – Bandas de frequências para os sinais de wavelet (DWT) do sinal de corrente

Decomposição em 8 níveis		Decomposição em 6 níveis	
Nível	Banda de Frequência	Nível	Banda de Frequência
d6	39,06 – 78,12 Hz	d6	39,06 – 78,12 Hz
d7	19,53 – 39,06 Hz	a6	0 – 39,06 Hz
d8	9,76 – 19,53 Hz		
a8	0 – 9,76 Hz		

3.3.1. Ensaio Motor sem Defeito com carga

A Figura 8 (a) mostra a transformada wavelet (DWT), nível 8 da corrente de partida. Pode-se ver que os sinais de nível superior (a8, d8, d7 e d6), associados com as bandas de frequência abaixo de 60 Hz, não apresentam nenhuma variação significativa, além das oscilações iniciais que duram apenas alguns ciclos. A Figura 8 (b) apresenta o sinal de aproximação a6, decorrente da transformada DWT, nível 6. Não aparecem oscilações importantes no sinal. De ambas as abordagens, pode concluir-se que a componente de defeito da banda lateral esquerda, associada com a falha de barras quebradas, não está presente.

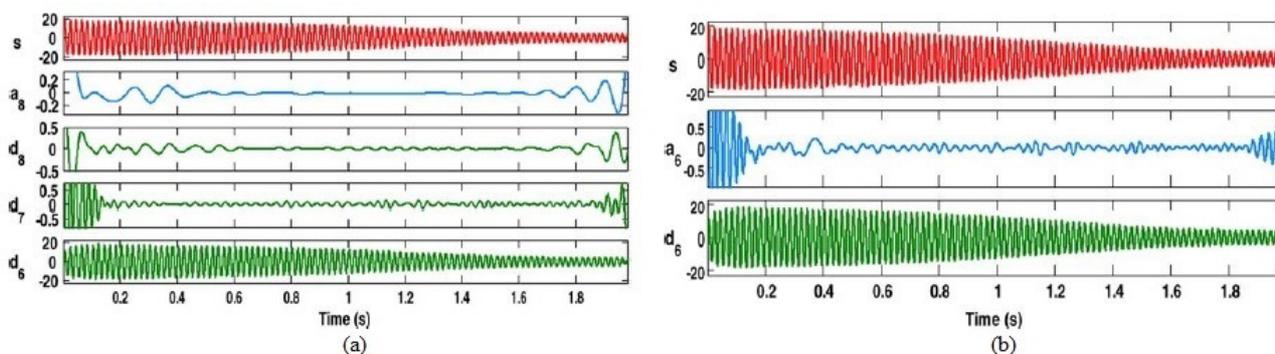


Figure 8- Motor sem defeito: (a) Transformada DWT, nível 8 da corrente de partida, (b) Transformada DWT, nível 6 da corrente de partida.

3.3.2. Ensaio Motor com Duas Barras Quebradas, com Carga

A Figura 9(a) apresenta um aumento significativo de energia, em relação ao estado defeituoso do motor, aparece no nível dos sinais de ordem superior (a8, d8, d7 e d6). As oscilações naqueles sinais são devido à evolução da componente de falha de barra quebrada, lateral esquerda, durante o transiente de partida. Essas oscilações seguem uma sequência que está de acordo com a evolução da componente de banda lateral esquerda. A Figura 9 (b) mostra o sinal de aproximação resultante do nível 6 da decomposição. Uma vez que este sinal reflete aproximadamente a evolução em amplitude e frequência da componente de banda lateral esquerda, sua energia mostra um claro aumento em relação ao estado do motor sem defeito. As oscilações que aparecem no início mascaram um pouco a evolução das harmônicas, são causadas pelo transiente eletromagnético da máquina e ao efeito de bordas da transformada wavelet e elas também aparecem no estado do motor sem defeito, como mostrado na Fig.8(b). A máscara produzida por estas oscilações podem tornar-se especialmente importante se a partida é muito rápida.

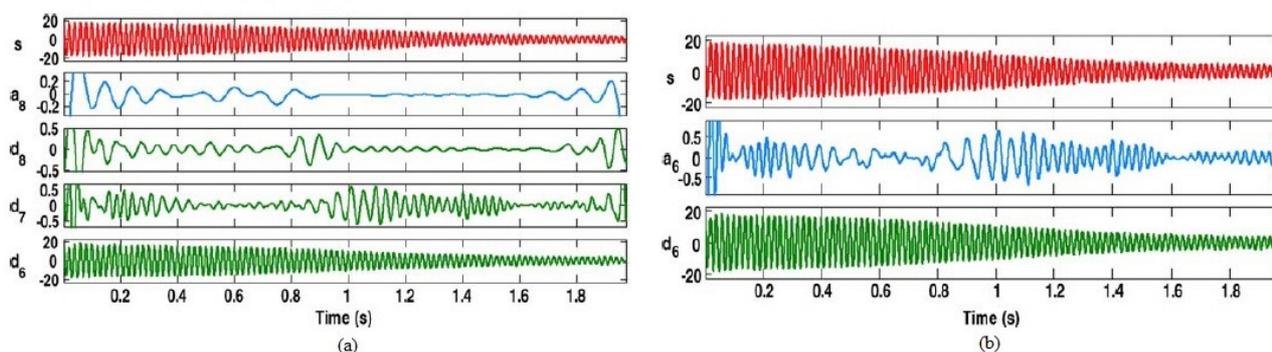


Figure 9- Motor com duas barras rompidas, com carga: (a) Transformada DWT, nível 8 da corrente de partida, (b) Transformada DWT, nível 6 da corrente de partida.

3.3.3. Ensaio Motor com Duas Barras Quebradas, sem Carga

Neste caso, a aplicação do método clássico MCSA, com base na análise de Fourier, não é válido, uma vez que o escorregamento s é muito baixo e os componentes de banda lateral se sobrepõem a componente de frequência de alimentação f_0 . Isto torna muito difícil o diagnóstico da falha de barra rompida, num motor de indução sem carga. No entanto, os sinais de Wavelet de alta ordem (a8, d8, d7 e d6) resultante da análise da transformada DWT da corrente de partida do motor, mostram um aumento claro na sua energia, se comparado com o estado do motor sem defeito. Além disso, as oscilações encaixam-se bem com a evolução da frequência de defeito da banda lateral esquerda, descrito

anteriormente. Além disso, o sinal de aproximação a_6 , Fig. 10 (b), apresenta variações que refletem a evolução da componente de banda lateral esquerda. Isto leva à conclusão de que um defeito de barra rompida está presente no motor. Este caso é um exemplo da validade desta abordagem, em um caso em que o método clássico MCSA não é adequado para ser aplicado.

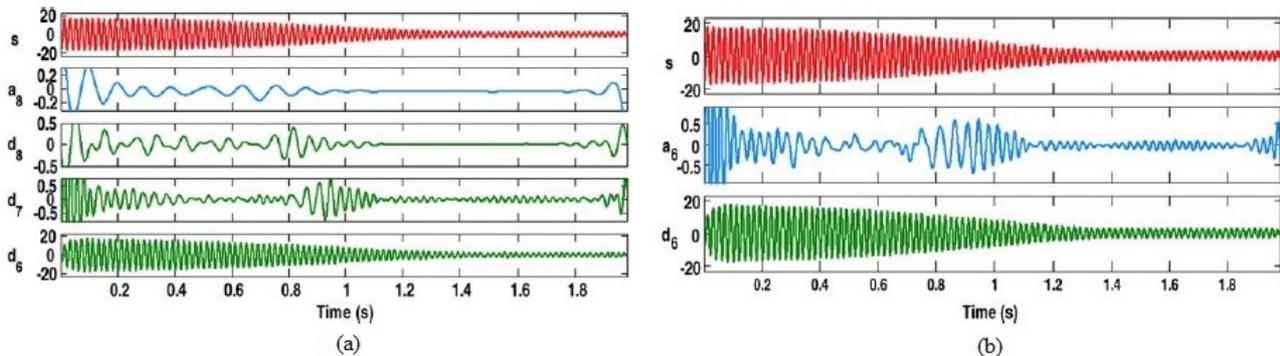


Figure 10- Motor com duas barras rompidas, sem carga: (a) Transformada DWT, nível 8 da corrente de partida, (b) Transformada DWT, nível 6 da corrente de partida.

4. CONCLUSÃO

A principal diferença entre a aplicação do tradicional método MCSA (Motor Current Signature Analysis) e o método utilizando a transformada de Wavelet (DWT) no diagnóstico de barras rompidas, em motores de indução, tipo gaiola de esquilo, é que com a transformada de Wavelet a evolução das componentes laterais de falhas de barras rompidas, são bem localizada em ambos os domínios do tempo e da frequência, enquanto que na transformada de Fourier padrão (método MCSA), o sinal de falha só é localizado no domínio da frequência e depende do escorregamento “ s ” do motor e da carga utilizada.

A transformada Wavelet (DWT) na maioria das vezes dá uma representação melhor do sinal de falha de barras rompidas, usando a análise de Multiresolução (MRA). Ela é sensível às variações causadas na amplitude das frequências de falhas, em função do número de barras rompidas, podendo ser observadas desde os níveis mais baixos, defeitos incipientes, até os níveis mais elevados que podem ser considerados altamente prejudiciais ao bom funcionamento do motor de indução. Por último, o método usando a transformada Wavelet (DWT), pode ser aplicado em um caso em que o método clássico MCSA não é adequado, ou seja, diagnóstico de barras rompidas em motores de indução sem carga.

Ambas as metodologias foram testadas experimentalmente em vários casos. Os resultados mostram a eficácia de ambos os métodos para detectar a presença de barras rompidas num motor de indução tipo gaiola de esquilo, até mesmo, em alguns casos em que a aplicação do método clássico MCSA, baseado na transformada de Fourier (FT) da corrente, não pode ser aplicado ou poderia levar a confusão, para um diagnóstico errado.

5. REFERÊNCIAS

- Adeusi, S., A., Al Bedoor, B., O., 2001, “Wavelet analysis of vibration signals of an overhang rotor with a propagating transverse crack”, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 246, No 5, pp. 777-793.
- Andrew, J. K., Lin, D., Dragan, B., 2006, “A review on machinery diagnostic and prognostic implementing condition-based maintenance”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 20, pp. 1483 – 1510.
- Ayhan, B., Chow, M., Song, M., 2006, “Multiple discriminant analysis and neural-network-base monolith and partition fault-detection schemes for broken rotor bar in induction motors”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 53, No 4, 1298-1308.
- Costa, F., F., Almeida, L., A., L., Naidu, S., R., Braga, E., R., 2004, “Improving the signal data acquisition in condition monitoring of electrical machines”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 53, No 4, pp. 1015 – 1019.
- Cusido, J., Rosero, J., Aldabas, E., Ortega, J., A., Romeral, L., 2006, “New fault detection techniques for induction motors”, *Electrical Power Quality and Utilization, Magazine*, Vol. 2, No 1, pp. 39-46.
- Daviu, J., A., A., Riera-Guasp, M., Folch, J., R., Molina Palomares, M., P., 2006, “Validation of a new method for the diagnosis of rotor bar failures via wavelet transform in industrial induction machines”, *IEEE Transactions on Industry Application*, Vol.42, No 4, pp. 990-996.
- Didier, G., Ternisien, E., Caspary, O., Razik, H., 2007, “A new approach to detect broken rotor bars in induction machines by current spectrum analysis”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 21, pp. 1127 – 1142.
- Douglas, H., Pillay, P., Zirani, A., K., 2005, “Broken rotor bar detection in induction machines with transient operating speeds”, *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, Vol. 20, No 1, pp. 135 – 141.

- Ebrahimi, B., M., Faiz, J., Lotfi-fard, S., Pillay, P., 2012, “Novel indices for broken rotor bars fault diagnosis in induction motors using wavelet transform”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 30, pp. 131 – 145.
- Kim, C., H., 2002, “Wavelet transform in Power systems. I. General introduction to the wavelet transforms”, *IEEE Power Engineering Journal*, Vol.14, No 2, pp. 677-694.
- Lebaround, A., Clerc, G., 2008, “Diagnosis of induction motor faults using instantaneous frequency signature analysis”, *IEEE Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines, ICEM 2008*, 18 th International Conference on, pp.1-5.
- Magdaleno, J., J., R., Troncoso, R., J., R., Medina, L., M., C., Perez, A., G., 2008, “FPGA implementation of a novel algorithm for on-line bar breakage detection on induction motors”, *IEEE International and Measurement Technology Conference, IMTC 2008*, pp. 720-725.
- Nikolaou, N., G., Antoniadis, I., A., 2002, “Demodulation of vibration signals generated by defects in rolling element bearings using complex shifted Morlet wavelet”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.16, No 4, pp. 677-694.
- Niu, G., Han, T., Yang, B., S., Chit, A., 2007, “ Multi – agent decision fusion for motor fault diagnosis”, *Mechanical Systems Signal Process*, Vol. 21, No 3, pp. 1285 – 1299, 2007.
- Oviedo, S. J., Quiroga, J. E., Borrás, C., 2011, “Experimental evaluation of motor current signature and vibration analysis for rotor broken bars detection in an induction motor”, *Proceeding of the 2011 International Conference on Power Engineering (POWERENG)*, Vol. 1, Malaga, Espanha, May, pp. 1 – 6.
- Peng, Z., K., Chu, F., L., “Application of the wavelet transform in machine condition monitoring and fault diagnostics: a review with bibliography”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 18, No 2, pp. 199-221.
- Pu, S., Zheng, C., Yuriy, V., Zoubir, Z., 2013, “A new diagnosis of broken rotor bar fault extent in three phase squirrel cage induction motor”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 42, pp. 388 – 403.
- Reis, R., A., Brito, J., N., and Souza, G., R., 2009, “Fault detection in gearbox using the wavelet transform, 20th International Congress of Mechanical Engineering, Gramado, RS, Brazil.
- Romary, R., Corton, R., Thailly, D., Brudny, J., F., 2005, “Induction machine fault diagnosis using an external radial flux sensor”, *European Physical Journal – Applied Physics*, Vol. 32, No 2, pp. 125 – 132.
- Thomas, V., V., Vasudevan, K., Kumar, J., V., 2003, “Online cage rotor fault detection using air-gap torque spectra”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 18, no 2, pp. 265-270.
- Sadougui, A., Ebrahimi, M., Razaie, E., 2006, “A new approach for induction motor broken bar diagnosis by using vibration spectrum”. *SICE- ICASE International Joint Conference*, pp. 4715-4720.
- Zou, J., and Chen, J., 2004, “ A comparative study on time-frequency feature of cracked rotor by Wigner- Ville distribution and Wavelet Transform”, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 276, pp. 1-11.
- Ying X., 2012, “ Investigation of broken rotor bar faults in three-phase squirrel-cage induction motors, finite element analysis - from biomedical applications to industrial developments”. 30 Mar. 2012, Available from: <<http://www.intechopen.com/books/finite-element-analysis-from-biomedical-applications-to-industrial-developments/investigation-of-broken-rotor-bar-faults-in-three-phase-squirrel-cage-induction-motors>>.

6. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

PROPOSTA DE DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE DIAGNÓSTICO PARA DETECÇÃO DE BARRAS ROMPIDAS, EM MOTORES DE INDUÇÃO COM ROTOR EM GAIOLA, BASEADO EM TRANSFORMADA DE WAVELET

Masamori Kashiwagi, masamorika@uol.com.br¹

Cesar da Costa, cost036@attglobal.net²

Mauro Hugo Mathias, mathias@feg.unesp.br¹

¹ UNESP-Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita, 12516-410, Guaratinguetá, São Paulo, Brasil

² IFSP- Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, 01109-010, São Paulo, São Paulo, Brasil

Abstract. *This work presents a proposal for development of a diagnostic system for detection of broken bars, on - line, in induction motors with cage rotor, based on Wavelet Transform. This method differs from the vast majority of currently used systems, which are based on technique MCSA (Motor Current Signature Analysis). Traditionally, the MCSA method has been used for detecting broken bar fault using mathematical tools such as fast Fourier transform (FFT) with limited computational capacity. The Wavelet Transform (DWT) is currently the most recent solution to overcome the problems of the Fourier transform.*

Keywords: *induction motor, broken bars, wavelet transform, diagnosis*