

Transformada Wavelet para detecção de barras quebradas em Motores de Indução Trifásicos

Carlos Alberto Nóbrega Sobrinho ^[1], Abel Cavalcante Lima Filho ^[2], Alexander Patrick Chaves de Sena ^[3], Jorge Nei Brito ^[4], Jobson Francisco da Silva ^[5], Ícaro Meireles Mafaldo ^[6]

[1] carlos.nobrega@ifpb.edu.br. Instituto Federal da Paraíba, Campus Princesa Isabel. [2] abel@ct.ufpb.br. Universidade Federal da Paraíba. [3] alexander.sena@caruaru.ifpe.edu.br. Instituto Federal de Pernambuco, Campus Caruaru. [4] brito@ufsj.edu.br. Universidade Federal de São João del-Rei. [5] Instituto Federal da Paraíba, Campus João Pessoa. [6] icaro.mafaldo@gmail.com. Graduando em Engenharia da Computação na Universidade Federal da Paraíba.

RESUMO

Os motores elétricos são responsáveis por 95% da fonte primária de movimento das nações industrializadas. Desses, 90% são Motores de Indução Trifásicos (MIT), estando presentes em praticamente todos os setores industriais. Devido a sua relevância no setor produtivo, é importante que os motores sejam devidamente monitorados, com o intuito de se evitarem interrupções da produção e desastres operacionais. Este trabalho, portanto, tem o objetivo de estudar e desenvolver um sistema para diagnosticar falhas de barras quebradas em um motor de indução trifásico, realizando a análise de variáveis mecânicas (vibração) e elétricas (corrente elétrica, torque no entreferro e eficiência energética). Especificamente, foi pretendida a avaliação da expressividade dos sinais na presença de barras quebradas, aplicando-se, como ferramentas de análise, as transformadas de Fourier e Wavelet. O sistema deverá ser capaz de realizar o acompanhamento da severidade da falha no MIT, ao tempo em que as barras forem furadas (quebradas), antes da quebra total do equipamento. A instalação do sistema no motor deverá ser totalmente não invasiva, podendo ser realizada com o motor em operação. Resultados experimentais são apresentados para observação das estratégias propostas, avaliando-se a eficiência da detecção das avarias em ampla faixa de carga da máquina com acionamento direto da rede.

Palavras-chave: Eficiência energética. Análise de falhas. Análise espectral. Análise Wavelet.

ABSTRACT

Electric machines account for 95% of the primary source of movement of industrialized nations. Out of these, 90% are three-phase induction motors (TIM), which are present in almost all industrial sectors. Due to its relevance in the productive sector it is important that they are properly monitored in order to avoid interruptions of production and operational disasters. The aim of this work is to study and develop a system to diagnose the failure of broken bars in a three - phase induction motor, and to analyze the mechanical (vibration) and electric variables (current, air gap torque and energy efficiency). Specifically, we wanted the evaluation of the expressiveness of the signals in the presence of broken bar. We used the Fourier and wavelet transforms as analysis tools. The system should be able to track the severity of the failure at 3PIM as long as the bars are punctured (broken) prior to the total breakdown of the equipment. The installation of the system in the engine must be totally non-invasive and it can be performed with the engine running. Experimental results are presented to observe the proposed strategies, evaluating the efficiency of the detection of faults in a wide load range of the machine with direct drive of the electric network.

Keywords: Energy efficiency. Failure analysis. Spectral analysis. Wavelet analysis.

1 Introdução

Os motores de indução são intrinsecamente confiáveis e requerem uma manutenção mínima. Como outros motores, no entanto, eles eventualmente se deterioram e falham. Isso ocorre principalmente devido a uma combinação de ambiente, ciclo de trabalho, instalação e fatores relacionados à fabricação (AHMED *et al.*, 2010).

Geralmente, há fatores econômicos relacionados aos processos em que os motores são utilizados, que fazem com que quaisquer paradas para reparo ou troca do motor avariado gerem prejuízos enormes, como é o caso em metalurgia, siderurgia e mineração (OLIVEIRA, 2007).

A falha de quebra de barras em motores de indução trifásicos é muito comum em diversas aplicações industriais. As elevadas correntes de partida, quando a ventilação é baixa, resultam em perturbações térmicas e mecânicas que levam à trinca ou quebra de barras, bem como cargas mecânicas pulsantes, como compressores alternativos ou trituradores de carvão, podem sujeitar a gaiola do rotor a tensões mecânicas elevadas. Outro fator que leva também à quebra das barras são as imperfeições no processo de fabricação da gaiola do rotor. Essa falha é comumente detectada pela presença de bandas laterais espaçadas de duas vezes a frequência de escorregamento em torno da velocidade de rotação no espectro de vibração e em torno da frequência de alimentação no espectro da corrente (THOMSON; FENGER, 2001).

Atualmente, as pesquisas mais relevantes sobre detecção de barras quebradas almejam superar as limitações das abordagens clássicas baseadas na análise espectral (Fourier), pois a detecção eficiente por esse método não pode ser realizada sob condição de variação de velocidade, uma vez que o deslizamento e a velocidade variam. O mesmo acontece com a frequência de banda lateral esquerda.

Uma alternativa é a obtenção de diferentes bandas de frequência de um sinal, com objetivo de fornecer informações simultâneas no domínio do tempo e da frequência (SANTIAGO; PEDERIVA, 2005). A transformada Wavelet fornece a descrição tempo-escala de um sinal, com janelas onde a largura se ajusta à escala, permitindo a análise multirresolução de sinais. Recentemente, alguns trabalhos foram publicados descrevendo a utilização da transformada Wavelet para detecção de barras quebradas, tais

como: Sridhar, Rao e Jade (2015); Hernández *et al.* (2015); Bidgoli e Poshtan (2017).

Outra forte tendência na detecção de falhas é a extração de diferentes sinais do motor elétrico a ser analisado, tais como vibração, corrente elétrica, emissão acústica, eficiência energética e torque no entreferro, a fim de serem cruzados os diferentes comportamentos destas variáveis em virtude de uma falha, para que o sistema de detecção possa ter uma definição mais precoce e confiável sobre as condições do equipamento.

Nesse sentido, a motivação deste trabalho é estudar e desenvolver técnicas para diagnosticar a falha de barras quebradas em motores de indução abordando vários métodos de detecção, tais como a análise de assinatura da corrente, a análise da vibração mecânica, a análise da eficiência energética e do torque no entreferro, fazendo uso da Transformada Rápida de Fourier (FFT) e análise multirresolução com a transformada Wavelet.

2 Ferramentas de análise

A análise espectral com base na Transformada de Fourier tem sido largamente aceita como o método mais confiável de diagnóstico de falhas para sinais estacionários. A análise via Fourier não apresenta, entretanto, um caráter local, e representa um comportamento global médio de um sinal. Isso significa que, embora capaz de determinar o conteúdo de frequências presentes em um sinal, não há uma indicação de quando (em que intervalo de tempo) elas ocorrem (OLIVEIRA, 2007). A limitação da transformada de Fourier levou ao desenvolvimento de técnicas de processamento de sinais como tempo-frequência (transformada de Gabor, Wigner-Ville, entre outras) e tempo-escala (transformada de Wavelet) (SANTIAGO; PEDERIVA, 2005).

2.1 Análise Espectral

O processo de Análise Espectral se inicia com a aquisição do sinal a ser avaliado, no domínio do tempo, sendo esse transformado para o domínio da frequência geralmente aplicando-se a Transformada de Fourier (FT, do inglês Fourier Transform). Conhecendo-se um conjunto de pontos que represente os valores das amostras, cobrindo um período inteiro de um sinal que é amostrado, deve ser possível calcular de maneira exata a FT desse sinal, uma vez que esses

pontos contêm toda a informação necessária para se descrever completamente o sinal.

O cálculo da FT poderá ser realizado por meio de um número finito de operações aritméticas de números complexos, denominada Transformada Discreta de Fourier (DFT, do inglês Discrete Fourier Transform). Considerando-se N amostras do sinal no domínio do tempo, denotadas $f(k)$, com $k=0,1,2,\dots,N-1$, a DFT é dada por um conjunto de amostras do sinal no domínio da frequência, denotadas por $F(n)$, $n = 0,1,2,\dots,N-1$, e definidas pela Equação 1.

$$F(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} f(k) e^{-\frac{j2\pi kn}{N}} \quad (1)$$

A Transformada Rápida de Fourier (FFT, do inglês Fast Fourier Transform) é um algoritmo eficiente para se calcular a transformada discreta de Fourier e a sua inversa. Embora o espectro de um sinal não estacionário possa ser calculado da forma usual pela FT, os resultados informam apenas sobre a composição média das frequências, calculadas considerando todo o tempo de duração do sinal (comportamento global médio). Dessa forma, os eventos transientes de curta duração têm um efeito de provocar o espalhamento dos outros picos do espectro do sinal, ficando ele próprio descaracterizado (NEWLAND, 1999). Uma alternativa a análise por Fourier é a obtenção de diferentes bandas de frequência de um sinal, com objetivo de fornecer informações simultâneas no domínio do tempo e da frequência (SANTIAGO; PEDERIVA, 2005).

2.2 Análise de Energia Wavelet

Na teoria Wavelet, as funções base que constituem os processos de representação e de reconstrução, denominadas Wavelet filhas, $\psi_{m,n}(t)$, são obtidas por meio de translações e dilatações de uma única Wavelet protótipo, $\psi(t)$ ou $\psi_{1,0}(t)$, conhecida como Wavelet-mãe (BRITO, 1996). A Wavelet-mãe, quando escalonada pelo fator de escalonamento, m , e deslocada pelo fator de translação, n , em todas as translações possíveis no tempo para varrer o sinal em análise, origina as Wavelets (diádica e ortonormal) filhas, de acordo com a Equação 2.

$$\psi_{m,n}(t) = 2^{-m/2} \psi(2^{-m}t - n) \quad (2)$$

Quando as Wavelets são utilizadas para transformar um sinal discreto, k , o resultado será

uma série de coeficientes denominados coeficientes de decomposição em Wavelets, que correspondem à Transformada Wavelet Discreta (DWT, do inglês Discrete Wavelet Transform), conforme a Equação 3.

$$DWT_{m,n} = 2^{-m/2} \sum_k f(k) \psi(2^{-m}k - n) \quad (3)$$

O espectro Wavelet de energia (E_m), para uma determinada janela de tempo na escala (m), pode ser calculado conforme a Equação 4.

$$E_m = \sum_n |DWT_{m,n}|^2 \quad (4)$$

A DWT fornece uma representação não redundante do sinal, e seus valores constituem os coeficientes de uma série Wavelet. Esses coeficientes Wavelet fornecem informações completas de uma forma simples e uma estimativa direta de energias locais em diferentes escalas. Além disso, as informações podem ser organizadas em um esquema hierárquico de subespaços alinhados, denominado de análise de multirresolução. Nessa análise, um sinal pode ser decomposto em duas componentes: aproximação e detalhe. A função Wavelet está relacionada a um filtro passa-alta, a qual produz os coeficientes de detalhes da decomposição Wavelet. Uma função adicional é relacionada ao filtro passa-baixa, denominada de função de escalonamento, sendo associada com os coeficientes de aproximação.

Na decomposição multirresolução, um sinal discreto é decomposto no primeiro nível na componente A_1 por um filtro passa-baixa, e uma componente D_1 por um filtro passa-alta. Os componentes, resultantes da filtragem passa-alta, contêm uma faixa de altas frequências, que fornece as informações com os mínimos detalhes. Precisa-se, então, analisar com mais cuidado os componentes resultantes do filtro passa-baixa, pois eles fornecem apenas uma visão global dessas frequências (OLIVEIRA, 2007). Para o segundo nível, portanto, a aproximação A_1 é agora decomposta em uma nova aproximação, A_2 , e um novo detalhe D_2 . Dessa forma, o sinal vai sendo sucessivamente decomposto em componentes de baixa resolução, enquanto que as componentes de alta frequência não são analisadas adiante.

A análise multirresolução permite a percepção da variação da distribuição de energia ao longo de certa faixa de frequência. Nesta pesquisa, a concentração da frequência predominante do sinal em certa faixa de frequência obedece à relação observada na Tabela 1, em que a Taxa de Amostragem (TA) escolhida para

aquisição dos sinais de 30 kHz é a frequência de partida para as sucessivas decomposições.

Tabela 1 – Frequência predominante dos detalhes

Detalhe	Frequência predominante (kHz)
D_1	$TA/3 = 30\text{kHz}/3 = 10\text{ kHz}$
D_2	$D_1/2 = 10\text{ kHz}/2 = 5\text{ kHz}$
D_3	$D_2/2 = 5\text{ kHz}/2 = 2,5\text{ kHz}$
D_4	$D_3/2 = 2,5\text{ kHz}/2 = 1,25\text{ kHz}$
D_n	$D_{n-1}/2$

Legenda: D=detalhe; n=n-ésimo detalhe; TA=Taxa de amostragem.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Um sinal de corrente, torque entreferro, vibração ou emissão acústica do motor que apresenta alguma falha, possui distribuições diferentes de energia, ao longo dos seus detalhes, em relação ao sinal sem falha.

3 Metodologia

Nesta seção são abordadas as estratégias adotadas para a detecção de barras quebradas no motor de indução, a partir das medições diretas das tensões e correntes elétricas.

3.1 Detecção por Análise de Frequências de Falhas

A detecção de barras quebradas pela análise espectral de vibração mecânica depende do escorregamento, e poderão ser observadas pelas amplitudes das bandas laterais $f_{b(esquerda)}$ e $f_{b(direita)}$ próximas à frequência de rotação do motor. As frequências referentes às barras quebradas são calculadas utilizando-se as Equações 5 e 6 (MERTENS JUNIOR, 2008).

$$f_{b(esquerda)} = f_r - 2ksf \quad (5)$$

$$f_{b(direita)} = f_r + 2ksf \quad (6)$$

com $k=1,2,3,\dots,n$ (bandas laterais). Além disso, é a frequência síncrona de rotação mecânica do motor; f_r , a frequência da rede elétrica; s , o escorregamento do motor definido pela Equação 7.

$$s = (f_s - f_r)/f_s \quad (7)$$

em que f_s é a frequência síncrona de rotação do motor.

A detecção de falhas pela corrente de armadura e pelo torque no entreferro também depende do escorregamento. A Tabela 2 ilustra as equações utilizadas para a localização do pico da falha, de acordo com Bonaldi (2005), em função do tipo de sensor utilizado.

Na Tabela 2, f_b são as frequências laterais resultantes das barras quebradas; k é um número inteiro positivo; T é o torque no entreferro do motor.

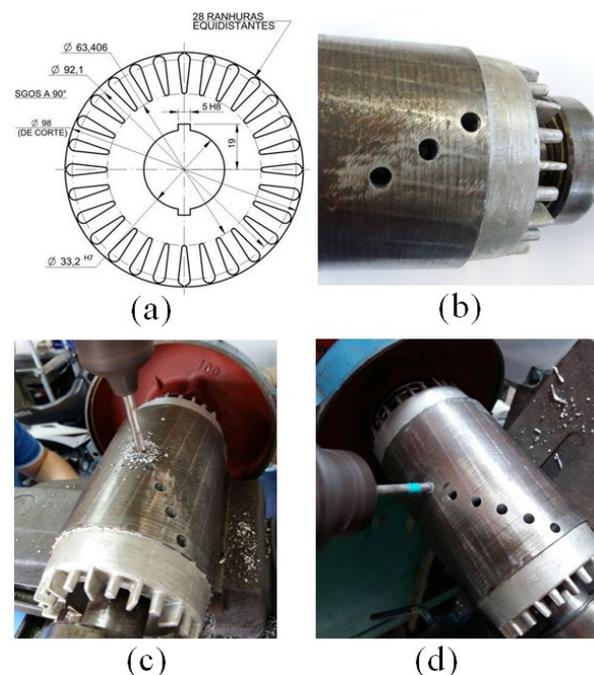
Tabela 2 – Técnica de detecção em função da frequência de barras quebradas do rotor

Variáveis	Equações
Corrente elétrica	$f_b = (1 \pm 2s)f$
Vibração mecânica	$f_b = f_r \pm 2ksf$
Torque no entreferro	$T = 2sf_r$

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 1a ilustra as disposições das barras no motor utilizado, fornecido pela empresa Voges®; a Figura 1b, o motor com três barras quebradas; as Figuras 1c e 1d, o procedimento adotado no experimento para furar (furo com 6 mm de diâmetro) as barras do rotor.

Figura 1 – Barras quebradas no rotor por meio de furos



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2 Detecção por Eficiência Energética

A determinação do torque no entreferro é realizada pela amostragem digital das tensões e correntes elétricas que alimentam o motor e a velocidade angular do eixo.

O cálculo do torque do entreferro (T_{ag}) é definido a partir da sua relação com o fluxo de acoplamento do enrolamento do estator, que é dado de acordo com a Equação 8 (HSU *et al.*, 1995).

$$T_{ag} = \frac{p\sqrt{3}}{6} \left\{ (i_a - i_b) \int [v_{ca} - r(i_c - i_a)] dt - (i_c - i_a) \int [v_{ab} - r(i_a - i_b)] dt \right\} \quad (8)$$

em que: r é a resistência do enrolamento do estator; v_{ca} e v_{ab} são tensões entre fases, e os índices variam de acordo com os terminais que estão sendo medidos. A Equação 8 é válida tanto para motores ligados em Y ou em Δ . Para os motores ligados em Y sem conexão com o neutro, ou em Δ , por meio de três fios, a Equação 8 pode ser escrita considerando-se que $i_c = -i_a - i_b$.

As integrais da Equação 8 representam o fluxo de acoplamento correspondente ao torque. Nessas integrais deve-se levar em consideração a fase inicial da força contra-eletromotriz que gera um valor DC, pois o acúmulo dessas componentes leva à saturação do sinal. Desse modo, o algoritmo utilizado para o cálculo do torque no entreferro deverá compensar as componentes DC gerados, assim como o valor offset, inerente aos sensores utilizados e ao processo de conversão analógico/digital.

No algoritmo utilizado, os valores de offset oriundos dos sensores e do conversor A/D são compensados a cada ciclo de integração, subtraindo do sinal a sua média. O torque no eixo do motor (T) é indicado pela Equação 9, conforme Lima Filho (2009), em que são consideradas as perdas mecânicas (L_{mec}) (atrito e ventilação), perdas adicionais do motor (L_{ar}), o torque do entreferro (T_{ag}) e a velocidade angular (ω).

$$T = T_{ag} - \frac{L_{mec}}{\omega} - \frac{L_{ar}}{\omega} \quad (9)$$

A eficiência do motor ($\hat{\eta}$) é dada pela razão entre a potência de entrada (P_{in}), e de saída (\hat{P}_{out}), conforme a Equação 10.

$$\hat{\eta} = \frac{\hat{P}_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (10)$$

A potência elétrica instantânea de entrada do motor trifásico é calculada a partir das medidas diretas de tensão e corrente elétrica instantânea, conforme a Equação 11.

$$P_{in} = -v_{ca}(i_a + i_b) - v_{ab}i_b \quad (11)$$

A potência útil de saída é o produto entre o torque no eixo do motor e a sua velocidade angular, ω , conforme Equação 12.

$$\hat{P}_{out} = T\omega \quad (12)$$

A eficiência, dado por $\hat{\eta}$, é calculada, portanto, a partir da Equação 13 resultante. Com a presença dos defeitos, esperam-se alterações na eficiência e no torque do entreferro.

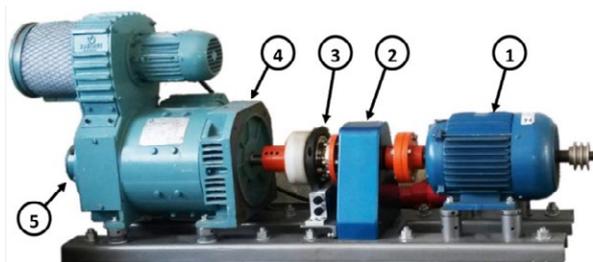
$$\hat{\eta} = \frac{T\omega}{-v_{ca}(i_a + i_b) - v_{ab}i_b} \times 100 \quad (13)$$

3.3 Bancada Experimental

Na Figura 2 é ilustrada a bancada de testes, projetada e construída para realização de testes de falhas mecânicas. A bancada é composta, basicamente, por: um motor de indução trifásico (MIT) (1), cujos parâmetros são apresentados na Tabela 3; um inversor de frequência, modelo WEG® CFW 700, não ilustrado na Figura 2; um torquímetro digital, modelo HBM T40B-200 (3); um gerador CC, modelo 132S de potência 7,5 CV, com um banco de resistência (4) acoplado aos seus terminais.

Pode-se observar, ainda no eixo de rotação da bancada, um mancal (2) para apoio, com dois rolamentos e um transdutor de velocidade (5).

Figura 2 – Bancada de ensaios de falha



Fonte: Elaborada pelo autor.

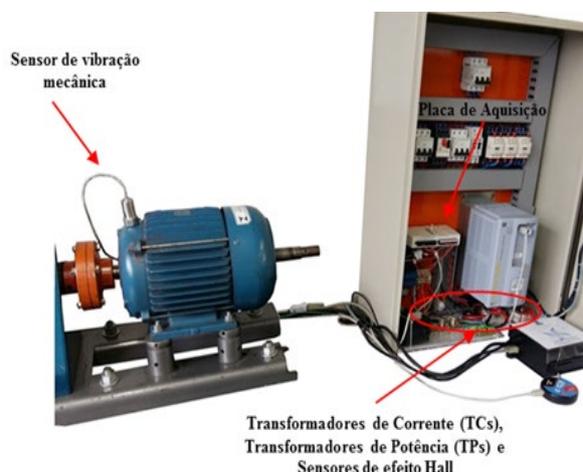
Tabela 3 – Parâmetros do motor de indução trifásico

Modelo	VOGES CE	
Potência nominal	VTOP	
Velocidade nominal	5 CV / 3,7 kW	
Eficiência nominal	1730 rpm / 181, 17 rad/s	
Torque nominal	Carga	Eficiência
	50%	84,5%
	75%	87,0%
	100%	87,5%
Tensão elétrica	20,4 Nm	
Corrente elétrica	380 V	
Modelo	7,8 A	

Fonte: Elaborada pelo autor.

O sistema de aquisição de dados contém, basicamente: um acelerômetro industrial, modelo HS-1001000202 da Hansford Sensors; sensor de emissão acústica (microfone de *smartphone* - SAMSUNG A7); transformadores de corrente (TC) fabricados pela Toroid do Brasil, com núcleo de grão orientado com corrente máxima RMS de 100 A, no primário, e 5 A, no secundário; transformadores de potência (TP), da Technotrafo (380 Vrms no primário para 3 Vrms no secundário); sensores de efeito Hall tipo ACS712ELC-30A; placa de aquisição de dados, modelo NI USB-6215. A Figura 3 ilustra a disposição dos instrumentos de leitura.

Figura 3 – Sistema de aquisição e sensores



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para a aquisição dos dados, foi utilizado o conversor A/D da placa de aquisição de dados NI USB-6215, com comunicação com o computador por meio de uma porta USB. O conversor A/D utilizado possui 16 bits de resolução e pode trabalhar com uma taxa de amostragem de até 250.000 amostras/s.

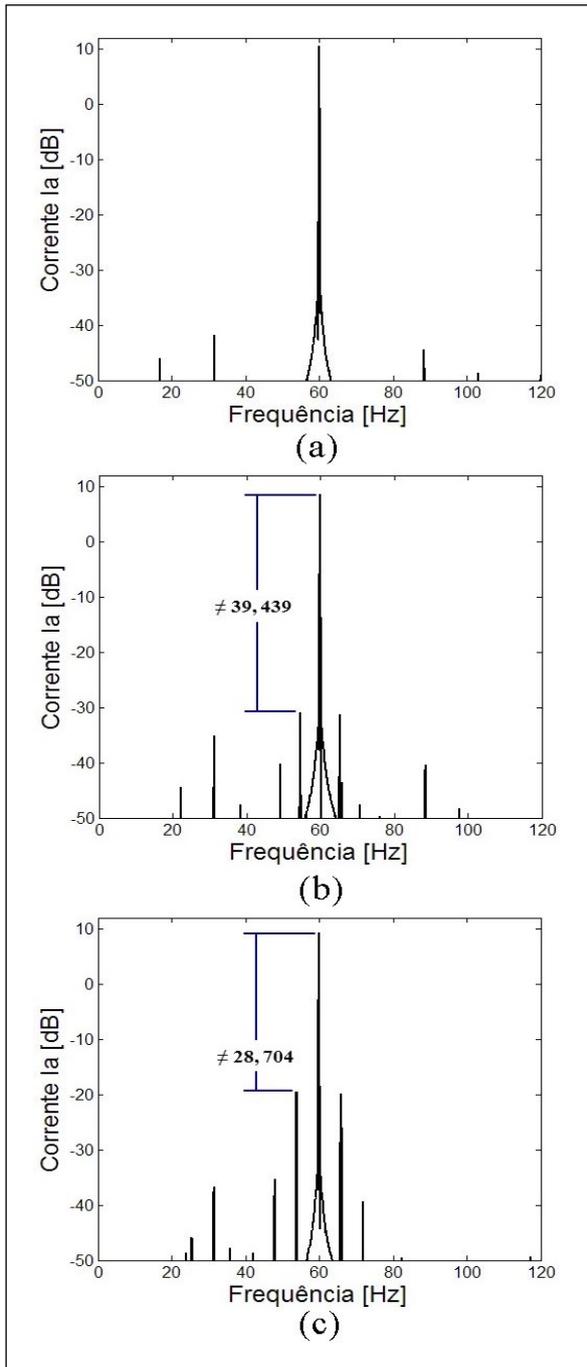
4 Resultados experimentais

Nesta seção são apresentados os comportamentos dos diferentes sinais do sistema eletromecânico proposto por meio da aplicação da análise espectral e Wavelet, sendo o motor acionado diretamente da rede. Os ensaios experimentais caracterizaram as condições do motor sem falhas, com 1, 3, 5 e 7 barras quebradas.

4.1 Análise da corrente elétrica

Para a análise pelo espectro da corrente elétrica, foram realizados ensaios com cargas de 20 Nm e 25 Nm. A Tabela 4 ilustra os resultados para barras quebradas para o carregamento de 25 Nm. Na Figura 4 são apresentados os resultados da FFT da corrente elétrica para, nas condições de inexistência de barras quebradas, identificadas por BQ, uma barra quebrada e três barras quebradas. A Figura 5 ilustra o resultado da FFT da corrente elétrica para as condições com cinco barras quebradas e com sete barras quebradas.

Figura 4 – Detecção de barras quebradas no rotor pela FFT da corrente do estator, motor com sistema mecânico, com carga de 25 Nm: (a) inexistência de barras quebradas (BQ), (b) 1 BQ e (c) 3 BQ



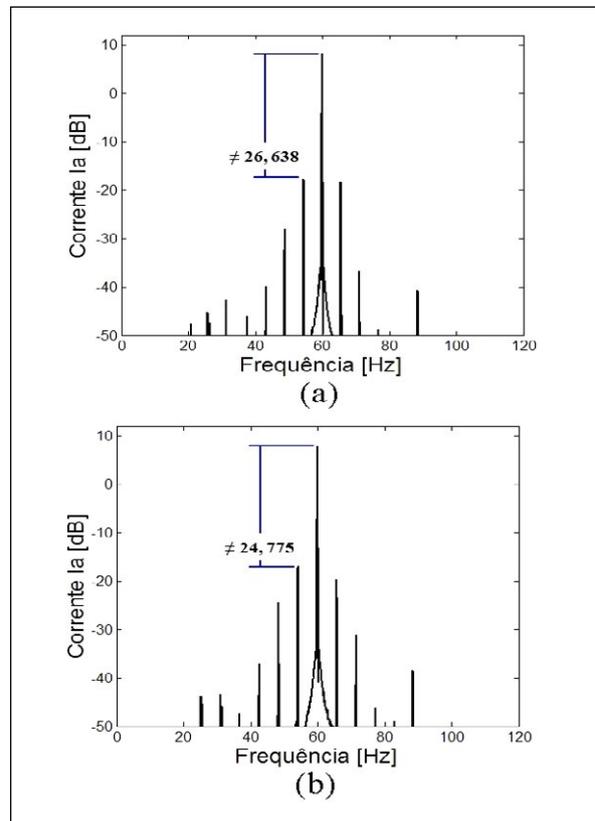
Fonte: Elaborada pelo autor

Tabela 4 – Número de barras quebradas em função da severidade da falha na corrente do estator com 25 Nm

Nº de barra quebradas	Severidade da falha (dB)
BQ 1	39,439
BQ 3	28,704
BQ 5	26,638
BQ 7	24,775

Fonte: Elaborada pelo autor.

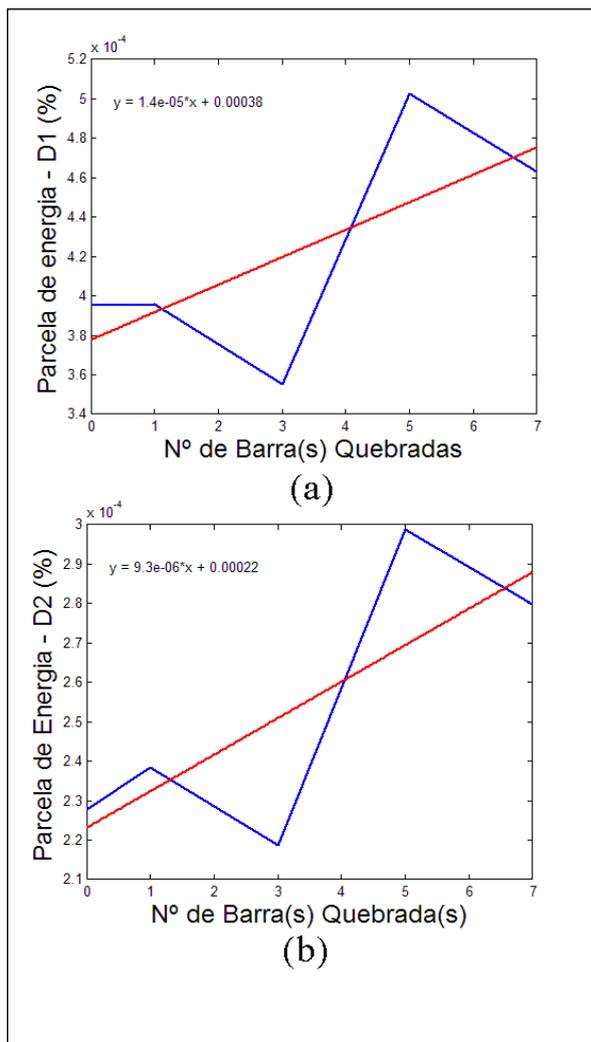
Figura 5 – Detecção de barras quebradas no rotor pela FFT da corrente do estator, motor com sistema mecânico, com carga de 25 Nm: (a) 5 BQ e (b) 7 BQ



Fonte: Elaborada pelo autor.

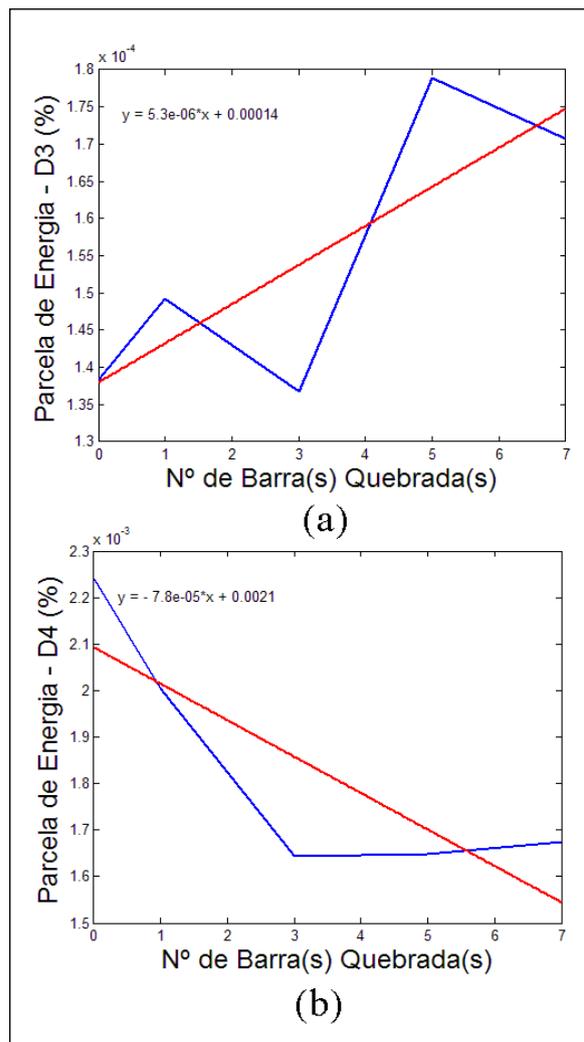
Nas Figuras 6 e 7, são apresentadas as análises Wavelet, para sinais de corrente de armadura sob carregamentos de 25 Nm. Percebe-se uma tendência em aumentar o nível de energia dos detalhes D_1 , D_2 e D_3 em relação ao sinal sem falha. A linha azul representa a variação da parcela de energia no nível, em relação ao número de barras quebradas; a linha vermelha representa a linha de tendência da evolução da energia, em relação à severidade da falha em análise.

Figura 6 – Detecção de barras quebradas no rotor pela análise da corrente do estator, com a evolução do: (a) detalhe Wavelet D_1 e (b) detalhe Wavelet D_2 com carga de 25 Nm



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 7 – Detecção de barras quebradas no rotor pela análise da corrente do estator, com evolução do: (a) detalhe Wavelet D_3 e (b) detalhe Wavelet D_4 com carga de 25 Nm



Fonte: Elaborada pelo autor

4.2 Análise da vibração

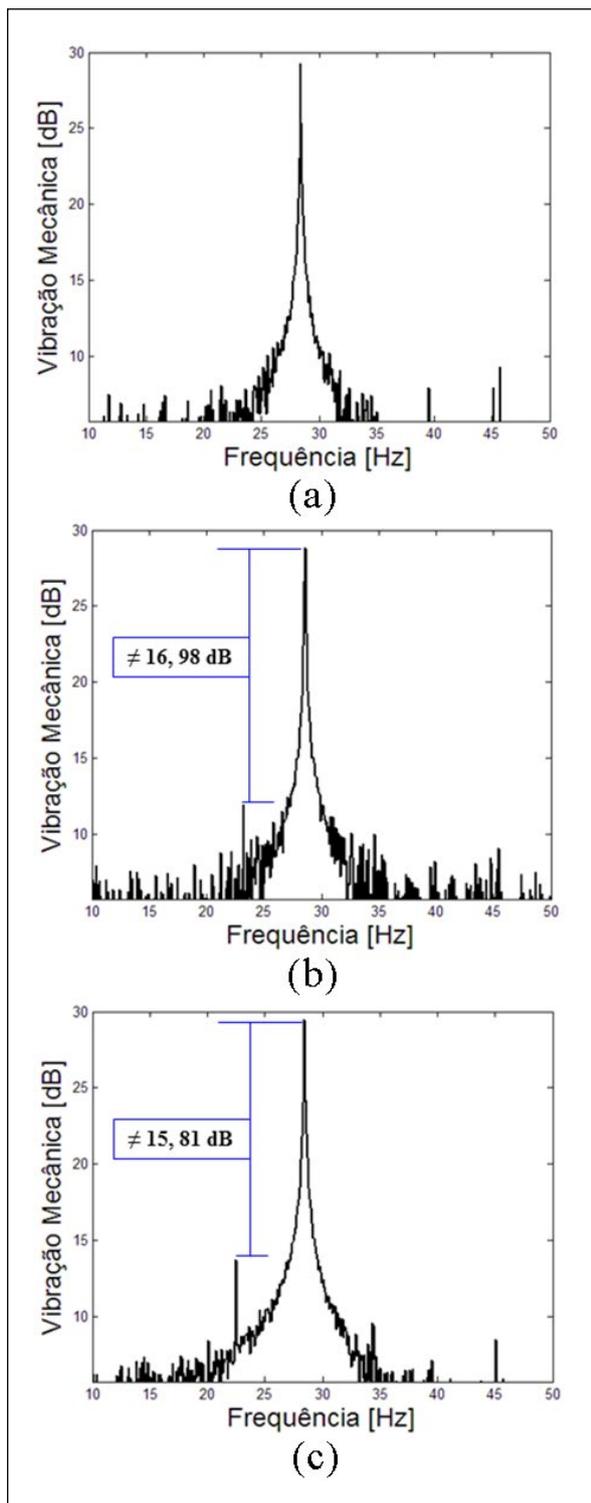
Na situação de 25 Nm (122,5 % da carga nominal), a diferença entre os picos da fundamental e o pico referente à barra quebrada está descrita conforme a Tabela 5. Na Figura 8, é ilustrado o resultado da FFT da vibração para, nas condições de inexistência de barras quebradas, uma barra quebrada e três barras quebradas. Na Figura 9 é apresentado o resultado da FFT da vibração para as condições de cinco barras quebradas e sete barras quebradas.

Tabela 5 – Número de barras quebradas vs. severidade da falha barras quebradas, com carga de 25 Nm

Nº de barra quebradas	Severidade da falha (dB)
BQ 1	16,98
BQ 3	15,81
BQ 5	16,25
BQ 7	15,93

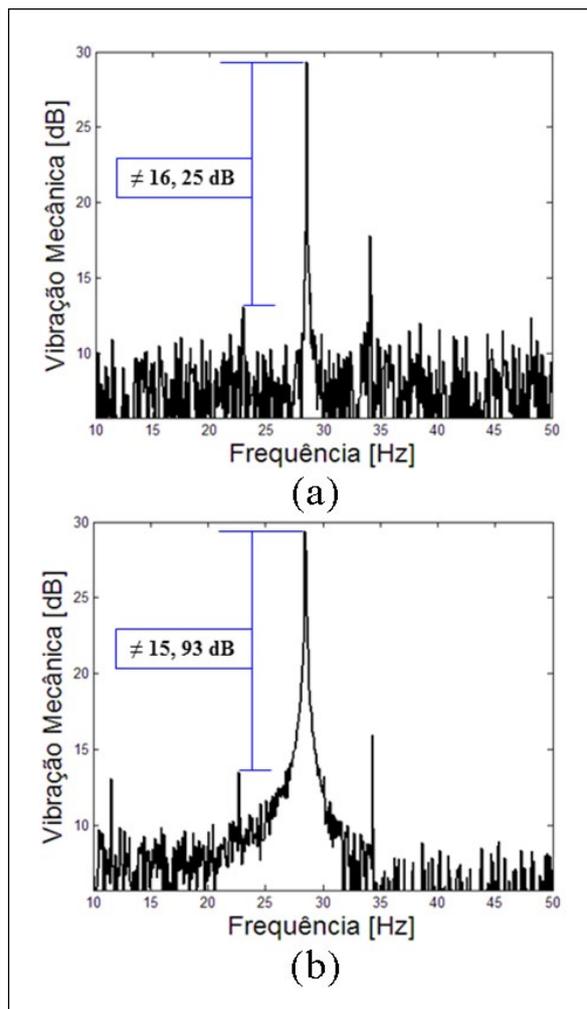
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 8 – Detecção de barras quebradas no rotor pela FFT da vibração, motor com sistema mecânico, com carga de 25 Nm: (a) inexistência de BQ, (b) 1 BQ e (c) 3 BQ



Fonte: Elaborada pelo autor

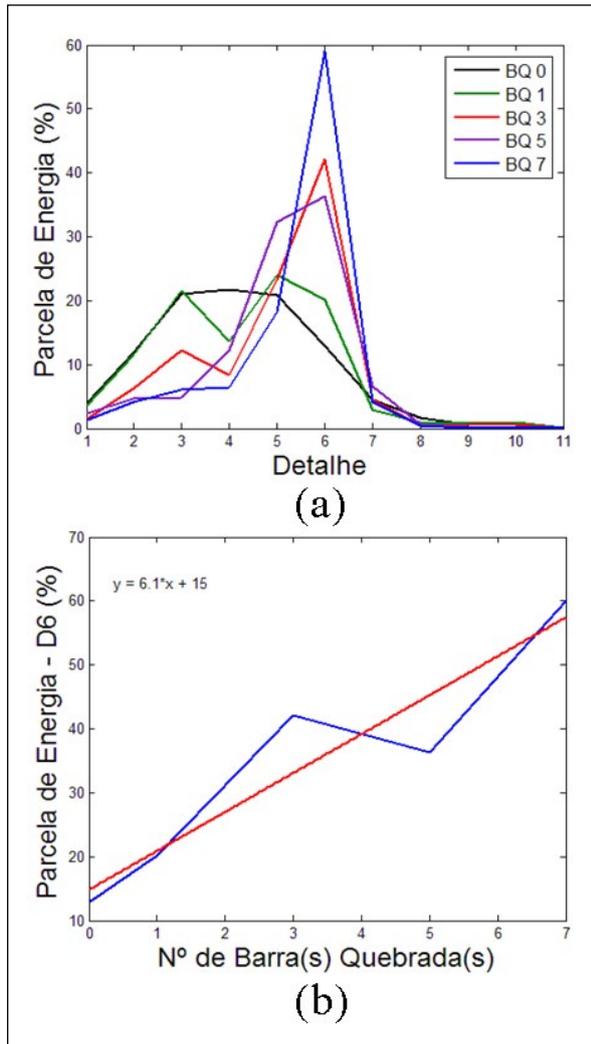
Figura 9 – Detecção de barras quebradas no rotor pela FFT da vibração, motor com sistema mecânico, com carga de 25 Nm: (a) 5 BQ e (b) 7 BQ



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na análise Wavelet, tornou-se nítida a tendência crescente da energia do detalhe D_6 , com o aumento da severidade da falha, conforme ilustrado na Figura 10.

Figura 10 – Detecção de barras quebradas no rotor pela análise da vibração mecânica: (a) energia dos detalhes e (b) evolução do detalhe D_6 com o aumento da severidade da falha, motor com sistema mecânico, com carga de 25 Nm



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3 Análise do Torque e Eficiência Energética

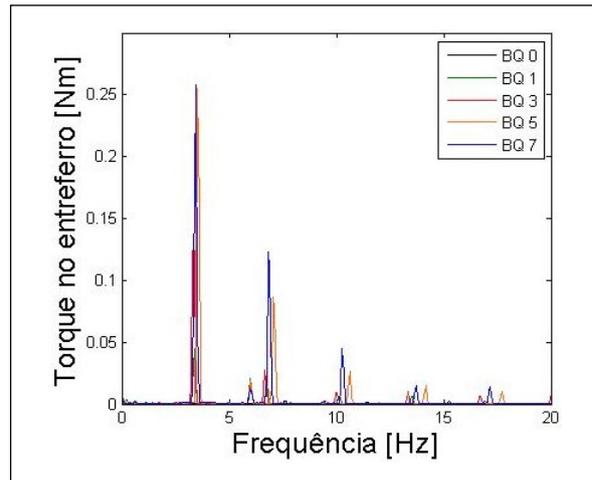
Na análise do torque, foi observado que existe uma banda lateral em baixa frequência, que cresce à medida que as barras são quebradas. Essa frequência é encontrada pela diferença entre o pico da fundamental e o pico referente à barra quebrada, o que pode ser constatado na Tabela 6 e na Figura 11.

Tabela 6 – Carga, escorregamento, frequência de barra quebrada e frequência do torque no entreferro

Carga (N/m)	Escorregamento	Frequência de barra quebrada (Hz)	Frequência torque no entreferro (Hz)
5	0,8889	58,9333	1,0667
10	1,5000	58,2000	1,8000
15	2,2778	57,2266	2,7333
20	2,7780	56,6670	3,3333

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 11 – Efeito da falha de barras quebradas na FFT do torque o entreferro, com carga de 20 Nm



Fonte: Elaborada pelo autor.

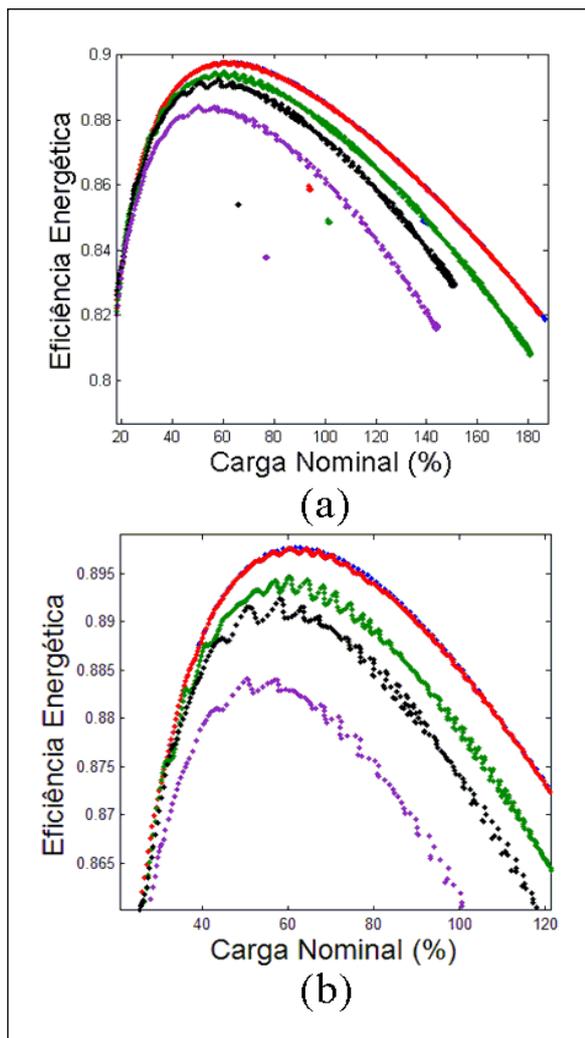
Para a análise do efeito das barras quebradas na eficiência energética, a Tabela 7 e a Figura 12 ilustram os valores da eficiência para uma condição de eficiência máxima e de quando o motor está trabalhando a plena carga. Percebe-se uma queda gradativa na eficiência, nítida nas regiões de carga nominal (100%) e de sobrecarga, conforme haja maior severidade da falha em todas as aquisições.

Tabela 7 – Efeito das barras quebradas do rotor na eficiência energética

Nº de barra quebradas	Eficiência máxima (%)	Eficiência a plena carga (%)
BQ 0	89,77	88,49
BQ 1	89,75	88,49
BQ 3	89,46	87,90
BQ 5	89,23	87,38
BQ 7	88,40	86,09

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 12 – Efeito da falha de barras quebradas na eficiência energética: (a) eficiência máxima e (b) eficiência com 100% da carga nominal



Fonte: Elaborada pelo autor.

5 Conclusões

Este trabalho apresentou um estudo sobre técnicas de diagnóstico de falhas em barras quebradas para motores de indução trifásicos. As técnicas associadas à análise de sinais de mecânicos (vibração) e elétricos (corrente, torque no entreferro e eficiência energética) foram verificadas em experimentos com barras cujos furos foram realizados de maneira gradativa.

Foi montado um aparato experimental e uma estrutura de métodos que permitiu confrontar as diferentes técnicas de sensoriamento sempre sob o ponto de vista de análise espectral e de análise multirresolução Wavelet.

A análise da falha por análise espectral na corrente elétrica se mostrou melhor em relação à análise de vibração mecânica. Já a análise Wavelet se mostrou eficiente na detecção da falha por corrente elétrica (detalhes 1, 2 e 3) e vibração mecânica (detalhe 6).

A técnica do torque no entreferro usando FFT também apresentou bom resultado, cujos picos na frequência de falha aumentam gradativamente de acordo com o aumento da severidade de forma uniforme. Para o caso da ausência de carga, o sinal da detecção fica comprometido, porém todas as outras cargas são coerentes com o aumento de barras quebradas. A eficiência energética é comprometida com o aumento da severidade da falha em estudo.

Os resultados obtidos representam um bom avanço no sentido de se obter um sistema de detecção remoto e automático de falhas em barras quebradas. Como trabalhos futuros, serão investigados os problemas e dificuldades na detecção de barras quebradas e o projeto de um sistema embarcado para detecção de falha.

REFERÊNCIAS

- AHAMED, S. K. *et al.* Novel Diagnosis Technique of Mass Unbalance in Rotor of Induction Motor by the Analysis of Motor Starting Current at No Load Through Wavelet Transform. International Conference on Electrical and Computer Engineering, 2010, Dhaka. **Proceedings...** Dhaka: ICECE, 2010, v.1, p. 474 – 477.
- BIDGOLI, F. S.; POSHTAN, J. Application of improved Hilbert-Huang and wavelet packet transforms in broken rotor bar fault detection. In: Power Electronics, Drive Systems & Technologies Conference (PEDSTC), v. 8, 2017, Mashhad. **Proceedings...** Mashhad: PEDSTC, 2017, p. 341-346.

BONALDI, E. L. **Diagnóstico preditivo de avarias em motores de indução trifásicos com MCSA e teoria de conjuntos aproximados**. 2005. 185 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)—Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Brasil, 2005.

BRITO, N. S. D. **Teoria wavelet e sua aplicação em sistemas de energia elétrica**. 1996. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)—Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil, 1996.

HERNÁNDEZ, J. C. *et al.* Comparison of different wavelet families for broken bar detection in induction motors. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL TECHNOLOGY (ICIT), 2015, Seville. **Proceedings...** Seville: ICIT, 2015, p. 3220-3225.

HSU, J. S. *et al.* Nature and assessments of torque ripples of permanent-magnet adjustable-speed motors. In: INDUSTRY APPLICATIONS CONFERENCE, THIRTIETH IAS ANNUAL MEETING (IAS '95), 1995, Orlando. **Proceedings...** Orlando: IEEE, 1995, v. 3, p. 2696-2702.

LIMA FILHO, A. C. **Estudo e desenvolvimento de soluções para determinação do torque em unidades de bombeio mecânico utilizadas na extração de petróleo**. 2009. 112 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)—Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brasil, 2009.

MERTENS JUNIOR, A. **Uma abordagem sobre detecção de barras quebradas em motores de indução**. 2008. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)—Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, 2008.

NEWLAND, D. E. Harmonic wavelets in vibrations and acoustics. **Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 357, n. 1760, p. 2607-2625, 1999.

OLIVEIRA, T. M. **Manutenção preditiva de motores de corrente contínua com ênfase em MCSA: motor current signature analysis**. 2007. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)—Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Brasil, 2007.

SANTIAGO, D. F. A.; PEDERIVA, R. Feature extraction and fault detection of rotating machinery based on wavelet packet transform. In: DINAME - INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON DYNAMIC PROBLEMS OF MECHANICS, 11., 2005, Ouro Preto. **Proceedings...** Ouro Preto, DINAME, 2005, p. 1-10.

SRIDHAR, S.; RAO, K. U.; JADE, S. Detection of broken rotor bar fault in induction motor at various load conditions using wavelet transforms. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON RECENT DEVELOPMENTS IN CONTROL, AUTOMATION AND POWER ENGINEERING (RDCAPE), 2015, Noida. **Proceedings...** Noida: RDCAPE, 2015, p. 77-82.

THOMSON, W. T.; FENGER, M. Current signature analysis to detect induction motor faults. **IEEE Industry Applications Magazine**, v. 7, n. 4, p. 26-34, 2001.