

Estratégias para Detecção de Falhas em Rolamentos de Motores de Indução Trifásicos

Carlos Alberto Nóbrega Sobrinho^[1], Alexander Patrick Chaves de Sena^[2],
Abel Cavalcante Lima Filho^[3]

[1] carlos.nobrega@academico.ifpb.edu.br. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB)/Campus Patos.

[2] alexander.sena@caruaru.ifpe.edu.br. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco (IFPE)/Campus Caruaru.

[3] abel@ct.ufpb.br. Universidade Federal da Paraíba (UFPB)/ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM).

RESUMO

Neste trabalho é apresentado um estudo sobre a detecção de falhas na pista externa dos rolamentos de um motor de indução trifásico, utilizando-se a análise de variáveis mecânicas (vibração e emissão acústica) e elétricas (eficiência energética). Especificamente, é proposta a avaliação da expressividade dos sinais na presença da avaria, aplicando-se, como ferramentas de análise para a vibração e a emissão acústica, as transformadas de Fourier e Wavelet. A estimação da eficiência energética, a partir da medição das tensões e correntes estatóricas, é sugerida como técnica alternativa para detecção da avaria. Resultados experimentais são apresentados para observação das estratégias sugeridas, avaliando-se a credibilidade da detecção da avaria com motor funcionando na rede sem carga, com carga estática (vibração e emissão acústica) e dinâmica (eficiência energética).

Palavras-chave: Eficiência energética. Emissão acústica. Vibração mecânica. Análise espectral. Análise Wavelet.

ABSTRACT

In this work a study is presented on the detection of failures in the outer race of the bearings of a three-phase induction motor, using the analysis of mechanical variables (vibration and acoustic emission) and electrical (energy efficiency). Specifically, it is proposed to evaluate the expressiveness of the signals in the presence of the fault, applying, as analysis tools for vibration and acoustic emission, the Fourier and Wavelet transforms. The estimation of energy efficiency, from the measurement of voltages and statoric currents, is suggested as an alternative technique for fault detection. Experimental results are presented to observe the proposed strategies, evaluating the credibility of the fault detection with the motor running on the network and without load, with static load (vibration and acoustic emission) and dynamic load (energy efficiency).

Keywords: *Energy efficiency. Acoustic emission. Mechanical vibration. Spectral analysis. Wavelet analysis.*

1 Introdução

Os sinais de vibração mecânica processados pela transformada de Fourier ou Wavelet têm sido largamente utilizados para a predição de avarias em elementos mecânicos e motores elétricos (SOBRINHO, 2015). O que faz da análise de vibrações um processo eficiente é que cada elemento da máquina induz uma excitação própria, gerando formas específicas de vibração. Uma parcela das vibrações se deve a pequenos defeitos que comprometem a performance do equipamento. O aumento do nível de vibração é reflexo do agravamento do defeito (BONALDI, 2005).

Uma estratégia que surgiu como alternativa para se realizar uma análise vibracional explora a capacidade intrínseca de motores em atuar como transdutores (SENA, 2015). Ultimamente, a detecção de avarias em rolamentos utilizando-se a análise de assinatura de corrente tem sido proposta por relevantes pesquisadores, tais como: Vitek *et al.* (2011), Sobrinho (2015), Oliveira, Sena e Fernandes (2018), Chen *et al.* (2020) e Weicker *et al.* (2020). A detecção por sinais elétricos agrega ainda as linhas de pesquisas que trabalham na hipótese de relacionar as falhas no rolamento com a eficiência energética e o torque no entreferro, como é o caso de Frosini e Bassi (2010), Arabaci e Bilgin (2013) e Sobrinho (2015).

Um dos métodos que ganhou bastante espaço nas últimas décadas é a análise de emissão acústica, devido à popularização e redução dos custos dos dispositivos de medição. Sinais sonoros têm sido utilizados com objetivo de aumentar a confiabilidade do sistema de análise, devido ao fato de as alterações audíveis serem identificadas mais precocemente. Os trabalhos de Sobrinho (2015), Oliveira, Sena e Fernandes (2018), Duan *et al.* (2018) e Saufi *et al.* (2019) representam relevantes resultados a partir da utilização da emissão acústica para analisar avarias em rolamentos.

A Transformada de Fourier (FFT) é, em essência, uma ferramenta matemática que permite representar e estudar o comportamento de certos sinais que apresentam propriedades estacionárias. Essa técnica possui resolução máxima em frequência, mas nenhuma resolução no tempo, e a análise dos coeficientes define a frequência global do sinal. Para equilibrar essa divergência, 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 (SOBRINHO, 2015). A Transformada Wavelet Discreta (DWT) 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 avarias em rolamentos, tais como os de Hernández *et al.* (2015), Bidgoli e Poshtan (2017), Wang *et al.* (2017), Liu e Xiang (2018) e os de Azeez *et al.* (2020).

Nesse sentido, a motivação deste trabalho foi o interesse na implementação das análises de emissão acústica (FFT e DWT), da vibração mecânica (FFT e DWT) e da eficiência energética, para o diagnóstico automático de avarias na pista externa de rolamentos de motores de indução.

2 Ferramentas para Análise de Sinais

Na análise espectral, a amplitude de um sinal é o parâmetro usado para comparação com determinados valores padrão para o julgamento do estado de uma máquina, estando no domínio da frequência o dado indicativo da natureza do problema que pode estar causando um mau funcionamento. A teoria Wavelet é um recurso matemático desenvolvido para várias aplicações e que tem sido usada como uma eficiente ferramenta para a análise de sinais por meio de processamento de sinal multirresolução. Algumas características podem ser extraídas a partir dos coeficientes obtidos pela decomposição Wavelet de um determinado sinal. A energia do sinal associada às faixas de frequência dos diferentes níveis de resolução pode apontar uma falha.

2.1 Transformada Rápida de Fourier (FFT)

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 (*Fourier Transform*) – FT. 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 (*Discrete Fourier Transform*) – DFT. Considerando-se 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 $F(n)$, $n=0,1,2,\dots$ e $N-1$ 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 (*Fast Fourier Transform*) – FFT 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-se 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 (SOBRINHO, 2015). Uma alternativa para a análise pelo método 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 Transformada Wavelet Discreta (DWT)

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 (SENA, 2015). 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 (*Discrete Wavelet Transform*) – DWT, 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	$D_1/2 = 5\text{ kHz} / 2 = 2,5\text{ kHz}$
D_4	$D_1/2 = 2,5\text{ kHz} / 2 = 1,25\text{ kHz}$
D_n	$D_{n-1}/2$

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

Fonte: Elaborada pelo autor.

Um sinal de vibração, torque entreferro 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, serão abordadas as estratégias adotadas para a detecção de avarias em rolamentos, a partir das medições diretas da vibração e da emissão acústica, bem como a estimação da eficiência energética, a partir da medição das variáveis elétricas do motor.

3.1 Detecção por Análise de Frequências de Falhas

Na análise espectral, a frequência onde deverá aparecer o pico da falha coincidirá com as frequências de falha na pista externa, ou seja, seriam frequências em que uma esfera colide no ponto da falha. A Tabela 2 indica a fórmula utilizada para a localização do pico da falha, de acordo com a literatura em função do tipo de sensor utilizado.

Para a determinação da frequência de vibração na falha, por exemplo, utilizam-se os dados geométricos do rolamento e uma frequência de rotação (FR) de 30 Hz (motor de quatro polos, acionado diretamente da rede). Neste caso, os picos aparecem no espectro em frequências múltiplas de 107 Hz. O rolamento utilizado foi o modelo 6206-2Z/C3 da SKF®.

Tabela 2 – Sinal utilizado vs. frequência de falha no rolamento para avaria na pista externa

Sinal	Fórmula
Corrente Elétrica	$f_{sc} = f_e \pm k f_n $
Vibração Mecânica	$F_o = \frac{N_B}{2} F_R \left(1 - \frac{D_b \cos(\beta)}{D_c} \right)$
Emissão Acústica	$F_o = \frac{N_B}{2} F_R \left(1 - \frac{D_b \cos(\beta)}{D_c} \right)$
Torque no entreferro	Não Aplicada
Eficiência energética	Não Aplicada

Legenda: f_{sc} =componente espectral da corrente elétrica referente às anomalias no rolamento [Hz]; f_e =frequência da rede elétrica; k =número inteiro positivo; f_n =frequências naturais dos componentes dos rolamentos [Hz]; F_o =frequência de falha da pista externa; N_B =número de elementos rolantes; f_R =frequência de rotação do rotor; D_b =diâmetro da esfera; β =ângulo de contato da esfera; D_c =diâmetro primitivo.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 1 apresenta a (a) forma em que a falha na pista externa foi inserida no rolamento e (b) o furo na pista externa (5,8 mm de diâmetro).

Figura 1 – Falha na pista externa do rolamento



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2 Detecção pela 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 5 (HSU *et al.*, 1995).

$$T_{ag} = \frac{p\sqrt{3}}{6} \{ (i_a - i_b) \int [v_{ca} - r(i_c - i_a)] dt - (i_c - i_a) \int [v_{ab} - r(i_a - i_b)] dt \} \quad (5)$$

em que: r é a resistência do enrolamento do estator; v_{ca} e v_{ab} são tensões entre fases – os índices variam de acordo com os terminais que estão sendo medidos. A Equação 5 é válida tanto para motores ligados em Y quanto em Δ . Para os motores ligados em Y , sem conexão com o neutro, ou em Δ , por meio de três fios, a Equação 5 pode ser escrita considerando-se que $i_c = -i_a - i_b$.

As integrais da Equação 5 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 de CC (Corrente Contínua), 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 de CC gerados, assim como o valor offset inerente aos sensores utilizados e ao processo de conversão analógico/digital (A/D).

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 6, conforme Adissi (2015), 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).

$$T = T_{ag} - \frac{L_{mec}}{\omega} - \frac{L_{ar}}{\omega} \quad (6)$$

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 7.

$$\hat{\eta} = \frac{\hat{P}_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (7)$$

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 8.

$$P_{in} = -v_{ca}(i_a + i_b) - v_{ab}i_b \quad (8)$$

A potência útil de saída é o produto entre o torque no eixo do motor e a sua velocidade angular, ω , conforme Equação 9.

$$\hat{P}_{out} = T\omega \quad (9)$$

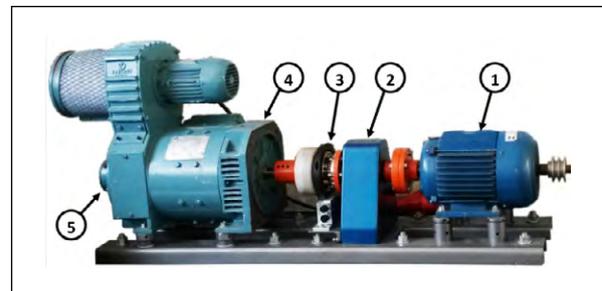
A eficiência, dado por $\hat{\eta}$ é calculada, portanto, a partir da Equação 10 resultante. Com a presença dos defeitos, esperam-se alterações na eficiência e no torque do entreferro.

$$\hat{\eta} = \frac{T\omega}{-v_{ca}(i_a + i_b) - v_{ab}i_b} \times 100 \quad (10)$$

3.3 Bancada Experimental

Na Figura 2, é ilustrada uma bancada, 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 apresentado na Figura 2; um torquímetro digital, modelo HBM T40B-200 (3) de alta exatidão e apenas 0,03% em termos de linearidade e histerese da HBM®; um gerador CC, modelo 132S, de potência 7,5 CV, com um banco de resistência (4) acoplado aos seus terminais.

Figura 2 – Bancada de ensaios de falha



Fonte: Elaborada pelo autor.

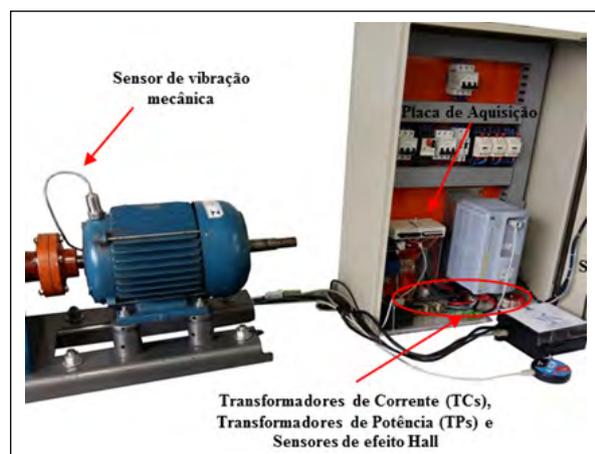
Pode-se observar, ainda no eixo de rotação da bancada, um mancal (2) para apoio, com dois rolamentos, e um transdutor de velocidade (5) do tipo taco gerador TH20R1800, da Hohner®, que gera um sinal analógico de 0 a 10V.

Tabela 3 – Parâmetros do motor de indução trifásico

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

Fonte: Elaborada pelo autor.

O sistema de aquisição de dados contém, basicamente: um acelerômetro industrial, modelo HS-1001000202, da Hansford Sensors®, que possui uma sensibilidade de 100 mV/g \pm 10% e resposta em frequência de 2 Hz a 10 kHz \pm 5%; 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 100A, no primário, e 5A, no secundário; transformadores de potência (TP), da Technotrafo® (380 Vrms no primário, para 3 Vrms no secundário); sensores de efeito Hall, tipo ACS712ELC-30A, com saída analógica de 185 mV/A; placa de aquisição de dados, modelo NI USB-6215, que possui 16 entradas analógicas de 16-Bit e 250 kS/s (amostras por segundo). A Figura 3 apresenta a disposição dos instrumentos de leitura.

Figura 3 – Sistema de aquisição e sensores

Fonte: Elaborada pelo autor.

4 Resultados experimentais

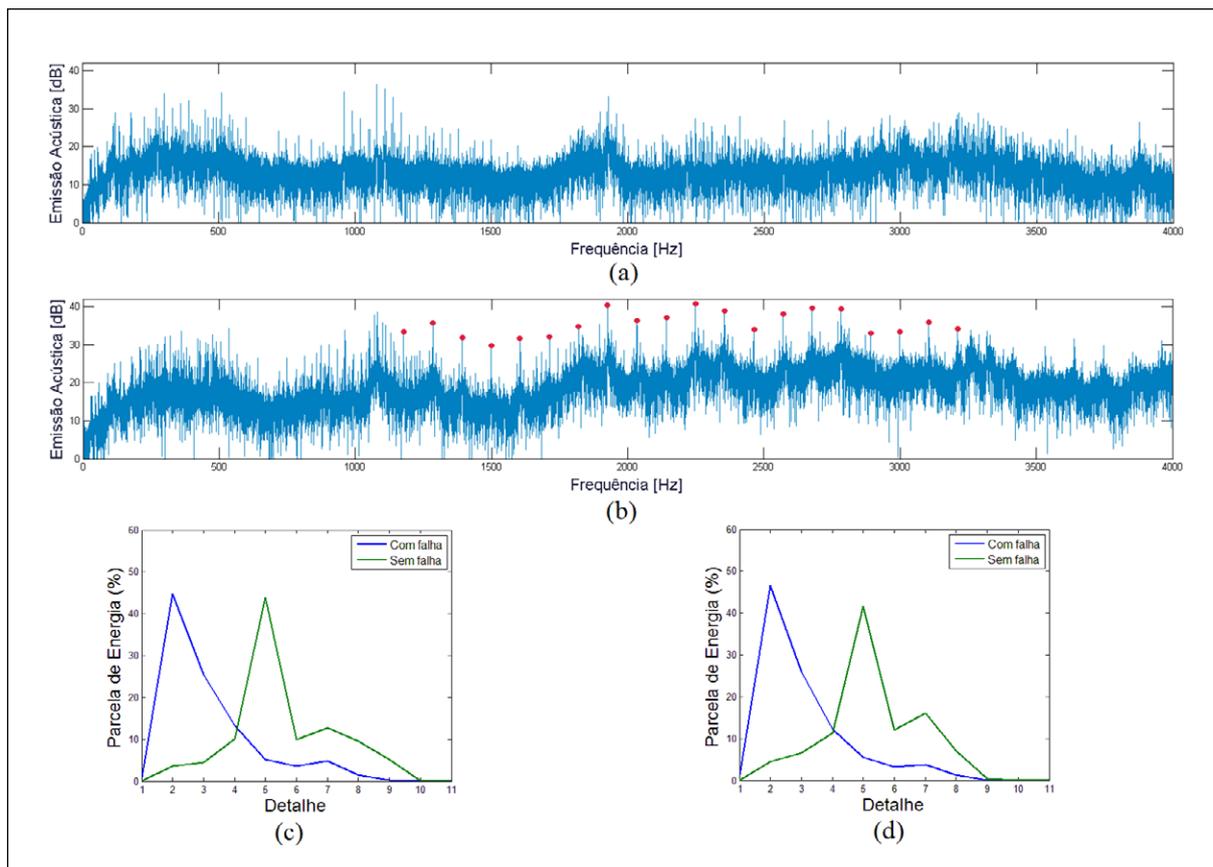
Este tópico apresenta os ensaios de falha na pista externa do rolamento do motor, realizados na bancada de testes. Os experimentos dispõem de duas condições de falha, acionamentos em vazio, com cargas estáticas e dinâmicas.

4.1 Emissão Acústica – FFT e DWT

Na detecção da falha na pista externa do rolamento por emissão acústica, foram realizados ensaios com o motor acionado em vazio (Figura 4, na página seguinte), e com 25 Nm de carga, ou seja, 122,5% da carga nominal (Figura 5, na página seguinte).

Na Figura 4b, é possível identificar os picos espaçados de 107 Hz entre as frequências de 1000 e 3500 Hz, indicando uma possível falha na pista externa do rolamento, tendo em vista a frequência de falha em torno 107 Hz. Observando as Figuras 4c e 4d, percebe-se uma nítida alteração na distribuição de energia do motor, com e sem falha no rolamento, com uma diferença em torno de 40% da energia do detalhe D2, para o motor com e sem carga. Quando o sistema mecânico é acoplado ao motor e aplicando-se uma carga em torno de 25 Nm no eixo, não são observadas alterações nos níveis de energia nos detalhes sob presença de falha, do mesmo modo que os picos característicos de falha nos rolamentos também não são visíveis pela análise espectral.

Figura 4 – Detecção de falha na pista externa do rolamento pela análise da emissão acústica: (a) FFT da emissão acústica sem falha, (b) FFT da emissão acústica com falha, (c) e (d) Energia dos detalhes para duas aquisições - motor em vazio

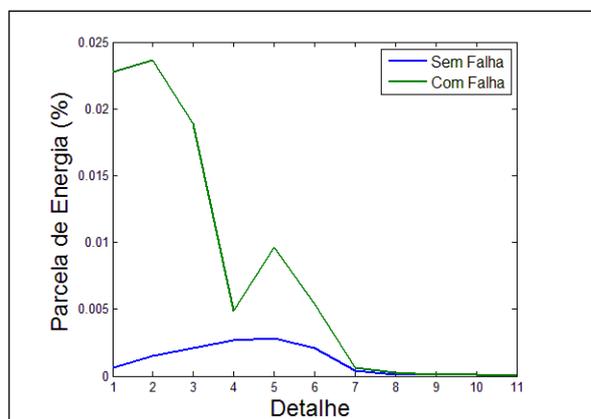


Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2 Vibração Mecânica – FFT e DWT

Sob a presença de carga, houve uma alteração nítida na energia dos detalhes do sinal, com e sem carga, conforme pode ser visto na Figura 5, embora com baixa amplitude. As análises espectrais nesse caso não são conclusivas, pois não foram encontrados os picos característicos sob a presença de carga, mesmo com a aplicação de técnicas de filtragem de banda do sinal na faixa analisada.

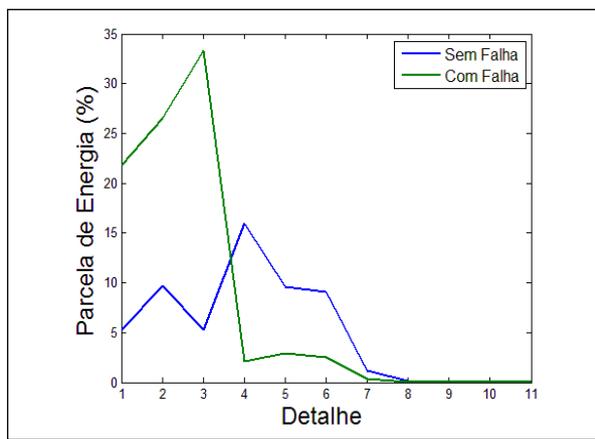
Figura 5 – Detecção pela análise da vibração utilizando a energia dos detalhes com carga de 25 Nm



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 6, percebe-se uma nítida mudança na distribuição de energia do sinal, com e sem falha, quando o sistema é acionado sem carga. Da mesma forma da análise de emissão acústica, na análise por vibração mecânica foram observados os picos característicos das falhas espaçados em 107 Hz, como previsto (cf. Figura 7). Neste caso, esses picos foram detectados entre 1500 Hz e 2500 Hz.

Figura 6 – Detecção pela análise da vibração, utilizando-se a energia dos detalhes sem carga



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tanto na análise do som quanto na análise de vibração mecânica, percebe-se que o motor sem carga, com o eixo livre, torna o processo de detecção da falha mais fácil. O acoplamento do motor a uma carga estática, com um alinhamento correto e rolamento defeituoso, torna o processo de identificação da falha mais difícil. Para o referido projeto, as duas técnicas (análise do som e análise de vibração mecânica) são mais apropriadas em situações onde o eixo se encontra em balanço, como o caso de exaustores industriais.

4.3 Análise pela Eficiência Energética

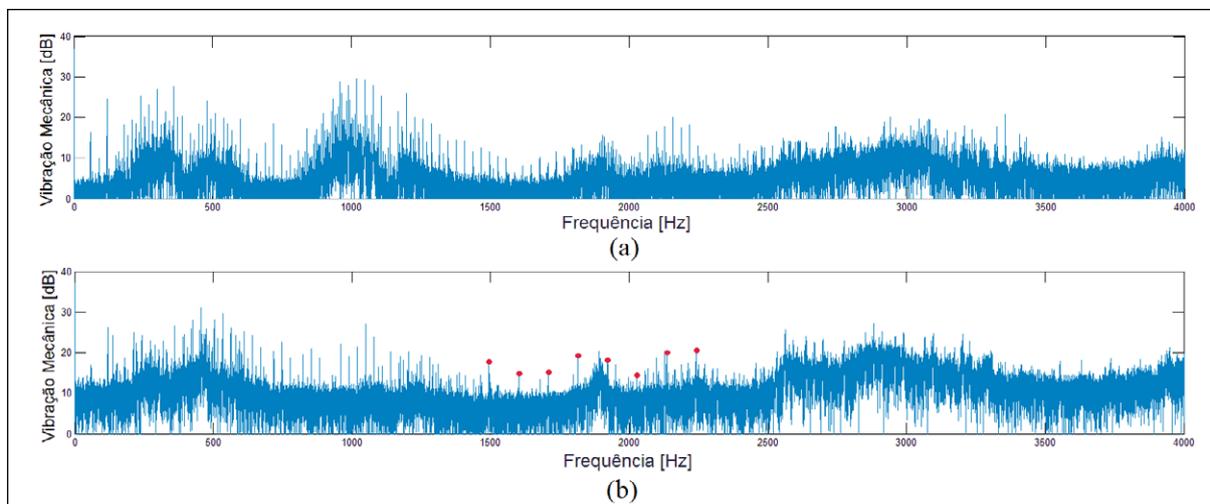
No que diz respeito ao efeito da falha na eficiência energética, pode-se observar, conforme Figura 8 (na página seguinte), que houve uma sensível variação da eficiência do motor na presença da falha, quando funcionando à plena carga (100%) e na eficiência máxima, situação que ocorre em aproximadamente 62,0% da carga nominal da máquina. A Tabela 4 apresenta os resultados de eficiência energética obtidos na presença e na ausência de carga.

Tabela 4 – Efeito da falha na eficiência energética

Pista Externa \ Eficiência Energética	Eficiência Energética	Eficiência máxima	Eficiência a plena carga
Sem Falha		89,86	88,64
Com Falha		89,73	88,56

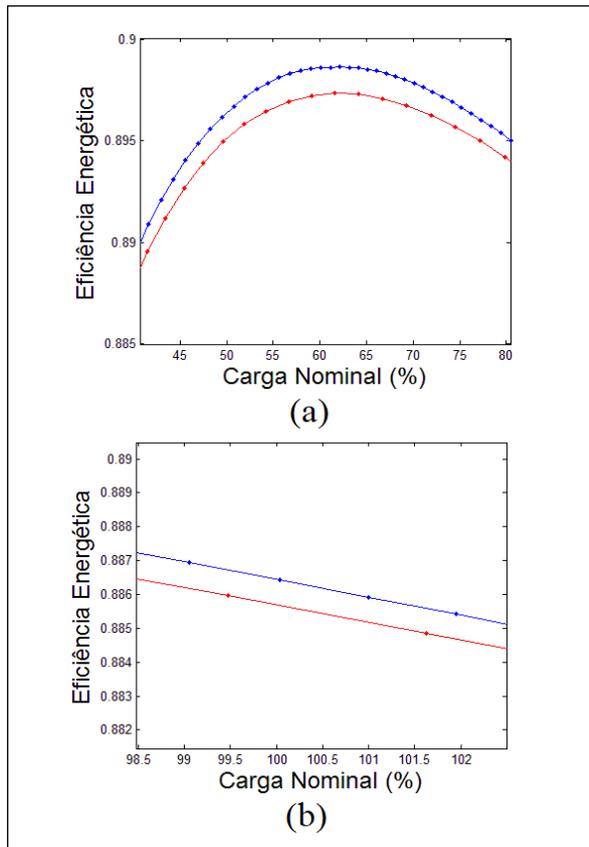
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 7 – Detecção de falha na pista externa do rolamento pela análise da vibração mecânica: (a) FFT da vibração mecânica sem falha e (b) FFT da vibração mecânica com falha - motor em vazio



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 8 – Efeito da falha na pista externa 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 as técnicas de diagnóstico de falhas em rolamentos de motores de indução trifásicos. As técnicas associadas à análise de sinais de mecânicos (vibração e emissão acústica) e elétricos (eficiência energética) foram verificadas em experimentos com os rolamentos do motor danificados em suas pistas externas. Foi montado um aparato experimental e uma estrutura de métodos que permitiram confrontar as diferentes técnicas de sensoriamento sempre sob o ponto de vista de análise espectral e Wavelet.

Nesta pesquisa, a análise espectral associada à análise DWT para sinais de vibração apresentou boa sensibilidade com o acionamento do motor em vazio. Diversos picos foram detectados entre 1500 Hz e 2500 Hz. Para o motor acionado com carga, apenas a DWT obteve êxito na detecção. Neste sentido, é possível concluir que sinais de vibração processados

pela DWT é uma técnica eficaz na detecção de rolamentos nas condições propostas. Assim como nos sinais de vibração, a emissão acústica processada pela FFT e DWT apresentou excelente sensibilidade em vazio, com picos espaçados de 107 Hz entre as frequências de 1000 e 3500 Hz. Não houve, entretanto, sensibilidade no acionamento com carga. Na eficiência energética, houve uma sensível variação da eficiência do motor, quando funcionando à plena carga e na eficiência máxima.

Na busca por uma solução alternativa e não invasiva à análise por sinais de vibrações, é possível utilizar a estratégia de um sistema híbrido, utilizando-se a emissão acústica (FFT e ou DWT) quando o motor está em vazio e a eficiência energética para o motor com carga radial. Esta estratégia seria útil quando ocorresse a impossibilidade da instalação do sensor vibracional (devido a agentes contaminantes, risco de segurança ao sensor ou instalador, locais inacessíveis, entre outros fatores), quando o sinal não pudesse ser captado com clareza, ou ainda quando houvesse dificuldades para a distinção de efeitos diante de várias fontes de vibrações.

Havendo a necessidade de uma estratégia redundante, com o objetivo de aumentar a confiabilidade da análise, é possível cruzar os dados da vibração (DWT) com a emissão acústica (FFT e ou DWT) para o acionamento em vazio, ou da vibração com a eficiência energética para o acionamento com carga. Essa estratégia seria útil nos casos em que os custos da intervenção ou a perda de produtividade justificasse tal hibridismo.

As alterações ocasionadas pelas falhas nos sinais avaliados pela DWT proporcionaram padrões estáveis a partir de detalhes wavelets específicos. Uma vantagem dessa estratégia foi a redução da quantidade de dados a serem analisados, uma vez que são avaliadas apenas as bandas de frequências que são alteradas de forma significativa. Essa redução é importante para implementação da técnica por meio de sistemas embarcados para aplicações industriais.

REFERÊNCIAS

- ADISSI, M. O. **Sistema para Monitoramento de Eficiência Energética de Motores de Indução Trifásicos em Ambiente Industrial**. 158f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa – PB, Brasil, 2015.

- ARABACI, H.; BILGIN, O. Analysis of Rotor Faults Effects on Submersible Induction Motor Efficiency. In: Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science, **Proceedings...** WCECS 2013, Vol. I. 2013.
- AZEEZ, A. A. *et al.* Fault Detection of Rolling Element Bearings using Advanced Signal Processing Technique, **Proceedings...** 2020 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET), Dubai, United Arab Emirates, 2020, p. 1-6.
- 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, pp. 341-346.
- BONALDI, E. L. **Diagnóstico Preditivo de Avarias em Motores de Indução Trifásicos com MCSA e Teoria de Conjuntos Aproximados**. 185f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Brasil, 2005.
- CHEN, X. *et al.* Bearing Corrosion Failure Diagnosis of Doubly Fed Induction Generator in Wind Turbines Based on Stator Current Analysis, **Proceedings...** IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 67, no. 5, pp. 3419-3430, May 2020.
- DUAN, J. *et al.* Lubrication Condition Monitoring and Evaluation of Rolling Bearing Based on Acoustic Emission, **Proceedings...** IEEE International Conference on Prognostics and Health Management (ICPHM), Seattle, WA, 2018, p. 1-7, Doi: 10.1109/ICPHM.2018.8448881.
- FROSINI, L.; BASSI, E. Stator Current and Motor Efficiency as Indicators for Different Types of Bearing Faults in Induction Motors. **Proceedings...** IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 57, 2010, No. 1, p. 244-251.
- HERNÁNDEZ, J. C. *et al.* Comparison of Different Wavelet Families for Broken Bar Detection in Induction Motors. *In: Proceedings...* IEEE – International Conference on Industrial Technology, 2015, Seville. Seville: ICIT, 2015, p. 3220-3225.
- HSU, J. S. *et al.* Nature and Assessments of Torque Ripples of Permanent-Magnet Adjustable-Speed Motors. **Proceedings...** Thirtieth IAS Annual Meeting, IAS '95., Vol. 3, 1995, p. 2696-2702.
- LIU, H.; XIANG, J. Multivariate Wavelet Denoising Method Based on Synchrosqueezing for Rolling Element Bearing Fault Diagnosis, **Proceedings...** 2018 International Conference on Sensing, Diagnostics, Prognostics, and Control (SDPC), Xi'an, China, 2018, p. 372-375.
- OLIVEIRA, E.A.; SENA, A. P. C.; FERNANDES, L.H. Detecção de Avarias em Rolamentos de Motores de Indução Trifásicos Utilizando Sinais de Emissão Acústica e Corrente Elétrica. In: II Congresso Internacional de Gestão E Tecnologias. **Proceedings...** João Pessoa: II COINTER PDVGT, 2018.
- OLIVEIRA, H. M. **Análise de Sinais para Engenheiros: Uma Abordagem via Wavelets**. 1ª ed. Brasport, 2007. p. 268.
- SANTIAGO, D. F. A.; PEDERIVA, R. Feature Extraction and Fault Detection of Rootating Machinery Based on Wavelet Packet Transform. **Proceedings...** International Symposium on Dynamic Problems of Mechanics. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas – ABCM, 2005, p. 1-10.
- SAUFI, S.R. *et al.* Low-Speed Bearing Fault Diagnosis Based on ArSSAE Model Using Acoustic Emission and Vibration Signals, **Proceedings...** IEEE Access, vol. 7, p. 46885-46897, 2019.
- SENA, A.P.C. **Diagnóstico de Avarias em Transmissão por Engrenagens Baseado na Corrente do Motor de Indução e Entropia Wavelet**. 114f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa – PB, Brasil, 2015.
- SOBRINHO, C. A. N. **Estudo Comparativo de Técnicas para Diagnóstico de Falhas em Motores de Indução Trifásicos**. 139f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa – PB, Brasil, 2015.
- VITEK, O. *et al.* Detection of Eccentricity and Bearings Fault using Stray Flux Monitoring. *In: Proceedings...* IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics & Drives. Bologna: SDEMPED, 2011, p. 456-461.
- WANG, Z. *et al.* Fault Diagnosis of a Rolling Bearing Using Wavelet Packet Denoising and Random Forests, **Proceedings...** IEEE Sensors Journal, vol. 17, no. 17, p. 5581-5588, 1 Sept.1, 2017, Doi: 10.1109/JSEN.2017.2726011.

WEICKER, M. *et al.* Influence Of System Parameters In Variable Speed AC-Induction Motor Drives on Parasitic Electric Bearing Currents, **Proceedings...** 22nd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'20 ECCE Europe), Lyon, France, 2020, p. 1-10.