II CONGRESSO INTERNACIONAL DE **GESTÃO E TECNOLOGIAS** COINTER - PDVGT 2018

DETECÇÃO DE AVARIAS EM ROLAMENTOS DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS UTILIZANDO SINAIS DE EMISSÃO ACÚSTICA E CORRENTE ELÉTRICA

DETECTION OF TROUBLES IN THREE-PHASE INDUCTION MOTORS USING ACOUSTIC EMISSION AND ELECTRICAL CURRENT SIGNS

Apresentação: Comunicação Oral

Eduardo Ataíde de Oliveira¹; Alexander P.C. de Sena²; Lucas Henrique Torres Fernandes³

DOI: <https://doi.org/10.31692/2596-0857.ICOINTERPDVGT.2018.00005>

Resumo

Neste trabalho foi proposta uma análise que utiliza dados coletados por sensores de corrente elétrica e emissão acústica para o diagnóstico de falhas incipientes em pistas externas de rolamentos de um motor de indução trifásicos (MIT), buscando-se uma solução alternativa e não invasiva a análise por sinais de vibrações. A análise espectral de detalhes wavelet proporcionou uma baixa visualização dos efeitos da avaria nos sinais de corrente nos acionamentos direto da rede, e o ruído proveniente dos acionamentos com inversor de frequência comprometeu a confiabilidade de um diagnóstico utilizando este método nestes sinais. A aplicabilidade da análise espectral nos sinais de emissão acústica possibilitou uma clara visualização da avaria nos acionamentos direto da rede, mas em baixa rotação tornou-se difícil esta visualização. O cálculo da entropia para os acionamentos direto da rede ofereceu uma análise confiável para diferenciação entre as condições com falha e sem falha para ambos os sinais. Os resultados da energia wavelet para os acionamentos por inversor apresentaram ruídos no sinal de corrente elétrica, prejudicando um diagnóstico por esta variável. Em geral, a emissão acústica apresentou melhores visualizações da avaria quando comparada a corrente em todos os acionamentos e métodos de análise. Não foram perceptíveis os efeitos da carga nos resultados. O diagnóstico fuzzy foi concebido apenas para os ensaios com acionamento direto da rede (todas as condições de carga) devido ao comportamento apropriado das variáveis adquiridas quando aplicado o cálculo da entropia wavelet.

Palavras-Chave: análise de falhas, rolamentos, análise espectral, entropia wavelet.

Abstract

This work proposes an analysis that uses data collected by electric current and acoustic emission sensors for the diagnosis of incipient faults in external tracks of three-phase

¹ Engenharia Mecânica, Instituto Federal de Pernambuco, Eduardo_ataide@hotmail.com

² Doutor, Instituto Federal de Pernambuco, alexander.sena@caruaru.ifpe.edu.br

induction motors (TIM), seeking an alternative and non-invasive analysis by signs of vibration. The spectral analysis of wavelet details provided a low visualization of the effects of the fault on the current signals in the direct drives of the network, and the noise from the drives with frequency inverter compromised the reliability of a diagnosis using this method in these signals. The applicability of the spectral analysis in the acoustic emission signals allowed a clear visualization of the fault in the direct drives of the electric network, but in low rotation this visualization was difficult. The calculation of the entropy for the direct drives of the electric network offered a reliable analysis for differentiation between the fault conditions and without failure for both signals. The results of the wavelet energy for the inverter drives presented noises in the electric current signal, damaging a diagnosis by this variable. In general, the acoustic emission presented better visualizations of the fault when compared to the current in all the drives and methods of analysis. The effects of loading on results were not perceptible. The fuzzy diagnosis was designed only for the tests with direct drive of the electrical network (all load conditions) due to the appropriate behavior of the acquired variables when applied the calculation of the wavelet entropy.

Keywords: fault analysis, bearings, spectral analysis, wavelet entropy.

Introdução

Os sinais de vibração processados pela transformada de Fourier e/ou Wavelet tem sido a metodologia mais utilizada para predição de avarias em elementos mecânicos (Passos et al., 2010). Entretanto, o local de instalação do acelerômetro pode ocasionar a impossibilidade da captação do sinal com clareza, dificuldades para a distinção de efeitos quando há várias fontes de vibrações. Também pode ocorrer a impossibilidade da instalação do sensor (loais inacessíveis, agentes contaminantes ao sensor, risco de segurança ao sensor ou instalador, dentre outros fatores). Uma estratégia que surgiu como alternativa a análise vibracional explora a capacidade intrínseca de motores em atuar como transdutores. Ultimamente a detecção de avarias em rolamentos utilizando a análise de assinatura de corrente tem sido proposta por relevantes pesquisadores, tais como: Trajin et al. (2008); Saadaoui e Jelassi (2011); Vitek (2011) e Sobrinho (2015). Um dos métodos que mais ganhou espaço nas últimas décadas é a análise de emissão acústica, devido à popularização e redução dos custos dos equipamentos de medição (Choudhury e Tandon, 2000). Sinais acústicos têm sido utilizados com objetivo de aumentar a confiabilidade do sistema de análise, devido ao fato das alterações audíveis serem identificadas mais precocemente. Os trabalhos de Passos et. al. (2010) e Sobrinho (2015) representam relevantes resultados utilizando a emissão acústica para analisar avarias em rolamentos. Em relação ao diagnóstico, tem sido crescente a proposição de sistemas especialistas baseados em inteligência artificial (Trajin et al., 2008). Os sistemas de inferência Fuzzy são utilizados onde existem incertezas na medição, ou quando não se

possui um modelo matemático bem definido para estimação do comportamento do sistema a ser analisado.

O objetivo geral deste trabalho é o desenvolvimento de uma estratégia para detecção de avarias distribuídas (ocasionadas pela lubrificação inadequada) nas pistas externas dos rolamentos de um MIT, adquirindo-se sinais de corrente elétrica e emissão acústica como fontes alternativas aos sinais de vibração.

Fundamentação Teórica

O processo de análise espectral se inicia com a aquisição do sinal a ser avaliado, no domínio do tempo, sendo este transformado para o domínio da frequência geralmente aplicando-se a Transformada de Fourier. Considerando-se N amostras do sinal no domínio do tempo denotadas $s(k)$, a Transformada Discreta de Fourier (DFT, do inglês *Discrete Fourier Transform*) é dada por um conjunto de N amostras do sinal no domínio da frequência denotadas por $S(u)$ e definidas pela Eq.(1).

$$S(u) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} s(k) e^{-j \frac{2\pi uk}{N}} \quad (1)$$

Embora o espectro de um sinal não estacionário possa ser calculado da forma usual por Fourier, os resultados informam apenas sobre a composição média das frequências, calculadas considerando todo o tempo de duração do sinal (comportamento global médio). Desta 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, 1994). 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 e Pederiva, 2005). A análise por wavelet é do tipo “local em tempo-frequência”, com resolução inversamente proporcional entre tempo e frequência (Santiago e Pederiva, 2005).

Na decomposição de wavelet packet (WPT), os coeficientes de detalhes passam a ser divididos em coeficientes de aproximação e detalhes, decompondo o sinal em forma de árvore binária (Crovato, 2004). O cálculo dos coeficientes da WPT da Eq. (2) é a sequência resultante do produto interno de um sinal $s(t)$ com as funções de wavelet packet.

$$\lambda_{mf}(n) = \left\langle s, w_{mf} \right\rangle = 2^{-m/2} \sum_n s(t) w_f(2^{-m}t - n), f \geq 0 \quad (2)$$

Onde: $\lambda_{mf}(n)$ são os coeficientes da expansão de $s(t)$ nas funções de wavelet packet; $w_{mf}(t)$ são as funções de wavelet packet básicas, f é o índice de frequência, t é o tempo, m o coeficiente de escala e n o coeficiente de translação.

As funções transladadas, dilatadas e normalizadas wavelet packet são obtidas pela Eq. (3).

$$w_{mf}(t) = 2^{-m/2} w_f(2^{-m}t - n) \quad (3)$$

A entropia está relacionada com o grau de desordem de um sistema. Quanto maior o grau de entropia maior também será a dispersão da energia num processo. Métodos baseados em entropia permitem a comparação entre propriedades do sistema em termos numéricos, por meio de uma distribuição de probabilidades, uma vez que a entropia pode ser utilizada como uma medida de dispersão. O espectro wavelet de energia na escala m é definido pela Eq. (4).

$$E_{mf} = \left| \lambda_{mf}(n) \right|^2 \quad (4)$$

Portanto o espectro wavelet de energia para uma determinada janela de tempo na escala m , pode ser calculado conforme a Eq. (5), e a energia total pela Eq.(6).

$$E_m = \sum_n E_{mf} \quad (5)$$

$$E = \sum_m E_m \quad (6)$$

O valor de energia relativa, que corresponde à energia de cada wavelet packet é dado pela Eq. (7). Em que $\sum_m p_m = 1$.

$$p_m = \frac{E_m}{E} \quad (7)$$

Define-se a entropia total como a soma da entropia computada sobre toda a extensão das frequências.

$$WPE_{tot} = \sum_m WPE_m \quad (8)$$

Em que $WPE_m = -p_m \ln(p_m)$

Dependendo do fenômeno a ser estudado, haverá a necessidade de harmonização de escala por meio da normalização dos valores da entropia.

$$(WPE_m)_N = \frac{WPE_m - WPE_{m_{min}}}{WPE_{m_{max}} - WPE_{m_{min}}} \quad (9)$$

Onde: WPE_m é a entropia medida em determinada condição, $WPE_{m_{min}}$ é a entropia mínima medida e $WPE_{m_{max}}$ é a entropia máxima medida.

Metodologia

A bancada experimental apresentada na Fig. (1) é composta por MIT de 0,5 CV, tensão nominal de 220/380VCA - 60 Hz, 4 polos, 1.720 RPM. A carga (medida por uma célula de carga) é simulada por freio eletrodinâmico por correntes de Foucault. O conjunto pode ser acionado por partida direta ou por meio de Inversor de frequência WEG® CFW-08. O modelo dos rolamentos utilizados no motor é NSK 6203-Z, que são específicos para motores elétricos. As correntes serão obtidas a partir de sensores lineares de efeito Hall Allegro ACS712ELC-30A com sensibilidade de 66mV/A.

Figura 1. Bancada experimental. Fonte: Autoria própria.

Para a análise acústica será utilizado um modulo de som KY-038 que possui um microfone condensador. Para o condicionamento dos sinais dos sensores às especificações do módulo de

aquisição, será necessária à amplificação utilizando amplificadores operacionais LM358. O conversor A/D utilizado é o módulo de aquisição de dados (DAQ), NI USB-6289 que possui 18 bits de resolução, podendo trabalhar com uma taxa de amostragem de até 625ks/s (amostras por segundo). A partir dos sinais obtidos do conversor A/D são realizadas as análises de avarias por um algoritmo em LabView®. O sistema de monitoramento será composto pelas seguintes etapas, de acordo com a Fig. (2).

Figura 2. Etapas do sistema de monitoramento proposto. Fonte: Autoria própria.

Resultados e Discussão

Durante os experimentos, os sinais de corrente e emissão acústica foram amostrados com 30 kHz, e armazenados com 60.000 pontos. Todas as amostras (cinco para cada ensaio) foram decompostas pela WPT, analisando-se um detalhe de packet referente à região frequencial da falha, assim como apresentado na Fig.(3). A WPT, com base na décima segunda Daubechies (db12) foi utilizada a fim de decompor os sinais de emissão acústica e corrente elétrica em oito níveis. As magnitudes das energias dos detalhes wavelet de interesse foram analisadas estatisticamente pela média e desvio padrão das cinco amostras estudadas.

Figura 3. Decomposição WPT utilizada para processamento das amostras. Fonte: Autoria própria.

Na análise espectral, a frequência onde deverá aparecer o pico da falha coincidirá com as frequências de rotação da pista externa Tab.(1). Ou seja, seriam frequências (uma para emissão acústica e outra para corrente elétrica) em que uma esfera colide no ponto da falha.

Tabela 1. Sinal utilizado vs. frequência de falha no rolamento para avaria na pista externa. Fonte: Autoria própria.

Sinal	Fórmula
Corrente Elétrica	$f_{SC} = f_e \pm kF_o $
Emissão Acústica	$F_o = k \left[\frac{N_B}{2} f_r \left(1 - \frac{D_b \cos(\beta)}{D_c} \right) \right]$

Legenda: f_{sc} =componente espectral da corrente elétrica referente às anomalias no rolamento [Hz]; f_e =frequência da rede elétrica; k =número inteiro positivo (harmônicas); 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 (rotação mecânica) [Hz]; D_b =diâmetro da esfera; β =ângulo de contato da esfera; D_c =diâmetro primitivo.

A Fig. (4) apresenta a forma que a avaria na pista externa foi inserida no rolamento, o furo na pista externa, e o procedimento para retirar o rolamento do eixo do motor.

Figura 4. Falha na pista externa do rolamento. Fonte: Autoria própria.

Os rolamentos destinados a admitir cargas predominantemente radiais são conhecidos por rolamentos radiais e trazem um ângulo de contato $\beta \leq 45^\circ$ (para o rolamento utilizado, o ângulo é zero). A partir dos dados do catálogo do fabricante para o rolamento utilizado, foi possível calcular por meio da Tab.(2) as seguintes frequências (Hz) para identificação da avaria.

Tabela 2. Conjunto de frequências para análise da avaria na pista externa. Fonte: Autoria própria.

		Rede			Inversor de Frequência								
		60 Hz			60Hz			40Hz			20Hz		
Carga	Frequencia	EA	CE		EA	CE		EA	CE		EA	CE	
Vazio	fr	29,9	-	-	29,7	-	-	19,8	-	-	9,7	-	-
	Fo/fsc	97,7	37,7	157,7	97,0	37,0	157,0	64,7	24,7	104,7	31,7	11,7	51,7
	2	195,3	135,3	255,3	194,0	134,0	254,0	129,4	89,4	169,4	63,4	43,4	83,4
	3	293,0	233,0	353,0	291,1	231,1	351,1	194,0	154,0	234,0	95,1	75,1	115,1
	4	390,7	-	-	388,1	-	-	258,7	-	-	126,7	-	-
	5	488,4	-	-	485,1	-	-	323,4	-	-	158,4	-	-
	6	586,0	-	-	582,1	-	-	388,1	-	-	190,1	-	-
	7	683,7	-	-	679,1	-	-	452,8	-	-	221,8	-	-
	8	781,4	-	-	776,2	-	-	517,4	-	-	253,5	-	-
	9	879,1	-	-	873,2	-	-	582,1	-	-	285,2	-	-
10	976,7	-	-	970,2	-	-	646,8	-	-	316,9	-	-	
50%	fr	29,2	-	-	28,9	-	-	-	-	-	-	-	-
	Fo	95,4	35,4	155,4	94,4	34,4	154,4	-	-	-	-	-	-
	2	190,8	130,8	250,8	188,8	128,8	248,8	-	-	-	-	-	-
	3	286,2	226,2	346,2	283,2	223,2	343,2	-	-	-	-	-	-
	4	381,5	-	-	377,6	-	-	-	-	-	-	-	-
	5	476,9	-	-	472,0	-	-	-	-	-	-	-	-
	6	572,3	-	-	566,4	-	-	-	-	-	-	-	-
	7	667,7	-	-	660,8	-	-	-	-	-	-	-	-
	8	763,1	-	-	755,3	-	-	-	-	-	-	-	-
	9	858,5	-	-	849,7	-	-	-	-	-	-	-	-
10	953,9	-	-	944,1	-	-	-	-	-	-	-	-	
Nominal	fr	27,6	-	-	27,5	-	-	19,3	-	-	9,4	-	-
	Fo	90,2	30,2	150,2	89,8	29,8	149,8	63,0	23,0	103,0	30,7	10,7	50,7
	2	180,3	120,3	240,3	179,7	119,7	239,7	126,1	86,1	166,1	61,4	41,4	81,4
	3	270,5	210,5	330,5	269,5	209,5	329,5	189,1	149,1	229,1	92,1	72,1	112,1
	4	360,6	-	-	359,3	-	-	252,2	-	-	122,8	-	-
	5	450,8	-	-	449,2	-	-	315,2	-	-	153,5	-	-
	6	541,0	-	-	539,0	-	-	378,3	-	-	184,2	-	-
	7	631,1	-	-	628,8	-	-	441,3	-	-	214,9	-	-
	8	721,3	-	-	718,7	-	-	504,4	-	-	245,7	-	-
	9	811,4	-	-	808,5	-	-	567,4	-	-	276,4	-	-
10	901,6	-	-	898,3	-	-	630,5	-	-	307,1	-	-	

Legenda: F_o =frequência de falha da pista externa [Hz]; f_r =frequência de rotação do rotor (rotação mecânica) [Hz]; f_{sc} =componente espectral da corrente elétrica referente às anomalias no rolamento [Hz].

Obs¹.: Os valores 2 a 10 na segunda coluna são harmônicas de F_o ou f_{sc} .

Obs².: A frequência de rotação é alterada acompanhando as condições de funcionamento em relação a rotação e a adição de carga (aumenta o escorregamento), tendo por consequência a alteração do conjunto de frequências a serem observadas, tornando a análise espectral onerosa. Entretanto, a faixa de frequências do detalhe wavelet continua válida.

Para os acionamentos diretos da rede foi possível identificar notoriamente a avaria por meio do aumento de diversas harmônicas da frequência de falhas nos sinais de emissão acústica conforme a análise espectral apresentada na Fig.(5), entretanto, a faixa de frequencias (detalhe) que proporcionou os melhores valores de entropia wavelet compreenderam a 9ª hamônica (811,4Hz). Em rotações abaixo de 60Hz a emissão acústica apresentou uma diminuição da sensibilidade à avaria, dificultando a visualização nos espectros. Não foi possível uma identificação espectral da avaria nos sinais de corrente elétrica devido à baixa sensibilidade desta variável e ao ruído gerado na aquisição, principalmente quando a máquina estava sendo acionada por inversor de frequência.

Figura 5. Conjunto de frequencias na análise espectral (espectro sem avaria em azul e com avaria em verde).

Fonte: Autoria própria.

A aplicação do cálculo da energia de detalhes wavelet proporcionou uma boa visualização dos efeitos da avaria para os sinais de emissão acústica, entretanto nos sinais de corrente a sensibilidade continuou baixa, apresentando variações muito pequenas entre as condições sem e com avaria. A emissão acústica apesar de ter apresentado alterações em todas as condições, a sensibilidade foi diminuindo com a diminuição da rotação. Já a corrente elétrica só apresentou resultados significativos nos acionamentos a 60Hz. Devido às fortes variações nos valores de energia entre as diferentes condições, houve a necessidade de harmonização de escala por meio da normalização dos valores. A Tab.(3) apresenta as variações na energia dos detalhes wavelet que caracterizam a avaria na pista externa do rolamento, em relação à condição sem avaria. É possível observar que a diminuição da rotação provoca a perda de sensibilidade da corrente elétrica em 40Hz e 20Hz, bem como os acionamentos com inversor de frequência prejudicam as análises neste sinal. Os detalhes wavelet utilizados para análise dos sinais de emissão acústica, de acordo com as frequências em negrito na Tab.(2) e a decomposição de packet da Fig.(3) foram: detalhe $\lambda_{8,15}$ para 60Hz (inversor e rede), detalhe $\lambda_{8,3}$ para 40Hz e detalhe $\lambda_{8,1}$ para 20Hz.

Tabela 3. Variações da energia dos detalhes wavelet para os ensaios realizados. Fonte: Autoria própria.

Carga	Condição	Rede				Inversor de Frequência					
		60 Hz				60Hz		40Hz		20Hz	
		CE	DP	EA	DP	CE	EA	CE	EA	CE	EA
Vazio	Sem avaria	0,682	0,342	0,367	0,303	0,891	0,000	-	0,000	-	0,001
	Com avaria	0,959	0,040	0,874	0,123	1,000	0,167	-	0,730	-	0,461
50%	Sem avaria	0,631	0,305	0,394	0,299	0,850	0,305	X	X	X	X
	Com avaria	0,996	0,003	0,849	0,149	0,940	0,730	X	X	X	X
Nominal	Sem avaria	0,352	0,300	0,151	0,101	-	0,343	-	0,376	-	0,072
	Com avaria	0,905	0,093	0,992	0,007	-	1,000	-	0,998	-	0,999

Legenda: (X) ensaios não realizados; (-) ensaios com resultados sem êxito; (DP) Desvio Padrão.

Obs.: O desvio padrão só foi apresentado na tabela para o caso do acionamento direto da rede, pois estes resultados foram os únicos utilizados para o diagnóstico fuzzy.

A interpretação da condição de funcionamento de um determinado equipamento pode ser baseada em uma análise qualitativa, de interpretação heurística. O modo heurístico representa uma grande solução quando os parâmetros a serem considerados são incertos, desconhecidos, variantes no tempo ou quando o espaço de busca é grande. Neste sentido, esse método é similar ao experimental de se construir uma tabela de entradas e saídas, onde para cada linha da tabela, haverá uma relação entre estas variáveis, de forma que, ao invés de expressões numéricas, será possível a utilização de variáveis linguísticas para descrever tal relação. O diagnóstico Fuzzy foi montado apenas nas condições do motor em vazio, meia carga (50%) e com carga nominal para os acionamentos diretos da rede, onde os resultados da detecção pela WPT se apresentaram de forma confiável tanto para corrente elétrica, quanto para emissão acústica. Para estes acionamentos foi utilizada uma base de regras utilizando seis entradas: CECR (Corrente Elétrica com Carga), CEMR (Corrente Elétrica com Meia carga), CEVR (Corrente Elétrica em Vazio), EACR (Emissão Acústica com Carga), EAMR (Emissão Acústica com Meia carga) e EAVR (Emissão Acústica em Vazio). A Fig.(6) apresenta as funções de pertinência das variáveis de entrada baseadas nos valores das entropias wavelet (em Nats) com seus respectivos termos linguísticos. SA (sinal sem avaria) e CA (sinal com avaria).

Figura 6. Funções de pertinência para o acionamento direto da rede e seus respectivos termos linguísticos. Fonte:

Autoria própria.

A base de regras utilizou 36 condições para cruzar as pertinências de entrada, conforme a Tab.(4). A base foi implementada no Fuzzy Logic Toolkit do Labview®.

Tabela 4. Base de regras para o diagnóstico com acionamento direto da rede. Fonte: Autoria própria.

	CONDICÃO	ANÁLISE ACÚSTICA					
		EACR		EAMR		EAVR	
		SA	CA	SA	CA	SA	CA
CORRENTE ELÉTRICA	CECR	SA	SA	IN	IN	IN	IN
		CA	IN	CA	IN	IN	IN
	CEMR	SA	IN	IN	SA	IN	IN
		CA	IN	IN	IN	CA	IN
	CEVR	SA	IN	IN	IN	IN	SA
		CA	IN	IN	IN	IN	CA

Para as funções de pertinência de uma saída única foram adotados os termos linguísticos: IN (resultado inconsistente), SA (sinal sem Avaria) e CA (sinal com avaria). A Fig.(7) apresenta as funções de pertinência da variável de saída DIAG, com seus respectivos termos linguísticos.

Figura 7. Funções de pertinência da saída e seus respectivos termos linguísticos. Fonte: Autoria própria.

Conclusões

Este trabalho propôs um sistema híbrido que utiliza dados coletados por sensores de corrente elétrica e emissão acústica para diagnosticar uma avaria na pista externa do rolamento frontal de um motor de indução trifásico, como solução alternativa a análise de vibração. Na fase de detecção estudou-se a sensibilidade dos sinais de corrente elétrica e emissão acústica a partir de uma variedade de ensaios alterando-se a carga imposta ao motor e a rotação da máquina (60Hz, 40Hz e 20Hz), concluindo-se que para o conjunto eletromecânico utilizado, a diminuição da rotação por meio do inversor de frequência provocou a perda de sensibilidade das variáveis. A análise espectral se apresentou de forma satisfatória nos acionamentos diretos da rede, mas foi bastante prejudicada devido ao efeito da falha ser mascarado pelo ruído advindos do inversor. A análise wavelet proporcionou uma melhor confiabilidade (comparada à análise espectral) na verificação dos sinais de emissão acústica, contudo baixa sensibilidade nos sinais de corrente. Em geral, a emissão acústica apresentou melhores visualizações da avaria quando comparada a corrente. Neste sentido, o diagnóstico Fuzzy foi montado apenas para o acionamento direto da rede (todas as condições de carga) devido à confiabilidade de ambos os sinais analisados pela WPT. O sistema fuzzy apresentou um comportamento coerente da avaria possibilitando um diagnostico confiável. Os resultados produzidos nesta pesquisa podem ser considerados satisfatórios, contudo, sugerem algumas melhorias pra trabalhos futuros, tais como:

aperfeiçoamento da relação entre a taxa de amostragem e os efeitos da avaria; maior número de amostras para cada condição estudada; método para filtragem eficiente de ruídos.

Referências

CHOUDHURY, A. e TANDON, N., Application of Acoustic Emission Technique for the Detection of Defects in Rolling Element Bearings. **Tribology International**, Vol.33, Issue 1, Jan. 2000, pp. 39-45.

CROVATO, C.D.P. (2004). Classificação de Sinais de Voz Utilizando a Transformada Wavelet Packet e Redes Neurais Artificiais. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

NEWLAND, D.E. (1994). Wavelet Analysis of Vibration, Part I: Theory. Journal of Vibrations and Acoustics, **Transaction of the ASME**, v.116.

PASSOS, A.G. et al. (2010). Análise de Sinais de Vibração e Emissão Acústica para a Detecção de Danos em Ensaios de Fadiga de contato do Tipo Esfera Contra Plano. In: **VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, Brasil.

SAADAOUI, W. e JELASSI, K. (2011). Induction Motor Bearing Damage Detection using Stator Current Analysis. **International Conference on Power Engineering**, Energy and Electrical Drives.

SANTIAGO, D.F.A. e PEDERIVA, R. (2005). Feature Extraction and Fault Detection of Rotating Machinery Based on Wavelet Packet Transform. In: **XI International Symposium on Dynamic Problems of Mechanics**, v.1., pp. 1-10.

SOBRINHO, C.A.N. (2015). Estudo e Desenvolvimento de Técnicas para Diagnóstico de Falhas em Motores de Indução Trifásicos com Vistas à Aplicação Industrial. **Tese** (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal da Paraíba, Brasil.

TRAJIN, B. et. al. (2008). Bearing Fault Indicator in Induction Machine Using Stator Current Spectral Analysis. **4th IET Conference on Power Electronics**, Machines and Drives. PEMD 2008, pp. 592 – 596.

VITEK, O. et. al. (2011). Detection of Eccentricity and Bearings Fault using Stray Flux Monitoring. **IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines**, Power Electronics & Drives (SDEMPED), pp. 456 – 461.