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

ESTRATÉGIA PARA DETECÇÃO DE DESGASTE SUPERFICIAL EM ENGRENAGENS CILINDRICAS BASEADO NA CORRENTE DO MOTOR DE INDUÇÃO E ENTROPIA WAVELET

STRATEGY FOR DETECTION OF SURFACE WEAR ON CYLINDRICAL GEARS BASED ON THE CURRENT OF INDUCTION MOTOR AND WAVELET ENTROPIA

Apresentação: Comunicação Oral

Eduardo Ataíde de Oliveira¹; Alexander P.C. de Sena²

DOI: <https://doi.org/10.31692/2596-0857.ICOINTERPDVGT.2018.00008>

Resumo

Neste trabalho é proposta uma estratégia para detecção e classificação do desgaste superficial em uma transmissão por engrenagens utilizando-se sinais de corrente medidos nos terminais de um motor de indução. A avaria de desgaste superficial se caracteriza por alterações em conjuntos específicos de frequências que estão relacionados com as rotações do motor e do engrenamento. A decomposição dos sinais a partir da Transformada Wavelet Packet (WPT) tornou possível a avaliação das bandas de frequências características da avaria pela análise espectral e pelo cálculo da entropia. Foram utilizados os padrões espectrais de vibração para constatação, comprovação e fundamentação dos efeitos causados pelas avarias nos espectros da corrente estatórica representada pela técnica da Abordagem Estendida do Vetor de Park (EPVA). A proposição de padrões entrópicos de detalhes wavelet se apresentou como fonte de informação confiável das limitações da análise espectral para a quantificação dos efeitos transitórios das avarias nos componentes de frequências do engrenamento nos sinais de EPVA.

Palavras-Chave: Engrenagens; desgaste superficial; motor de indução; Análise espectral; entropia wavelet.

Abstract

In this paper, a strategy is proposed for the detection and classification of surface wear in a gear transmission using current signals measured at the terminals of an induction motor. Surface wear failure is characterized by changes in specific sets of frequencies that are related to engine and gear rotations. The decomposition of the signals according to the Wavelet Packet Transform (WPT) allowed the evaluation of the distinctive frequency bands of the

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

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

defects through spectral analysis and entropy calculation. Spectral vibration patterns were used to verify, confirm and justify the effects caused by faults in the stator current spectra represented by the Extended Vector Approach (EPVA) technique. The proposition of entropic patterns of wavelet details presented itself as a reliable information source to the limitations of the spectral analysis to quantify the transient effects of the defects in the meshing frequency components in EPVA signals.

Keywords: Gears; surface wear; induction motor; Spectral analysis; wavelet entropy.

Introdução

O monitoramento de avarias em sistemas engrenados tem sido uma importante tarefa nas fases de projetos e manutenção destes dispositivos. São exemplos de sistemas engrenados: bombas ou compressores por engrenagens, extrusoras por rodas dentadas e caixas de transmissão (redução ou multiplicação). Uma avaria classificada como distribuída envolve os mecanismos de desgaste, e se apresenta em um considerável número de dentes.

A vibração é o método mais utilizado 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. A presença de diversas fontes oscilatórias originam complexas combinações de frequências e modulações. Também pode ocorrer a impossibilidade da instalação do sensor (locais inacessíveis, agentes contaminantes ao sensor, risco de segurança ao sensor ou instalador, dentre outros fatores).

Uma estratégia que surgiu como alternativa a análise vibracional para detecção de avarias em engrenagens, explora a capacidade intrínseca de motores e geradores elétricos de atuar como transdutores (SILVA, 2008). Uma avaria no engrenamento tal como um desgaste superficial, produz uma vibração torcional no conjugado de carga, provocando mudanças de interação no fluxo entre o estator e o rotor, resultando em alterações na corrente do estator (BENGHOZZI et al., 2012). A utilização da transformação de Park para o processamento de sinais de corrente, na técnica denominada Abordagem Estendida do Vetor de Park (EPVA), tem propiciado uma detecção precisa, boa visualização de padrões (SANTOS, 2008), e excelente repetibilidade nas medições sob uma mesma condição de funcionamento (ASSUNÇÃO, 2006). O ponto mais importante é o fato da técnica EPVA considerar as três fases de corrente, gerando um espectro mais significativo (BONALDI, 2005).

Fundamentação Teórica

Quando há um aumento na severidade de uma avaria distribuída, tal como um desgaste, observa-se um aumento do ruído na região do engrenamento, e um aumento nas magnitudes das frequências características do engrenamento, entretanto, não há relevantes alterações na região da alimentação. Kia, Henao e Capolino (2007) sugerem o conjunto de frequências que podem surgir devido a uma avaria na região da frequência do engrenamento na análise da corrente elétrica estatórica na Eq.(1).

$$f_{reg - eng} = f_{alim} \pm m_{bl} \cdot f_{pin} \pm n_{bl} \cdot f_{cor} \pm q_{bl} \cdot f_{eng} \quad (1)$$

Onde f_{alim} é a frequência de alimentação do motor em Hz; m , n e q são as ordens dos harmônicos (m, n e $q=1,2,3,\dots$); f_{pin} é a velocidade rotórica da roda dentada motora em Hz; f_{cor} é a velocidade rotórica da roda dentada movida em Hz e f_{eng} é a frequência de engrenamento obtida pela frequência rotórica de uma dada engrenagem multiplicada pelo seu número de dentes (Z), ou seja, $f_{eng}=f_{pin} \times Z_{pin}=f_{cor} \times Z_{cor}$. Quando na Eq.(1) o termo referente à frequência de engrenamento é zerado ($q_{bl}=0$), o conjunto de frequências passa a caracterizar uma avaria na região da alimentação.

Extend Park's Vector Approach (EPVA)

Nesta técnica é realizada a observação espectral do módulo do vetor de Park no referencial estatórico, com a vantagem da componente fundamental da alimentação do motor ser automaticamente subtraída do espectro pela transformação de Park, fazendo com que as componentes características de avarias apareçam demoduladas e com destaque (SILVA, 2008). As componentes do Vetor de Park da corrente elétrica, em função da corrente de alimentação são dadas pelas Eq.(2) e (3):

$$i_{sd}^s = \sqrt{2/3} i_{s1}^s - 1/\sqrt{6} i_{s2}^s - 1/\sqrt{6} i_{s3}^s \quad (2)$$

$$i_{sq}^s = 1/\sqrt{2} i_{s2}^s - 1/\sqrt{2} i_{s3}^s \quad (3)$$

Onde i_{s1}^s, i_{s2}^s e i_{s3}^s são as correntes trifásicas; i_{sd}^s e i_{sq}^s as correntes da transformação (dq).

O módulo do vetor de Park será dado pela Eq.(4).

$$EPVA = \sqrt{(i_{sd}^s)^2 + (i_{sq}^s)^2} \quad (4)$$

Entropy Wavelet

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.(5) é a sequência resultante do produto interno de um sinal $s(t)$ com as funções de wavelet packet.

$$\lambda_{mf}(n) = \left\langle s, w_{mf} \right\rangle = 2^{-m/2} \sum_n s(t) w_f(2^{-m}t - n), f \geq 0 \quad (5)$$

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.(6).

$$w_{mf}(t) = 2^{-m/2} w_f(2^{-m}t - n) \quad (6)$$

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 valor de energia relativa, que corresponde à energia de cada wavelet packet é dado pela Eq.(7).

$$p_m = \frac{\sum_n |\lambda_{mf}(n)|^2}{\sum_m \sum_n |\lambda_{mf}(n)|^2} \quad (7)$$

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

$$WPE_{tot} = \sum_m -p_m \ln(p_m) \quad (8)$$

Materiais e Métodos

A bancada desenvolvida em laboratório e apresentada na Fig.(1) é composta por um Motor de Indução Trifásico da Siemens de 2cv (1,5kW), 8,6N.m, 4 pólos, 3,64A/380V, podendo ser acionado com inversor de frequência de controle vetorial WEGCFW08 (2cv/220V) ou partida direta (380V/60Hz). O sistema redutor apresentado na Fig.(2a) é

composto por engrenagens cilíndricas de dentes retos de módulo 3, com pinhão de 23 dentes e relação de transmissão de 2:1. O motor aciona a caixa de redução que está acoplada a um freio mecânico por meio de uma correia dentada. O conjugado de carga é medido multiplicando-se o comprimento do braço de alavanca (230 mm) da Fig.(2b), com a massa medida por balança eletrônica de precisão WeiHeng WH-A08.

Figura 1. Montagem experimental proposta. Fonte: Autoria própria.

Figura 2. Montagem experimental: (a) engrenamento e (b) braço de alavanca. Fonte: Autoria própria.

A medição da rotação durante os ensaios foi realizada por meio de um taco gerador TH20R1800 da Hohner que gera um sinal analógico de 0 a 10VCC. O acelerômetro utilizado foi o HS-1001000202 da Hansford Sensors (2Hz a 10kHz $\pm$ 5%), que possui uma sensibilidade de 100mV/g $\pm$ 10%. As correntes são obtidas a partir de sensores lineares de efeito Hall da Allegro tipo ACS712ELC-30A (66mV/A). O módulo de aquisição de dados (DAQ) utilizado foi o modelo NI USB-6211da National InstrumentsTM que possui 16 conversores A/D de 16 bits e que pode trabalhar com uma taxa de amostragem de até 250ks/s (amostras por segundo). A partir dos sinais obtidos pelo DAQ são realizadas as análises de avarias por um código em LabViewTM. Todos os sinais utilizados foram amostrados com 30kHz. Todas as amostras foram decompostas pela WPT conforme a Fig.(3), analisando-se para os acionamentos com 60Hz os detalhes de packet $\lambda_{7,0}$ e $\lambda_{7,5}$ referentes a região da alimentação e

do engrenamento, respectivamente. Nos acionamentos com 20Hz foram analisados os detalhes de packet $\lambda_{8,0}$ e $\lambda_{8,3}$ referentes a região da alimentação e do engrenamento, respectivamente.

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

Resultados e Discussão

As etapas do desgaste foram obtidas naturalmente em aproximadamente 20 horas (limitação devido ao nível de ruído prejudicar o sistema de aquisição), adquirindo-se cinco amostras para cada nível de severidade de cada pinhão danificado (dois pinhões) operando sem lubrificação. Os intervalos de medições foram escolhidos pela significância das alterações nos perfis dos dentes observadas por inspeção visual. A Fig.(4) apresenta os níveis de severidade observados na inspeção visual nos ensaios de desgaste, adotando-se os termos: suave, moderado, severo e excessivo, sugeridos por Davis (2005). Dentre os níveis de desgaste observados visualmente, apenas o suave não apresentou alterações na análise preditiva. A Fig.(5) apresenta um esquemático do procedimento realizado.

Figura 4. Níveis de desgaste observados nos ensaios: (a) sem avaria, (b) desgaste suave, (c) desgaste moderado, (d) desgaste severo e (e) desgaste excessivo. Fonte: Autoria própria.

Figura 5. Base de ensaios para a formação do desgaste. Fonte: Autoria própria.

Na Fig. (6) são apresentados os espectros de vibração dos detalhes $\lambda_{7,0}$ e $\lambda_{7,5}$, comparando-se os estados sem avaria, desgaste moderado e excessivo, no acionamento com inversor em 60Hz. Na Fig. (6a) e na Fig. (6c) são apresentados os espectros do detalhe $\lambda_{7,0}$ com desgaste moderado e excessivo respectivamente, onde não se observa alterações significativas. A Fig. (6b) apresenta os espectros do detalhe $\lambda_{7,5}$ com desgaste moderado, onde é possível observar um aumento de 3,6dB na frequência de engrenamento (676,5Hz), e na Fig. (6d) são apresentados os espectros do detalhe $\lambda_{7,5}$ com desgaste excessivo, onde observa-se um aumento de 6,3dB na frequência de engrenamento (676,5Hz). Em ambos os casos é observado um aumento do ruído ocasionado pela vibração torcional.

Figura 6. Espectros da vibração: (a) detalhe $\lambda_{7,0}$ com desgaste moderado, (b) detalhe $\lambda_{7,5}$ com desgaste moderado, (c) detalhe $\lambda_{7,0}$ com desgaste excessivo e (d) detalhe $\lambda_{7,5}$ com desgaste excessivo. Fonte: Autoria própria.

A análise espectral da vibração possibilitou a detecção do desgaste moderado, severo e excessivo em todas as condições propostas de funcionamento do conjunto, a partir das gradativas alterações observadas nas magnitudes das frequências de engrenamento, pelas fortes modulações de magnitude e frequências das bandas laterais do engrenamento, e pelo aumento das frequências espúrias (ruído), conforme é indicado na literatura.

Na Fig.(7) são apresentadas as correntes dq para as condições sem avaria, desgaste moderado, severo e excessivo para o acionamento direto da rede.

Figura 7. Correntes dq com acionamento direto da rede: (a) sem avaria, (b) desgaste moderado, (c) desgaste severo e (d) desgaste excessivo. Fonte: Autoria própria.

Na Fig.(8) são apresentados os espectros de EPVA dos detalhes $\lambda_{7,0}$ e $\lambda_{7,5}$, comparando-se os estados sem avaria, desgaste moderado e severo no acionamento direto da rede, e na Fig.(9) são apresentados os espectros de EPVA dos detalhes $\lambda_{7,0}$ e $\lambda_{7,5}$, para o acionamento com inversor em 60Hz, e dos detalhes $\lambda_{8,0}$ e $\lambda_{8,3}$, para o acionamento com inversor em 20Hz, comparando-se a condições sem avaria e desgaste excessivo.

Figura 8. Espectros de EPVA: (a) detalhe $\lambda_{7,0}$ com desgaste moderado, (b) detalhe $\lambda_{7,5}$ com desgaste moderado, (c) detalhe $\lambda_{7,0}$ com desgaste severo e (d) detalhe $\lambda_{7,5}$ com desgaste severo. Fonte: Autoria própria.

Figura 9. Espectros de EPVA: (a) detalhe $\lambda_{7,0}$ com inversor em 60Hz, (b) detalhe $\lambda_{7,5}$ com inversor em 60Hz, (c) detalhe $\lambda_{8,0}$ com inversor em 20Hz e (d) detalhe $\lambda_{8,3}$ com inversor em 20Hz. Fonte: Autoria própria.

A análise espectral do conjunto de amostras para cada nível de desgaste apresentou um aumento gradativo e significativo do ruído ocasionado pela vibração torcional, e em algumas amostras constatou-se o surgimento da banda lateral da alimentação em relação ao engrenamento conforme observado na Fig. (8) e Fig. (9). A observação do conjunto total de amostras constatou fortes variações nas magnitudes das frequências características da avaria comprometendo a confiabilidade de um diagnóstico utilizando a análise espectral.

Os cálculos da entropia aplicados a decomposições wavelet dos sinais de EPVA se apresentaram de forma satisfatória como técnica alternativa à análise espectral para classificação e detecção de níveis de desgaste. Na Tab.(1) é apresentado um sumário estatístico do cálculo das entropias normalizadas, comparando-se as condições sem avaria, desgaste moderado, severo e excessivo das amostras de cada pinhão danificado.

Tabela 1. Sumário estatístico das entropias normalizadas dos sinais de EPVA. Fonte: Autoria própria.

	Pinhão	Direto da Rede					
		Entropia do detalhe $\lambda_{7,0}$			Entropia do detalhe $\lambda_{7,5}$		
		Média	Desvio	CV (%)	Média	Desvio	CV (%)
Sem Avaria	1	0,50306	0,0012	0,24	0,05566	0,00687	12,34
	2	0,50642	0,00574	1,13	0,05468	0,00515	9,41
Desgaste Moderado	1	0,56475	0,0132	2,34	0,21993	0,02237	10,17
	2	0,57772	0,02354	4,08	0,24976	0,02451	9,81
Desgaste Severo	1	0,62285	0,01452	2,33	0,34336	0,03289	9,58
	2	0,55287	0,01311	2,37	0,38339	0,00978	2,55
Desgaste Excessivo	1	0,61559	0,0174	2,83	0,49825	0,02417	4,85
	2	0,59231	0,01398	2,36	0,58719	0,04046	6,89

		60Hz (inversor de frequência)					
		Entropia do detalhe $\lambda_{7,0}$			Entropia do detalhe $\lambda_{7,5}$		
	Pinhão	Média	Desvio	CV (%)	Média	Desvio	CV (%)
Sem Avaria	1	0,09328	0,00164	1,76	0,03766	0,00294	7,8
	2	0,09494	0,00178	1,87	0,04067	0,00419	10,3
Desgaste Moderado	1	0,13684	0,00729	5,33	0,20522	0,02652	12,92
	2	0,13308	0,00926	6,96	0,22931	0,02757	12,02
Desgaste Severo	1	0,13046	0,00449	3,44	0,32085	0,01408	4,39
	2	0,12976	0,0019	1,46	0,35511	0,01438	4,05
Desgaste Excessivo	1	0,16489	0,00637	3,86	0,44818	0,02878	6,42
	2	0,16119	0,00642	3,99	0,7659	0,07647	9,98
		20Hz (inversor de frequência)					
		Entropia do detalhe $\lambda_{8,0}$			Entropia do detalhe $\lambda_{8,3}$		
	Pinhão	Média	Desvio	CV (%)	Média	Desvio	CV (%)
Sem Avaria	1	0,14941	0,01603	10,73	0,12736	0,01928	15,14
	2	0,15334	0,01308	8,53	0,1119	0,01179	10,53
Desgaste Moderado	1	0,37271	0,00847	2,27	0,42625	0,03526	8,27
	2	0,37087	0,01418	3,82	0,4644	0,03381	7,28
Desgaste Severo	1	0,27781	0,02015	7,25	0,71955	0,01402	1,95
	2	0,2805	0,04766	16,99	0,75518	0,00939	1,24
Desgaste Excessivo	1	0,36159	0,00722	2	0,86783	0,04619	5,32
	2	0,36279	0,02119	5,84	0,94461	0,02266	2,4

O cálculo da entropia aplicado nas decomposições wavelet dos sinais de EPVA apresentaram baixa dispersão para o total de amostras nos ensaios de desgaste, com exceção das condições sem avaria e desgaste severo no acionamento com inversor em 20Hz, ambos classificados como média dispersão ($15\% < CV < 30\%$). Os valores das entropias nos níveis de desgaste para o segundo pinhão, em todos os ensaios, foram maiores se comparados com os valores para o primeiro, devido às imprecisões na inspeção visual para escolha dos intervalos de medições. Apesar das diferenças no comportamento das amostras entre os dois pinhões, o cálculo da entropia ofereceu uma análise confiável para diferenciação entre os níveis de severidade. Na região da alimentação, analisando o total de amostras, o desgaste apresentou alterações da entropia em relação ao estado sem avaria, contudo, bem menores que as alterações devido ao dente quebrado, com o maior aumento médio no acionamento direto da rede registrado no desgaste excessivo em 0,09921nats, no acionamento com inversor em 60Hz houve um aumento médio de 0,06893nats no desgaste excessivo, e no acionamento com inversor em 20Hz um aumento médio de 0,22042nats no desgaste moderado. A análise total das amostras na região do engrenamento observou um aumento médio na entropia de 0,17968nats no desgaste moderado, de 0,30821nats no desgaste severo e 0,48755nats no desgaste excessivo para o acionamento direto da rede; um aumento médio de 0,17810nats no

desgaste moderado, de 0,29882nats no desgaste severo e 0,56788nats no desgaste excessivo para o acionamento com inversor em 60Hz; um aumento médio de 0,32570nats no desgaste moderado, de 0,61774nats no desgaste severo e 0,78659nats no desgaste excessivo para o acionamento com inversor em 20Hz.

Conclusões

Neste trabalho foi proposta uma estratégia para a detecção dos níveis de severidade do desgaste superficial em um sistema de transmissão por engrenagens utilizando padrões entrópicos em bandas de frequências específicas obtidas por meio da aplicação da Transformada de Wavelet Packet (WPT) em sinais de corrente obtidos a partir do Motor de Indução Trifásico (MIT). A investigação pela FFT combinada a wavelet de packet constatou que o desgaste provoca um aumento na magnitude do engrenamento (espectro de corrente e vibração), acompanhado de frequências espúrias (ruído) devido aos efeitos da vibração torcional, entretanto, esta avaria não apresenta alterações relevantes nas frequências de rotação das rodas (vibração) ou bandas laterais da alimentação (corrente). A proposição da WPE como fonte alternativa de informação é justificada pelo fato dos efeitos transientes das avarias na região do engrenamento prejudicarem a análise espectral. O cálculo da entropia possibilitou a observação dos níveis de desgaste como um aumento gradativo deste valor na região do engrenamento. As baixas dispersões das amostras demonstraram um padrão confiável para a aplicação do cálculo da entropia na detecção das avarias. A taxa de aquisição e o número de pontos foram selecionados a partir dos valores apresentados pela entropia mediante aos efeitos das avarias em função da severidade e da velocidade de rotação do conjunto, entretanto, uma melhor combinação destes parâmetros pode ser obtida por meio de estudo específico.

Referências

ASSUNÇÃO, F.O. (2006). Técnicas de Análise Preditiva para Falhas Elétricas em Motores de Indução Trifásicos. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, Brasil.

BENGHOZZI, A. et al. (2012). The Diagnosis of a Gearbox Transmission System Using Electrical Control Parameters. In: **18th International Conference on Automation and Computing (ICAC)**, pp.1-6.

BONALDI, E.L. (2005). Diagnóstico Preditivo de Avarias em Motores de Indução Trifásicos com MCSA e Teoria de Conjuntos Aproximados. **Tese** (Doutorado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, Brasil.

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.

DAVIS, J.R. (2005). **Gear Materials, Properties, and Manufacture**. Materials Park, Ohio: ASM International.

KIA, S.H.; HENAO, H. e CAPOLINO, G.-A. (2007). Gearbox Monitoring Using Induction Machine Stator Current Analysis, Diagnostics for Electric Machines. In: **Power Electronics and Drives, IEEE International Symposium**, pp.149-154.

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**, Campina Grande, Brasil.

SILVA, J.G.B. (2008). Aplicação da Análise de Componentes Principais no Diagnóstico de Defeitos em Rolamentos Através da Assinatura Elétrica de Motores De Indução. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, Brasil.