



Detecção da Avaria de Dente Quebrado em Caixa de Redução Utilizando Variáveis Elétricas de um Motor de Indução Acoplado.

Detection of Broken Tooth Fault in Gearbox Using Electrical Variables of Induction Motor Coupled



Submetido em 18.04.15 | Aceito em 06.05.15 | Disponível on-line em 20.09.17

Alexander Patrick Chaves de Sena*

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco | *alexander.sena@caruaru.ifpe.edu.br

RESUMO

Este trabalho apresenta a investigação de variáveis elétricas de um motor de indução, para o diagnóstico de dente quebrado em caixa de redução por engrenagens cilíndricas de dentes retos, buscando-se uma solução alternativa a análise por sinais de vibrações. Especificamente, a partir das medições de tensão, corrente e velocidade rotórica, propõe-se examinar a expressividade das técnicas baseadas na MCSA (Motor Current Signature Analysis), EPVA (Extend Vector Approach Park), TSA (Torque Signature Analysis) e IPSA (Instantaneous Signature Power Analysis) na presença de uma avaria no engrenamento, aplicando-se como ferramentas de análise as transformadas de Fourier e Wavelet. Resultados experimentais são apresentados comparando as engrenagens em boas e más condições de funcionamento, avaliando-se a eficiência da detecção da avaria em ampla faixa de velocidade e carga da máquina, e comparando sinais de vibração e elétricos do motor.

Palavras-chaves: Engrenagens, Monitoramento, vetor de Park, Vibração, Variáveis elétricas.

ABSTRACT

This paper presents the investigation of electrical variables of an induction motor, to diagnose broken tooth in the gearbox of cylindrical spur gears, seeking an alternative solution for the analysis of vibration signals. Specifically, from the measurement of voltage, current and rotor speed, it is proposed to examine the expressiveness of techniques based on MCSA (Motor Current Signature Analysis), EPVA (Extend Vector Approach Park), TSA (Torque Signature Analysis) and IPSA (Instantaneous Power Signature Analysis) in the presence of a fault in the gear, applying analysis tools as Fourier transforms and Wavelet. Experimental results are presented comparing the gears in good and bad working conditions, evaluating the fault detection efficiency in a wide range of speed and machine load, and comparing signals from vibration and electric motor.

Keywords: Gears, Monitoring, Park vector, Vibration, Electrical variables

1. Introdução

O atual ambiente de competitividade industrial, impulsionado pelo intenso desenvolvimento tecnológico, e ocasionado pelo crescimento globalizado da economia, tem estabelecido às organizações um maior e contínuo compromisso com o aperfeiçoamento de seus produtos e processos. A manutenção possui um espaço representativo nos custos das grandes corporações industriais e por este motivo é tema

de constante pesquisa para melhorar a sua eficiência e minimizar consequências (GARCIA & SAVI, 2005). Para a indústria, evitar a paralisação da produção por falhas em equipamentos significa maior índice de disponibilidade da linha de produção, além de redução nos custos de manutenção (ARAÚJO, 2011).

Uma atual estratégia que está sendo investigada para detecção de avarias em mecanismos acoplados a motores elétricos é a

análise de assinatura corrente do motor, a qual é aplicada com êxito para monitoramento do estado de motores elétricos e em rolamentos (KAR & MOHANTY, 2006b). Segundo Benghozzi, et al. (2012), como não é necessário chegar ao mecanismo que está sendo diagnosticado fixando sensores mecânicos para a coleta de dados, esta estratégia é particularmente útil em lugares onde os métodos usuais como a implementação de acelerômetros para monitoramento de sinais de vibração são inadequados ou inviáveis, como equipamentos em poços profundos na indústria do petróleo, ou onde possa existir risco de contaminação e/ou alterações da sensibilidade devido a exposição prolongada a certas condições de trabalho. A hipótese é que uma determinada avaria em um mecanismo acoplado a um motor elétrico se apresenta como um componente harmônico nas correntes estatóricas.

O defeito de dente quebrado em engrenamentos (caixas de redução ou multiplicação, bombas de engrenagens, extrusoras por rodas dentadas, dentre outras) pode ser ocasionado por uma fadiga de flexão (quebra na raiz) ou sobrecarga abrupta (quebra na raiz ou lascamentos), ou ainda devido a um estágio avançado de um mecanismo de desgaste, geralmente fadiga de contato (quebra na linha primitiva), e são difíceis de serem identificados em altas rotações e no aumento da carga, a qual amortece os efeitos vibracionais.

Em Kar & Mohanty (2006a) a avaria de dente quebrado se apresenta predominantemente como alteração nas bandas laterais da frequência de alimentação por meio da aplicação da Transformada Rápida de Fourier (FFT), entretanto, o mesmo comportamento pode estar associado a outros maus comportamentos no conjunto eletromecânico, a exemplo da excentricidade, sendo necessário avaliar alterações na região da frequência de engrenamento. As alterações na região de

engrenamento só foram observadas por meio da aplicação da Transformada Wavelet Discreta (DWT). Mohanty & Kar (2006) estendem a pesquisa aplicando condições distintas de carregamento. Kar & Mohanty (2006b) estudaram a decomposição da corrente pela DWT combinada à distribuição de probabilidade de Kolmogorov-Smirnov (KS) para detecção automática da avaria. Em Kar & Mohanty (2008) são apresentados resultados experimentais aplicando tanto a sinais de vibração, quanto de corrente a DWT em comparação a Transformada de Fourier com Multiresolução (MFT).

Flores et al. (2013) apresentaram um método de diagnóstico baseado na utilização da Transformada Wavelet Discreta (DWT) para a análise da Potência Instantânea total do motor de indução trifásico para detecção de dentes quebrados em uma caixa de engrenagens com variação de carga. Os coeficientes wavelet foram analisados estatisticamente pelo desvio padrão e plotados para o estado saudável e para as condições de defeito observando-se as alterações nos níveis de energia.

Embora exista uma motivação da comunidade acadêmica em formalizar critérios que possam caracterizar uma avaria de dente quebrado diferentemente dos demais problemas no sistema eletromecânico como a excentricidade, as publicações não apresentaram resultados comparativos ou significativos que pudessem comprovar se é possível tal diferenciação, bem como não há um estudo comparativo sobre a sensibilidade das variáveis elétricas do motor.

Esta pesquisa tem como objetivo a detecção de dente quebrado em um sistema de transmissão por engrenagens cilíndricas de dentes retos, por meio da investigação de variáveis elétricas que semelhantemente a corrente estatórica, podem ser sensíveis aos efeitos vibracionais, tais como o vetor de Park, a potência instantânea e o conjugado eletromagnético, como

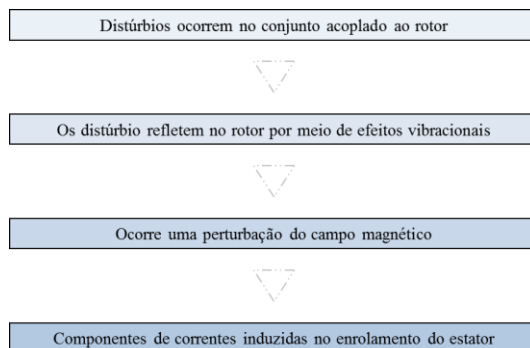
fontes de informação alternativas a análise por sinais de vibração. Para análise dos resultados será aplicada a Análise Espectral tradicional aos sinais propostos, bem como a aplicação combinada a Transformada Wavelet Discreta (DWT).

2. Análise de Avarias em Sistemas Engrenados

A Associação Americana dos Fabricantes de Engrenagens (AGMA) classifica 20 modalidades de avarias em engrenagens em diversas categorias. Porém, as categorias básicas seriam: sobrecarga, fadiga por flexão na raiz do dente, fadiga de contato (ou hertziana), desgaste (abrasão, adesão, cavitação, etc.) e engripamento (“scuffing”) (KODA, 2009).

Segundo Norton (2013) a fadiga é responsável por noventa por cento, ou mais, das avarias por causas mecânicas. Segundo Dudley (2012), a fadiga de contato é a grande responsável por quebras em engrenagens industriais. Contudo, em Alban (2002) defende-se que o modo de falha mais comum em engrenamentos é a fadiga de flexão. Sousa (2010) esclarece que na realidade esta dicotomia acontece devido à frequência de falha estar relacionada com os critérios de cálculo e os fatores de segurança utilizados que favorecem apenas um dos tipos de fadiga. O processo de como uma avaria no mecanismo acoplado a um motor elétrico podem ser monitorados por meio da análise das assinaturas dos sinais de corrente pode ser representado na Figura (1).

Figura 1. O processo pelo qual um distúrbio mecânico na carga reflete nas componentes de corrente de um motor elétrico.



Fonte: Adaptado de Silva (2008).

Kia et al. (2007) sugerem o conjunto de frequências que podem surgir devido a uma avaria no engrenamento na análise da corrente elétrica estatística na Equação (1).

$$\begin{aligned}
 f_{BL_{pin}} &= f_{alim} \pm m.f_{pin} \\
 f_{BL_{cor}} &= f_{alim} \pm n.f_{cor} \\
 f_{BL_{pin/cor}} &= f_{alim} \pm m.f_{pin} \pm n.f_{cor} \\
 f_{BL_{eng}} &= f_{alim} \pm q.f_{eng} \\
 f_{BL_{pin/eng}} &= f_{alim} \pm m.f_{pin} \pm q.f_{eng} \\
 f_{BL_{cor/eng}} &= f_{alim} \pm n.f_{cor} \pm q.f_{eng} \\
 f_{BL_{pin/cor/eng}} &= f_{alim} \pm m.f_{pin} \pm n.f_{cor} \pm q.f_{eng}
 \end{aligned} \tag{1}$$

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, $f_{eng}=f_{pin} \times Z_{pin}=f_{cor} \times Z_{cor}$.

2.1 Extend Park's Vector Approach (EPVA)

Na técnica denominada Extend Park's Vector Approach (EPVA) 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). Uma transformação *odq* (Park) representa cada armadura trifásica original do estator e do rotor por uma armadura bifásica *dq*, mais uma bobina isolada de índice *o*, eliminando o acoplamento magnético mútuo entre os bobinados de fase, tornando o fluxo concatenado num eixo independente do outro. Em geral, as informações na corrente de sequência zero (i_{so}) não são utilizadas. Uma apresentação mais detalhada da transformação *odq* pode ser encontrada em Jacobina (2005).

As componentes do Vector de Park da corrente elétrica, em função da corrente de alimentação são dadas pelas Equações (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 máquina bifásica (*dq*).

O quadrado do módulo do vetor de Park será dado pela Equação (4):

$$|i_{sd}^s + i_{sq}^s|^2 \quad (4)$$

3. Metodologia

2.2 Instantaneous Power Signature analysis (IPSA)

A potência carrega mais informação com a corrente e a tensão do que a corrente sozinha, isso é devido ao fato da condição normal de operação do motor ser afetada tanto pela forma de onda da corrente quanto pela diferença de fase entre a corrente e a tensão de alimentação. A potência instantânea total de um motor de indução saudável pode ser calculada pela Equação (5) utilizando medição das três tensões e correntes.

$$p_{\text{tot}} = v_{s1}^s i_{s1}^s + v_{s2}^s i_{s2}^s + v_{s3}^s i_{s3}^s \quad (5)$$

Onde v_{s1}^s, v_{s2}^s e v_{s3}^s são as tensões trifásicas.

2.3 Torque Signature Analysis (TSA)

O fluxo estatórico é calculado por meio da integração da força contra eletromotriz pelo método apresentado por Freitas et. al. (2011), que é a tensão medida nos terminais da máquina subtraída da queda de tensão na resistência do estator.

$$\lambda_{sd}^s = \int (v_{sd}^s - R_s i_{sd}^s) dt \quad (6)$$

$$\lambda_{sq}^s = \int (v_{sq}^s - R_s i_{sq}^s) dt \quad (7)$$

Onde λ_{sd}^s e λ_{sq}^s são as componentes bifásicas do fluxo estatórico da máquina bifásica e R_s é a resistência estatórica medida diretamente nos terminais do motor.

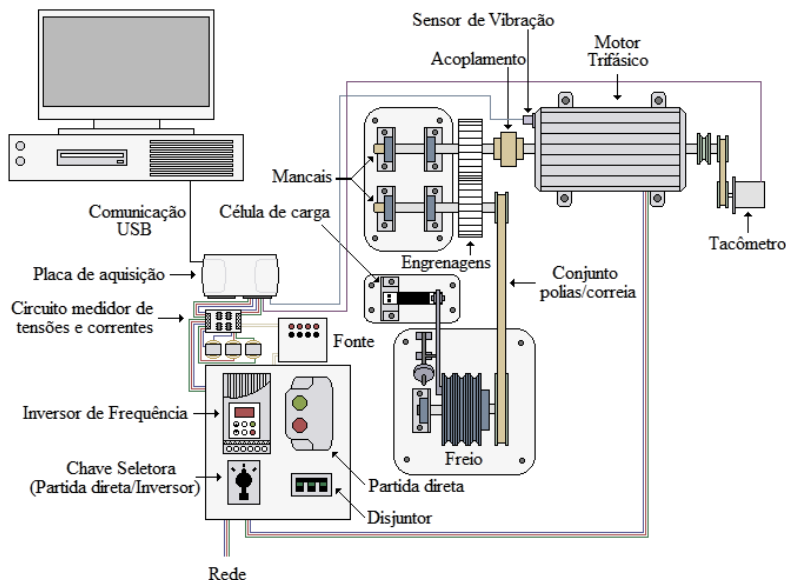
O fluxo estimado é utilizado, juntamente com a medição das correntes estatóricas para o cálculo do conjugado eletromagnético conforme Equação (8).

$$c_e = P(i_{sq}^s \lambda_{sd}^s - i_{sd}^s \lambda_{sq}^s) \quad (8)$$

A bancada da Figura (2) foi desenvolvida em laboratório e projetada para validação e testes de rendimento do motor, torque no eixo e para simulação de avarias mecânicas, tanto na carga como no próprio motor de indução. É composta por um Motor de Indução Trifásico Siemens de 2

CV (1,5kW), 8,6 N.m, 4 pólos, 3,64A/380V, podendo ser acionado por inversor de frequência (velocidade variável) ou partida direta (com velocidade variável com a carga por escorregamento).

Figura 2. Esquemático da bancada de testes.



Fonte: Elaborado pelos autores.

O motor quando acionado transmite a velocidade para as engrenagens e estas para um freio mecânico por meio de uma correia dentada e polias. O freio pode ser regulado impondo uma carga desejada para o motor. O torque no eixo do motor pode ser estimado por meio do modelo mecânico da bancada e do sinal de uma célula de carga.

Os sensores de tensão (Transformadores de tensão) fornecem um sinal proporcional à tensão de alimentação e o sensor de efeito Hall de corrente fornece um sinal de tensão proporcional à corrente de armadura. Estes sinais são disponibilizados ao conversor A/D, que realiza a amostragem e transmitem as informações dos

sensores para o computador onde os mesmos podem ser visualizados ou armazenados.

O conversor A/D é o módulo multifuncional de aquisição de dados, NI USB-6211 e possui 16 bits de resolução e pode trabalhar com uma taxa de amostragem de até 250 ks/s (amostras por segundo). Esse módulo oferece 16 entradas analógicas; quatro linhas de entrada digital; quatro linhas de saída digital; níveis programáveis de aquisição por canal, com tensões variando de $\pm 0,2V$ até $\pm 10V$ e dois contadores ou timers. A partir dos sinais obtidos do conversor A/D são realizadas as análises de avarias por um código em LabViewTM.

A avaria de dente quebrado (localizada) foi obtida pela usinagem de um dente em sua base.

Os ensaios foram aplicados para se observar o comportamento dos sinais de vibração e algumas variáveis elétricas com acionamento direto da rede e com inversor de frequência em 20Hz, 40Hz e 60Hz, nas condições em vazio e com carga, a fim de se analisar a possibilidade de utilização destes sinais na detecção de uma avaria localizada no engrenamento.

3.1 Análise Espectral Tradicional

Um sistema de análise espectral é composto pelas seguintes etapas (SILVA, 2008):

- a) Amostragem: ocorre por meio de sensores e um sistema de aquisição de dados. A forma de onda da variável a ser analisada é medida por certo período e armazenada.
- b) Processamento: o sinal da variável no tempo é convertido para o domínio da frequência por meio de técnicas e algoritmos de processamento digitais de sinais, tais como a Transformada Discreta de Fourier (DFT).
- c) Detecção: os padrões de avarias, que são compostos por frequências específicas, são identificados no espectro por algoritmos de busca, e as amplitudes das frequências podem representar uma medida de severidade. Em muitos casos uma escala logarítmica (em geral dB) é utilizada devido ao caráter exponencial de evolução apresentado pela maioria das avarias conhecidas.
- d) Diagnóstico: a partir de níveis pré-estabelecidos de alarmes e características de crescimento, as amplitudes dos padrões de avarias são verificados para apresentar uma medida de severidade, podendo ser realizadas estimativas de

tempo de vida do equipamento (prognóstico).

Considerando-se N amostras do sinal no domínio do tempo, denotadas $x(k)$, com $k=0,1,2,\dots,N-1$, a DFT é dada por um conjunto de N amostras do sinal no domínio da frequência, denotadas por $X(n)$, $n=0,1,2,\dots,N-1$ e definidas pela Equação (9).

$$X(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) e^{-j \frac{2\pi kn}{N}} \quad (9)$$

A implementação da DFT passou a ser amplamente utilizada no processamento digital de sinais quando em 1965 os matemáticos Cooley e Tukey apresentaram um algoritmo rápido, que permite acelerar o processamento da interpolação de uma grande quantidade de dados por polinômios trigonométricos, proporcionando uma aplicação com menor esforço computacional, de forma mais rápida e econômica, que se popularizou como Transformada Rápida de Fourier (FFT, do inglês Fast Fourier Transform), também mencionada na literatura como Transformada Discreta Rápida de Fourier.

3.2 Análise Espectral Combinada a DWT

Uma interpretação muito útil à teoria de processamento de sinais é que a Transformada Wavelet corresponde a uma operação de filtragem de um sinal $x(t)$ por um filtro cujos coeficientes são gerados pela função wavelet que está sendo utilizada na análise. A função wavelet está relacionada a um filtro passa-alta, a qual produz os coeficientes de detalhes da decomposição wavelet. Nesta análise há uma função adicional que está relacionada ao filtro passa-baixa, chamada de função de escalonamento (scaling functions), e está associada com os coeficientes de aproximação da decomposição. Isto significa que a aproximação contém informações de baixa

frequência do sinal original e o detalhe contém as informações de alta frequência deste mesmo sinal (LACERDA et al., 2011). Um dos esquemas de implementação (algoritmo rápido) da Transformada Wavelet Discreta (DWT) mais utilizados dentre os disponíveis na literatura é conhecido como Análise de Multiresolução (MRA) ou Algoritmo Piramidal de Mallat, e opera com escalas e posições baseadas em uma escala chamada diádica (potência de dois), mostrando que um sinal pode ser decomposto em duas componentes, aproximação e detalhe, e também reconstruído por meio delas. A definição da DWT em sua forma diádica-ortonormal é descrita pela Equação (10).

$$DWT(j,k) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{j,k}^*(t) dt, \quad j \text{ e } k \in \mathbb{Z} \quad (10)$$

Onde $\psi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \psi(2^{-j}t - k)$ são funções wavelets ortogonais, as quais constituem uma base ortonormal de $L^2(\mathbb{R})$.

Uma estratégia interessante é aplicar a Análise Espectral a um detalhe wavelet específico, possibilitando a retenção da informação do sinal unicamente na banda de frequência onde ocorrem as frequências de uma avaria, descartando-se as bandas que contêm ruído e informações menos importantes.

4. Resultados Experimentais

Os resultados com alimentação direta da rede apresentaram pouca sensibilidade à avaria de dente quebrado quando em vazio, mesmo nas frequências da região da alimentação, contudo quando é imposta a carga, há alterações relevantes nas bandas laterais da alimentação nos espectros de corrente, principalmente nas frequências relacionadas à roda dentada movida, bem como

nas bandas laterais de 120 Hz nos sinais de conjugado, potência e módulo do vetor de Park.

Na região de engrenamento surgiram frequências que sugerem um efeito de folga, as quais no espectro de corrente se apresentaram nas harmônicas da alimentação em 600 Hz e 840 Hz formando um conjunto de picos distanciados pela frequência da roda dentada movida que se unem com a frequência do engrenamento em relação à alimentação (738,50Hz aproximadamente) e suas bandas.

Comportamento semelhante é observado nos demais sinais elétricos com conjuntos de frequências entre 660 e 720 Hz. Nos ensaios com inversor houve pouca sensibilidade de todas as variáveis elétricas em vazio, e apenas no acionamento do motor em 60 Hz a vibração apresentou possibilidade de detecção da avaria. Nos ensaios com carga houve sensibilidade em todas as velocidades de acionamento, em ambas as regiões, surgindo efeitos de folgas na região de engrenamento.

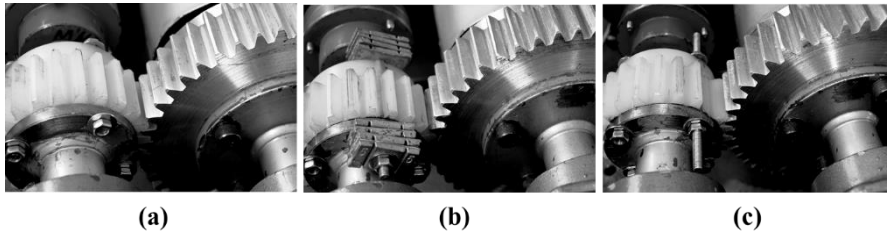
A Figura (3) apresenta o sistema engrenado sem avaria, na condição de desbalanceamento por meio de massas de chumbo com 90 gramas e dente quebrado.

Na Figura (4) são apresentados os espectros de vibração e corrente comparando-se o estado sem avaria e com dente quebrado, no acionamento com carga e alimentação direta da rede. O espectro de vibração apresenta o surgimento da frequência de engrenamento (678,50 Hz) e suas bandas laterais de forma bem definida (60.000 pontos). O espectro de corrente não apresenta a frequência de engrenamento e suas bandas, contudo observa-se o surgimento de conjuntos de frequências relacionadas às harmônicas da alimentação (660,00 Hz e 780,00 Hz) e da alimentação em relação ao engrenamento (736,50 Hz) espaçadas pela frequência da roda dentada movida, que evidenciam a presença do

dente quebrado como um efeito de folga. Para o mesmo ensaio, os espectros do módulo do vetor de Park, conjugado e potência instantânea apresentaram um conjunto sequenciado de frequências distanciadas pela frequência da roda

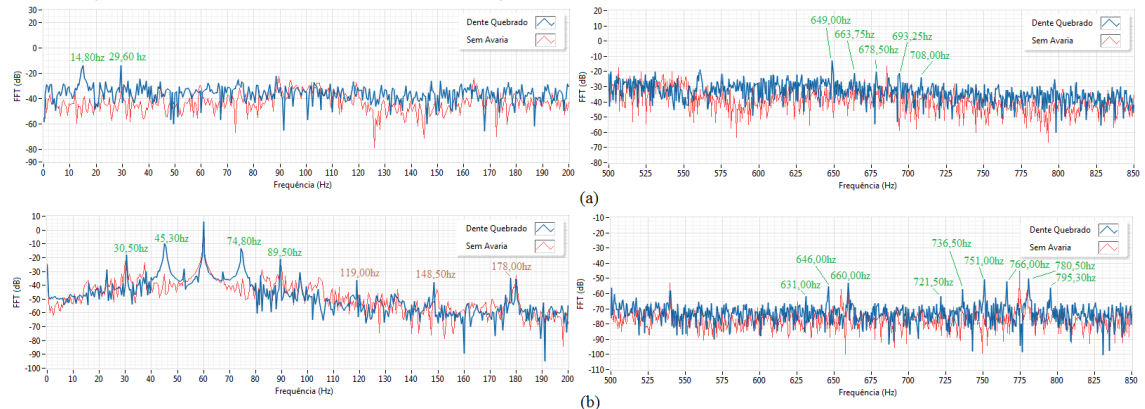
dentada movida que sugerem uma composição entre bandas laterais de harmônicas da alimentação e da relação engrenamento e alimentação, semelhantemente a corrente.

Figura 3. Sistema engrenado: (a) sem avaria (b) com desbalanceamento de 90 gramas e (c) com dente quebrado na base.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 4. Espectros do sistema engrenado sem avaria e com dente quebrado no acionamento com carga e alimentação direta da rede dos sinais de: (a) Vibração e (b) Corrente i_{s1} .



Fonte: Elaborado pelos autores.

A decomposição wavelet combinada à análise espectral do detalhe foi implementada para melhor observação do conjunto de frequências que surgiram na região do engrenamento nos estados de dente quebrado e sem avaria. As frequências centrais da decomposição wavelet foram: $f_{D1}=15,000\text{kHz}$, $f_{D2}=7,500\text{kHz}$, $f_{D3}=3,750\text{kHz}$, $f_{D4}=1,875\text{kHz}$, $f_{D5}=937,500\text{Hz}$,

$f_{D6}=468,750\text{Hz}$, $f_{D7}=234,380\text{Hz}$, $f_{D8}=117,190\text{Hz}$. A wavelet-mãe de Daubechies (db12) foi escolhida devido à boa reconstrução dos sinais.

A Figura (5) apresenta a análise espectral do detalhe 5 que exibe a região do engrenamento com acionamento direto da rede. A observação da análise espectral do detalhe torna esclarecido que as frequências que surgiram devido ao dente

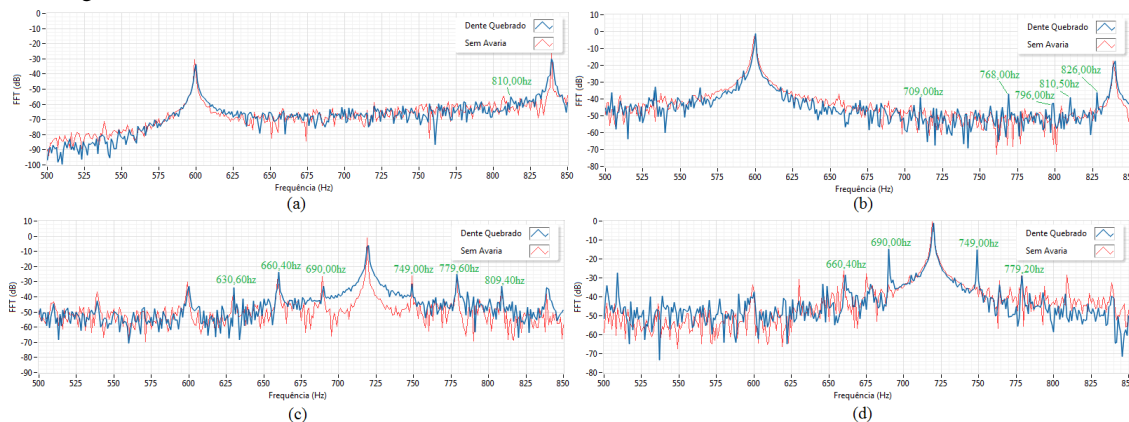
quebrado são bandas laterais de harmônicas da rede (60.000 pontos).

No ensaio de dente quebrado com carga e acionamento por inversor em 60Hz a velocidade medida por meio do tacômetro indicou 1763,80RPM e com a avaria foi de 1723,40RPM. A análise proporcionou o conjunto de frequências sem avaria: $f_{pin}= 29,41\text{Hz}$, $f_{cor}=14,71\text{Hz}$ e $f_{eng}= 676,45\text{Hz}$; e com avaria: $f_{pin}= 28,70\text{Hz}$, $f_{cor}=14,35\text{Hz}$ e $f_{eng}= 660,00\text{Hz}$. A Figura (6) apresenta os espectros de vibração, corrente, módulo do vetor de Park, conjugado e potência respectivamente (60.000 pontos). Os espectros para 60Hz apresentam alterações como efeito de folga no engrenamento ou relação entre

engrenamento (picos entre 600,00Hz e 720,00Hz passando pela frequência de engrenamento em 660,00Hz) e alimentação, semelhantemente a corrente.

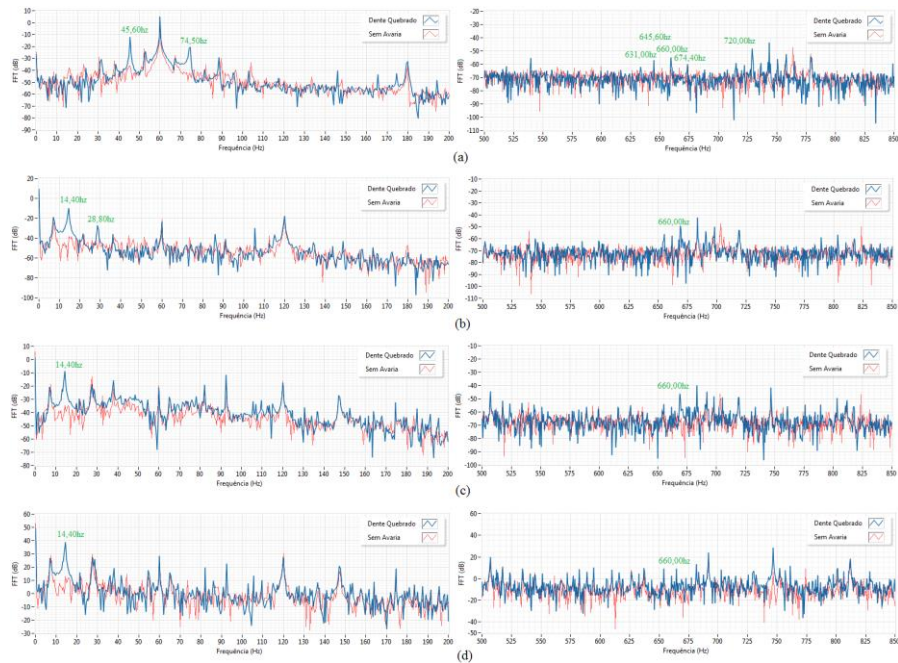
Na Figura 7 são apresentadas as análises espectrais do vetor de Park em seus detalhes wavelet 1 e 5, referentes a região de alimentação e de engrenamento respectivamente, comparando-se o sistema sem avaria e com desbalanceamento, bem como o desbalanceamento (massas com 90 gramas) com dente quebrado (60.000 pontos). Os espectros apresentam diferenças relevantes entre uma excentricidade ocasionada por um desbalanceamento da excentricidade ocasionada por um dente quebrado.

Figura 5. Análise espectral do detalhe 5 da decomposição wavelet com acionamento direto da rede nas situações de: (a) corrente sem carga, (b) corrente com carga, (c) módulo do vetor de Park sem carga e (d) módulo do vetor de Park com carga.



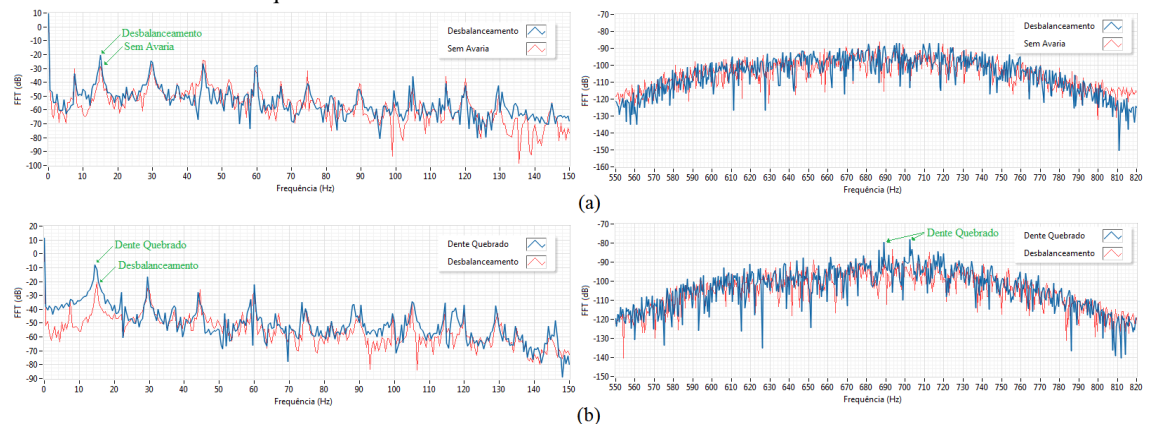
Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 6. Espectros nas regiões de alimentação e engrenamento, do sistema engrenado sem avaria e com dente quebrado, no acionamento do motor por inversor em 60Hz e com carga dos sinais de: (a) Corrente (b) EPVA, (c) TSA e (d) IPSA.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 7. Espectros do vetor de Park nos detalhes wavelet 1 e 5, com acionamento do motor direto da rede e com carga, impondo-se ao sistema engrenado as condições: (a) sem avaria e com desbalanceamento e (b) com desbalanceamento e dente quebrado.



Fonte: Elaborado pelos autores.

5. Conclusões

Esta pesquisa investigou o comportamento de sinais elétricos de um motor de indução na presença de avarias locais em um sistema engrenado. As técnicas associadas à análise de sinais de vibração e variáveis elétricas foram verificadas em experimentos onde a avaria localizada obtida por meio da usinagem de um dente da roda dentada motora.

Uma avaria localizada proporciona um efeito de excentricidade na região de alimentação alterando-se as bandas laterais facilmente visíveis por meio da aplicação da FFT. As análises na região de engrenamento para o sistema mecânico estudado apresentaram na FFT efeitos de folga com conjuntos de frequências igualmente distanciadas e localizadas entre harmônicas da alimentação, frequência de engrenamento e suas frequências relacionadas. É possível distinguir um efeito de excentricidade de um dente quebrado por meio de análise de variáveis elétricas.

A expressividade dos efeitos deste tipo de avaria na região engrenamento é dependente de características do conjunto eletromecânico, podendo o método ser insensível ou pouco sensível na análise espectral, sendo necessária a aplicação de técnicas de processamento mais apropriadas, tais como a análise de energia de decomposições wavelet.

Todas as variáveis elétricas do motor testadas tiveram alterações mediante as avarias, sendo aparentemente o conjugado pouco menos sensível e a potência afetada por maior quantidade de ruído nos acionamentos por inversor. Os acionamentos com carga apresentaram melhores resultados, sendo possível observar a avaria com alimentação direto da rede e com inversor em 60Hz, 40Hz e 20Hz.

Apesar dos resultados positivos, não é trivial fazer qualquer generalização para

diferentes tipos e tamanhos de motores, bem como para os diferentes tipos de sistemas engrenados.

Por fim, os resultados obtidos representam um bom avanço no sentido de se obter um sistema remoto e automático de detecção de avarias no conjunto engrenado acoplado a motores de indução, que seja uma alternativa confiável a análise de vibração.

6. Referências Bibliográficas

Alban, L.E. Failure of Gears, In: *ASM Handbook Vol. 11, Failure Analysis and Prevention*. Materials Park: ASM International, 2002. 2909p.

Araújo, R.S. Desgaste Prematuro e Falhas Recorrentes em Rolamentos de Motores de Indução Trifásicos Alimentados por Inversores de Frequência. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2011. 127p. Dissertação Mestrado.

Benghozzi, A.; Shao, Y.; Shi, Z.; Gu, F. e Ball, A.D. (2012). The Diagnosis of a Gearbox Transmission System Using Electrical Control Parameters. In: *18th International Conference on Automation and Computing*, Loughborough: ICAC, pp.1-6.

Dudley, D.W. Handbook of Practical Gear Design. Washington: CRC Press, 2012. 878p.

Jacobina, C.B. Sistemas de Acionamento Estático de Máquina Elétrica. Campina Grande, PB. p.44 – 53. Junho, 2005.

Flores, A.Q.; Cardoso, A.J.M. e Carvalho, J.B. (2013). Gearbox Fault Detection by Wavelet and Spectrum Analysis of the Induction Motor Power. In: *Electric Machines & Drives Conference*, Chicago: IEMDC, pp.88-92.

- Freitas, I.S.; Sena, A.P.C.; Silva, S.A.; Salvadori, F.; Carvalho, F.G. e Jacobina, C.B. (2011). An Integration Algorithm For Induction Motor Stator Flux Estimation With Dc Offset Compensation. In: *Brazilian Power Electronics Conference*, Natal: COBEP 2011.
- Garcia, M.S. e Savi, M.A. (2005). Analysis of Rotor Dynamics Defect Using Vibration Based Monitoring. In: *18th International Congress of Mechanical Engineering*, Ouro Preto: COBEM 2005.
- Kar, C. e Mohanty, A.R. (2006a). Monitoring Gear Vibrations Through Motor Current Signature Analysis and Wavelet Transform. In: *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.20, no.1, pp. 158-187.
- Kar, C. e Mohanty, A.R. (2006b). Multistage Gearbox Condition Monitoring Using Motor Current Signature Analysis and Kolmogorov–Smirnov Test. In: *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 290, no. 1–2, pp. 337-368.
- Kar, C. e Mohanty, A.R. (2008). Vibration and Current Transient Monitoring for Gearbox Fault Detection Using Multiresolution Fourier Transform. In: *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 311, no.1-2, pp. 109-132.
- Kia, S.H.; Henao, H. e Capolino, G.-A. (2007). Gearbox Monitoring Using Induction Machine Stator Current Analysis, Diagnostics for Electric Machines. In: *IEEE International Symposium*, pp.149-154.
- Koda, F. Estudo da Fadiga de Contato em Engrenagens Cilíndricas de Dentes Retos. Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2009. 187p. Dissertação Mestrado.
- Lacerda, A.L.M.; Lamim Filho, P.C.M.; Brito, J.N. e Pederiva, R. (2011). Detection of Faults in Three Phase Induction Motors Using Wavelet Packet Analysis. In: *21st International Congress of Mechanical Engineering*, Natal: COBEM 2011.
- Mohanty, A.R. e Kar, C. (2006). Fault Detection in a Multistage Gearbox by Demodulation of Motor Current Waveform. In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.53, no.4, pp.1285-1297.
- Norton, R.L. Projeto de máquinas: uma abordagem integrada. Porto Alegre: Bookman, 2013, 4ª ed., 1028p.
- Silva, J.G.B. Aplicação da Análise de Componentes Principais no Diagnostico de Defeitos em Rolamentos Através da Assinatura Elétrica de Motores de Indução. Itajubá: Universidade Federal de Itajubá, 2008. 98p. Dissertação Mestrado.
- Sousa, M.J. Estudo da Influência das Tensões Residuais na Fractura Catastrófica de Rodas Dentadas em Serviço. Bragança: Instituto Politécnico de Bragança, 2010. 88p. Dissertação Mestrado.