

Emprego da transformada de Wavelet na detecção de falhas em rolamentos

Fault detection in bearing using the Wavelet transform

Rômulo de Andrade Reis^{*}
Vinícius Augusto Diniz Silva^{**}
Paulo Cezar Monteiro Lamim Filho^{***}
Jorge Nei Brito^{****}
André Luis Christoforo^{*****}

As falhas em rolamentos são muito comuns em vários segmentos industriais. O monitoramento do estado de funcionamento através de técnicas preditivas é imprescindível para evitar que as falhas inesperadas ocorram. Dessa forma é possível aumentar a disponibilidade do equipamento dentro da planta industrial. Um dos parâmetros de monitoramento mais relevantes para avaliar a condição de trabalho de um equipamento é analisar o seu modo de vibração. Entretanto, os sinais de vibração provenientes de defeitos em rolamentos são de natureza transiente, não sendo bem averiguados pelas técnicas de análises convencionais. O objetivo deste trabalho consiste em apresentar um estudo da Transformada de Wavelet, técnica recente e promissora para detecção de falhas em rolamentos, demonstrando as suas vantagens e limitações utilizando o *software* Matlab. Os defeitos foram inseridos em diferentes rolamentos, montados numa banca de teste. Os resultados revelam a potencialidade e viabilidade da Transformada de Wavelet, podendo ser incluída em programas de Manutenção Preditiva.

Faults in bearing are very common in various industrial segments. Monitoring its operating status through predictive techniques is essential to prevent unexpected failures. Thus, it is possible to increase the availability of the equipment inside the plant. Vibration Analysis is one of the most relevant monitoring parameters to assess the working condition of the equipment. However, the vibration signals from defects in bearings are of transient nature, therefore not being well analyzed by conventional analysis techniques. The purpose of this research is to present a study of the Wavelet Transform, a recent promising technique to detect bearing faults demonstrating its advantages and limitations using Matlab software. The defects were inserted in three different bearings mounted on an experimental bench. Results show the capability and feasibility of the Wavelet Transform, and its potential to be included in predictive maintenance programs.

Palavras-chave: Manutenção preditiva. Detecção de falhas. Rolamentos. Transformada de Wavelet.

Keywords: Predictive maintenance. Fault detection. Bearing. Wavelet transform.

^{*} Graduado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ) *campus* Santo Antônio/MG - Brasil. E-mail: romulo.andrade.reis@gmail.com.

^{**} Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Professor do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ) *campus* Santo Antônio/MG - Brasil. E-mail: viniciusadiniz@ufsj.edu.br.

^{***} Doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Professor do Departamento de Engenharia Mecânica e do Departamento de Engenharia de Produção da Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ) *campus* Santo Antônio/MG - Brasil. E-mail: plamim@yahoo.com.

^{****} Doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Professor do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ) *campus* Santo Antônio/MG - Brasil. E-mail: brito@ufsj.edu.br.

^{*****} Doutor em Engenharia de Estruturas pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), da Universidade de São Paulo (USP). Professor do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) *campus* São Carlos/SP - Brasil. E-mail: christoforoal@yahoo.com.br.

1 Introdução

Com o aumento da competitividade, o mercado exige cada vez mais das indústrias máquinas complexas e sofisticadas, devendo apresentar um alto grau de confiabilidade.

Essas máquinas devem suportar um trabalho contínuo sujeito a altas velocidades e esforços. Com esse elevado nível de produtividade, qualquer parada não programada causa um grande dano.

Entre os vários componentes pertencentes aos diversos equipamentos industriais, destacam-se os mancais de rolamentos que são amplamente utilizados como suporte em máquinas rotativas e suscetíveis a diversas falhas (ZHANG et al., 2015).

Assim, falhas em rolamentos se apresentam como uma das principais causas de falhas em diversas aplicações de engenharia. Os defeitos do rolamento introduzem na vibração do equipamento características bem peculiares que na maioria das vezes não são fáceis de serem evidenciadas (TANDON; CHOUDHURY, 1999). Portanto, uma melhoria na utilização de técnicas adequadas de manutenção torna-se indispensável. O estudo das técnicas de monitoramento de falhas em rolamentos tem sido proposto nos últimos anos (RANDALL; ANTONI, 2011; FELDMAN, 2011, WANG et al., 2013, BORGHESANI et al., 2014); aprimorá-las e desenvolver novas tecnologias significam uma manutenção de melhor qualidade e, conseqüentemente, com menos tempo de horas paradas na planta industrial (BRITO, 2002).

Nessa perspectiva, este trabalho tem por finalidade estudar e diagnosticar falhas em rolamentos montados em uma máquina rotativa através da Transformada *Wavelet Packet* (WPT).

Para tal, foi elaborado um sistema de aquisição de dados utilizando uma placa de aquisição e um acelerômetro, devidamente instalado em motor de indução trifásico, montado em uma bancada experimental de testes. Feito isso, os sinais de vibração foram processados pelo algoritmo da Transformada de *Wavelet Packet*, sendo anteriormente implementados em ambiente computacional (Matlab) para posterior estudo do desempenho das técnicas exploradas.

O método de análise consiste basicamente em decompor o sinal adquirido em bandas de frequências específicas através da WPT e, em seguida, aplicar a Transformada Rápida de Fourier (FFT) às bandas de frequências do sinal, que possam apresentar informações relevantes a respeito de possíveis falhas presentes nos rolamentos que atuam no eixo do motor. A condição normal ou sem defeitos foi usada para comparação com as condições com falhas.

2 Vibrações características de rolamento

Quando um defeito localizado, como *pits*, aparece na superfície de rolamento, surge uma série de vibrações devido ao impacto dos elementos rolantes sobre o defeito.

A taxa de repetição do impacto, denominada “frequência característica de defeito”, está relacionada com a velocidade do eixo, a geometria do rolamento e a localização do defeito, e geralmente apresenta valores baixos de frequência (ALMEIDA; GÓZ, 2000).

A Figura 1 mostra os sinais típicos de vibrações geradas por defeitos localizados em vários componentes de um rolamento, pista externa, interna e esferas.

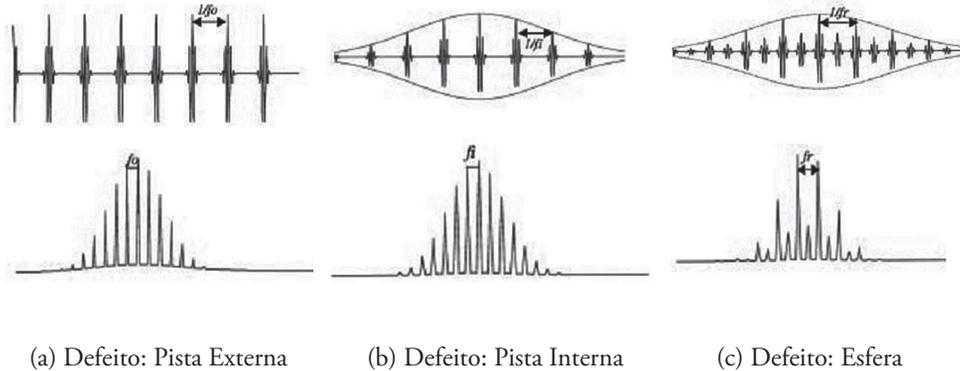


Figura 1: Forma de onda e respectivo espectro de rolamento com defeito

Fonte: SHI et al. (2004)

Se houver um defeito na pista externa, a direção e a amplitude da vibração impulsiva captada pelo sensor ao longo de um ciclo completo se mantêm constante (Figura 1a), porque a posição do defeito é mantida fixa em relação ao sensor durante a rotação, sendo a frequência característica de falha representada por f_0 .

A presença de um defeito na pista interna ou nos elementos rolantes está associada a comportamentos de vibração mais complexos, em comparação com o defeito localizado em uma pista externa. A intensidade da carga e um caminho de transmissão da vibração muda continuamente com a posição relativa entre o defeito e o sensor. Durante um ciclo, quando o defeito gira mais próximo do sensor, a amplitude de oscilação atinge o máximo. Com o aumento da distância entre o sensor e o defeito, a energia da vibração impulsiva captada pelo sensor é atenuada suavemente (Figura 1b), sendo a frequência característica de falha representada por f_i .

Especialmente quando há um defeito em um elemento rolante, o comportamento de vibração torna-se bastante complexo. Em cada ciclo, o contato do defeito tanto com a pista interna como com a pista externa gera dois impactos com diferentes níveis de energia (Figura 1c), sendo a frequência característica de falha representada por f_r .

No entanto, cada tipo de falha em rolamento tem sua própria frequência característica de defeito. Essas frequências podem ser calculadas a partir de relações cinemáticas, velocidade de rotação e geometria do rolamento.

Para um rolamento (Figura 2) com pista externa estacionária, as frequências características (Hz) da pista externa (BPFO - *Ball Pass Frequency Outer Race*), da pista interna (BPFI - *Ball Pass Frequency Inner Race*), do elemento rolante (BSF - *Ball Spin Frequency*) e da gaiola (FTF - *Fundamental Train Frequency*) são dadas respectivamente pelas Equações 1, 2, 3 e 4, onde f_r é a frequência de rotação (Hz), d é o diâmetro da esfera ou do rolo (mm), D é o diâmetro primitivo do rolamento (mm), n é o número de esferas ou rolos e q é o ângulo de contato do rolamento.

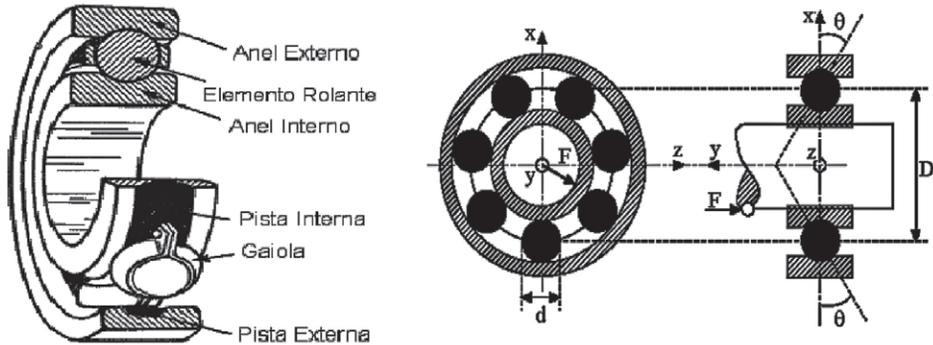


Figura 2: Elementos do rolamento

Fonte: Mesquita (2002)

$$BPFO = \frac{n}{2} f_r \left(1 - \frac{d}{D} \cdot \cos\theta \right) \quad (1)$$

$$BPFI = \frac{n}{2} f_r \left(1 + \frac{d}{D} \cdot \cos\theta \right) \quad (2)$$

$$BSF = \frac{d}{2D} f_r \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2 \cos\theta \right] \quad (3)$$

$$FTF = \frac{1}{2} f_r \left(1 + \frac{d}{D} \cdot \cos\theta \right) \quad (4)$$

3 Transformada de Wavelet

Um dos objetivos da análise de sinais é extrair informação relevante de um sinal, seja ele estacionário ou não. Isso é normalmente feito usando alguma transformação. Para sinais estacionários a análise espectral ou Transformada de Fourier (FT) é extremamente útil, pois a frequência do sinal é de grande importância.

A análise dos coeficientes $X(f)$ define a frequência global do sinal $f(x)$. Há muitos sinais não estacionários e transientes, tais como o impacto, choque, início e fim de eventos, entre outros. Esses sinais têm características que são muitas vezes a parte mais importante do sinal, e a Transformada de Fourier não é adequada para detectá-los (RIOUL; VETTERLI, 1991; LEE et al., 1999). Como forma de contornar as restrições da Transformada de Fourier, surge a Transformada *Wavelet* (WT), consistindo em uma técnica que permite que um sinal seja analisado com boa resolução no domínio do tempo e da frequência. A análise de Fourier consiste em decompor um sinal como se ele fosse formado pelo somatório de ondas senoidais de diferentes frequências. De forma análoga, a análise por *wavelets* é a decomposição de um sinal em versões “deslocadas” e “escaloadas” da *wavelet* original ou também conhecidas como *wavelets* mãe, sendo que existem muitas *wavelets* padrões (família de *wavelets*) que podem ser usadas.

A transformada de *wavelet* foi desenvolvida como uma alternativa à transformada de Fourier de tempo curto (STFT) visando solucionar o problema da resolução. A análise com *wavelets* é feita similarmente à análise com STFT, no que diz respeito à multiplicação do sinal por uma função (que neste caso será a *wavelet* mãe e não mais uma janela, como na STFT). A transformada é calculada separadamente por segmentos diferentes do sinal no domínio do tempo (OLIVEIRA, 2007).

Ao se analisar funções *wavelets* e ondas senoidais é possível deduzir intuitivamente que sinais com mudanças abruptas são potencialmente melhor analisados com uma típica e irregular *wavelet* do que com uma suave senoide, (MALLAT, 1998; MAMEDE, 1997).

4 Transformada de Wavelet Packet

O uso da Transformada Discreta de *Wavelet* (DWT) é importante, permitindo a discretização da *wavelet* numa escala baseada na potência de dois, ou seja, na escala chamada de diádica. O uso dessa escala torna a implementação computacional mais rápida e a análise dos dados bastante eficiente. Na Equação 5 tem-se a DWT definida por (CHUI, 1992), onde, $\psi_{j,k}(t) = (1/\sqrt{2^j})\psi((t - k2^j)/2^j)$ são funções *wavelets* ortogonais, as quais constituem uma base ortonormal de $L^2(\mathbb{R})$ (DAUBECHIES, 1988).

$$DWT(j, K) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot \psi_{j,k}^*(t) dt, j, k \in \mathbb{Z} \quad (5)$$

Semelhante à Transformada Rápida de Fourier (FFT), existe um algoritmo para implementação da DWT baseado na decomposição Rápida da Transformada de *Wavelet* (FWT), conhecido como Análise de Multiresolução (MRA) ou Algoritmo Piramidal de Mallat, o qual foi desenvolvido por Mallat em 1988 (MISITI et al., 1997; MALLAT, 1989).

Esse algoritmo utiliza um processo especial de filtragem para decompor o sinal, onde o conteúdo do sinal em baixa frequência é chamado de *aproximação*, e o de alta

frequência, de *detalhe*. Esse processo de filtragem decompõe o sinal original S em dois componentes, chamados de aproximações A e detalhes D , podendo ser interpretados como filtros passa-baixa e passa-alta respectivamente (Figura 3).

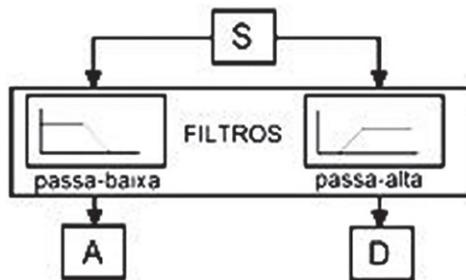


Figura 3: Diagrama esquemático da análise de multirresolução

Fonte: Santiago (2004)

Resumindo, a teoria de multirresolução permite decompor um sinal conforme descrito a seguir. Inicialmente, um sinal original discreto é decomposto no primeiro nível em duas componentes $A1$ e $D1$ por um filtro passa-baixa e um passa-alta, respectivamente. O $A1$ é chamado de aproximação do sinal e $D1$, de detalhe do sinal. Para o segundo nível, a aproximação $A1$ é agora decomposta em uma nova aproximação $A2$ e um detalhe $D2$. Esse procedimento pode ser repetido para o terceiro nível, quarto, etc.

Por outro lado, a Transformada de *Wavelet Packet* (WPT) é uma generalização da transformada discreta de *wavelet*. Enquanto a DWT (Figura 3) decompõe o sinal somente em baixas frequências, a WPT apresentada na Figura 4 decompõe o sinal em baixas e altas frequências. Cada vetor A_j possui $Nt/2^j$ coeficientes, sendo N_t o comprimento do sinal S , fornecendo informação a respeito de uma banda de frequência $[0, F_s/2^{j+1}]$ sendo F_s a frequência de amostragem do sinal (SANTIAGO, 2004). Como exemplo, no nível três $j=3$ existem 8 nós ou *packets*. Um vetor de coeficientes $c_{j,k}$ da *wavelet packet* corresponde a cada nó e o seu comprimento é aproximadamente $N_t/2^j$.

Os nós contêm informação do sinal original em diferentes bandas de frequências. Por exemplo, se a frequência de amostragem do sinal é 16000 Hz , então a banda de frequência de análise relacionada ao vetor $c_{0,0}$ é de $0-8000\text{ Hz}$, para $c_{1,0}$ de $0-4000\text{ Hz}$, para $c_{1,1}$ de $4000-8000\text{ Hz}$ e para $c_{3,0}$ de $0-1000\text{ Hz}$, e assim por diante (Figura 4). Uma vantagem da WPT durante a decomposição do sinal é que ela permite analisar as informações contidas no sinal, sejam elas estacionárias ou não estacionárias, em diferentes resoluções tempo-frequência. Outra vantagem da WPT diz respeito à compactação da informação contida no sinal. Por exemplo, para $j=3$ e $Nt=1024$ amostras, o vetor $c_{3,0}$ possui $N_t/2^j = 128$ amostras e banda de frequência igual a $0-1000\text{ Hz}$.

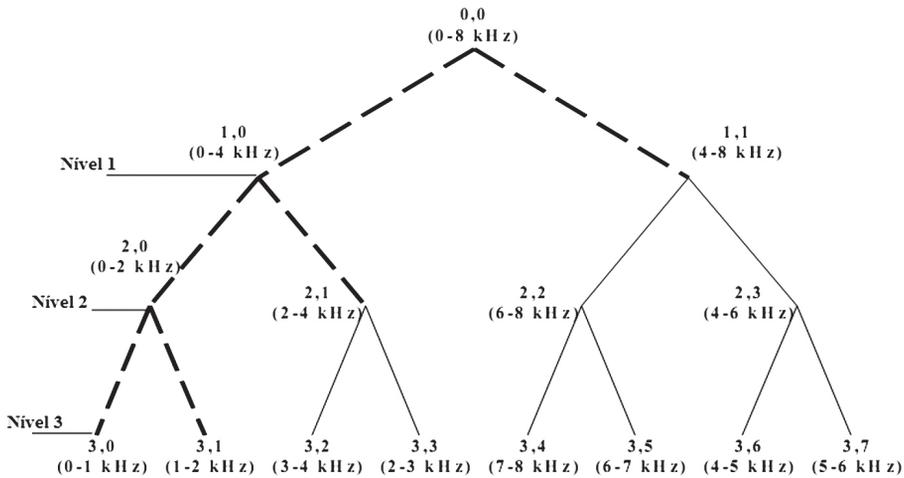


Figura 4: Árvore da *Wavelet Packet*

Fonte: Nikolaou e Antoniadis (2001)

É importante observar que a Árvore da *Wavelet Packet* inverte a ordem de alguns nós, por isso antes que se realize a transformada de Fourier deve-se inverter o eixo do tempo nos nós para se obter uma análise correta.

Nota-se que cada *packet* da WPT retém informação do sinal original de forma compacta. Esse fato é muito importante na análise e processamento de sinais (ZHANG, 1996), principalmente na área de diagnóstico de falhas, permitindo reter informação do sinal somente na banda de frequência onde as frequências de falhas aparecem. Na prática, normalmente escolhem-se os *packets* que retêm mais informação do sinal original e se descartam os *packets* que contêm ruídos e informações menos importantes. Um critério bastante usado para seleção dos nós é o critério baseado na quantificação da energia contida no sinal (ZHANG, 1996).

Neste trabalho utiliza-se a fórmula da entropia normalizada de Shannon para estimar o nó da *wavelet packet* relevante para a análise (MISITI et al., 1997), a qual é dada pela Equação 6, onde s é o sinal e s_i é a amostra do sinal no instante i .

$$E_n(s) = - \sum_i (s_i)^2 \log(s_i)^2 \quad (6)$$

A entropia de Shannon é uma técnica que quantifica a energia contida no sinal, o que permite selecionar somente os nós que apresentam conteúdo significativo para análise.

Portanto, conclui-se que a aplicação da Transformada de *Wavelet Packet* baseada na quantificação da energia do sinal original em bandas de frequências específicas permite a extração e a obtenção de informações bastante compactas e selecionadas.

5 Material e métodos

O método proposto utilizando a decomposição por *Wavelet Packet* deve passar pelos seguintes passos até chegar ao diagnóstico propriamente dito:

1. A ideia de se utilizar a Transformada de *Wavelet Packet* em análise de sinais é que ela é capaz de separar o sinal em faixas de frequência de acordo com as frequências de interesse, como discutido anteriormente. No caso, os rolamentos da série 6205 apresentam frequência característica de falha na pista externa (BPFO) de aproximadamente 108 Hz, 163 Hz para falha na pista interna (BPF1), 71 Hz para falha nos elementos rolantes (BSF) e 12 Hz para defeitos na gaiola do rolamento (FTF), isso para uma rotação do eixo do motor de 1800 RPM. Assim, para facilitar a análise no final, deve-se escolher uma divisão da Árvore da *Wavelet Packet* de tal maneira que essas frequências e seus dois primeiros harmônicos fiquem dentro de uma mesma banda de frequência. Para isso utiliza-se a Equação 7, em que F_j é o range de frequência do nó, J é o nível de decomposição da árvore e F_s é frequência de amostragem do sinal. Ressalta-se que a análise do rolamento em questão requer uma banda que inclua uma frequência pelo menos 500 Hz para termos até o terceiro harmônico de falha.

$$F_j = F_s / 2^{J+1} \quad (7)$$

2. O passo seguinte consiste em selecionar os nós da árvore da WPT que são relevantes para o diagnóstico, ou seja, os nós que contêm as frequências que indicam falha. Essa escolha é feita a partir de algum critério de seleção. Neste trabalho, por destacar de modo mais evidente o nó, optou-se por usar o Critério da Entropia de Shannon (Equação 6). Neste trabalho constatou-se que foi melhor deixar todas as frequências de falhas do rolamento juntas no primeiro *packet* por facilitar a visualização das frequências e seus harmônicos.
3. Os sinais do nó gerado pelos impactos dos elementos rolantes na pista externa do rolamento muitas vezes não ficam tão evidentes como o apresentado na Figura 1a, em razão do sinal captado apresentar muitos ruídos e componentes que são causados por algum outro motivo. Porém, quando se realiza a FFT do nó, neste caso o primeiro nó da WPT, os picos transientes do sinal causado pelo rolamento apresentam amplitudes menores do que as outras frequências que também compõem o sinal original. Por isso é necessário retificar o sinal que sai da WPT para se evidenciar os defeitos nos rolamentos. Isso é feito elevando cada elemento que a *Wavelet Packet* produz ao quadrado. Assim, logo após a retificação, a Transformada de Fourier pode ser aplicada. Esses passos são representados pelo diagrama esquemático apresentado, Figura 5.



Figura 5: Diagrama de elaboração do diagnóstico em rolamentos usando a WPT

O método proposto consiste em dividir o sinal em bandas de frequências com a *Wavelet Packet* WPT. Logo após, selecionam-se os nós ou *packets* que apresentem informações relevantes a respeito do sinal, através do critério da Entropia de Shannon. Sabendo qual ou quais nós representam melhor as características do sinal, realiza-se a FFT desses nós, para assim evidenciar quais as frequências características de falha. Neste estudo, utilizou-se a wavelet do tipo db10, da família Daubechies dbN (MISITI et al., 1997) já implementada e disponibilizada no *toolbox* de *wavelet* do *software* Matlab®.

A Figura 6 apresenta a bancada experimental de testes montada para a realização dos testes.

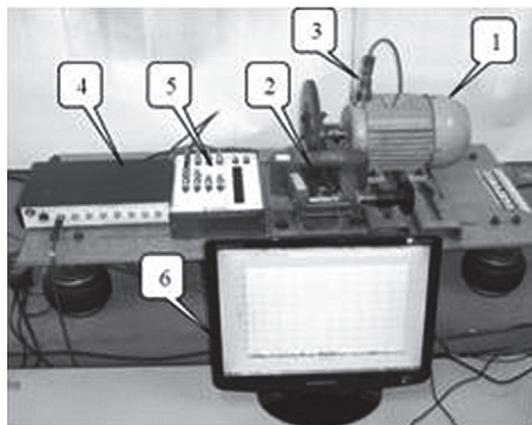


Figura 6: Bancada experimental

A bancada é constituída por um motor de indução trifásico Weg- 0596 EJ94209 {1}, 2 CV, 2 polos, 1800 RPM, 60 Hz, 6,9 A, e por um freio mecânico Twiflex da Tec Tor {2}.

Para aquisição e tratamento dos sinais foi elaborado um programa no *software* Matlab 7.7.0 (R2009b). O acelerômetro CMSS2200 SKF {3} foi o instrumento utilizado para emitir os sinais de vibração gerados na bancada. Para condicionamento desses sinais foi utilizado um filtro *anti-aliasing* passa-baixa de 5.^a ordem {4} trabalhando com uma faixa de corte de 4 kHz. Posteriormente, os sinais foram convertidos em sinais digitais pela placa de aquisição da *National Instruments* modelo NI 6251 {5}, sendo analisados com a suíte aplicativa de *wavelet* do *software* Matlab {6}.

Os testes foram realizados em rolamentos da série 6205 da SKF (Figura 7). Foram analisados rolamentos apresentando defeito na pista externa (BPFO), na pista interna (BPFI), na gaiola (FTF), e sem falha.



Figura 7: Rolamento 6205

Fonte: SKF (1997)

6 Resultados e discussão

A Figura 8 ilustra o resultado do método aqui proposto, consistindo na FFT da decomposição do sinal pela Transformada de *Wavelet* aplicado ao sinal de vibração de um rolamento em perfeitas condições. Para uma taxa de aquisição de 40 *kHz*, o 3.º nível, que apresenta um intervalo de frequência que varia entre 0 e 2500 *Hz*, foi o que se mostrou mais adequado para a decomposição. O primeiro nó foi o que apresentou maior nível de energia segundo o critério da Entropia de Shannon. Percebe-se que não há frequências características de falha e que o nível global de vibração é baixo.

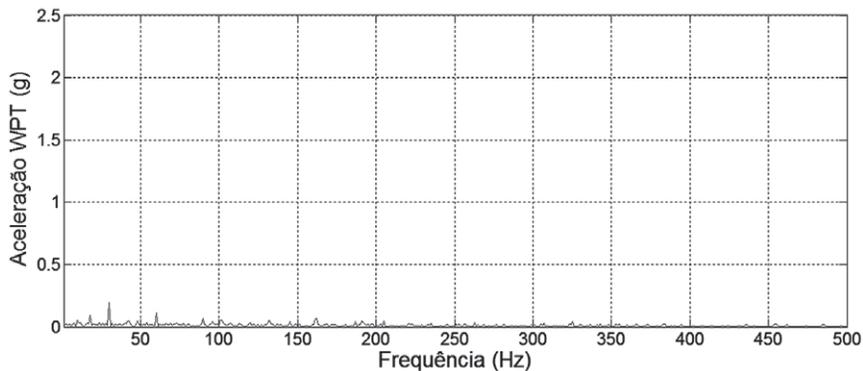


Figura 8: FFT do nó (3,0) da WPT - Condição Sem Falha

A Figura 9 ilustra a FFT da decomposição do sinal pela Transformada de *Wavelet*, onde há evidências da frequência característica de falha na gaiola do rolamento. Pode-se verificar a presença da frequência característica de falha 12 *Hz*, percebendo-se também que o nível global de vibração é mais elevado em relação à condição sem defeito.

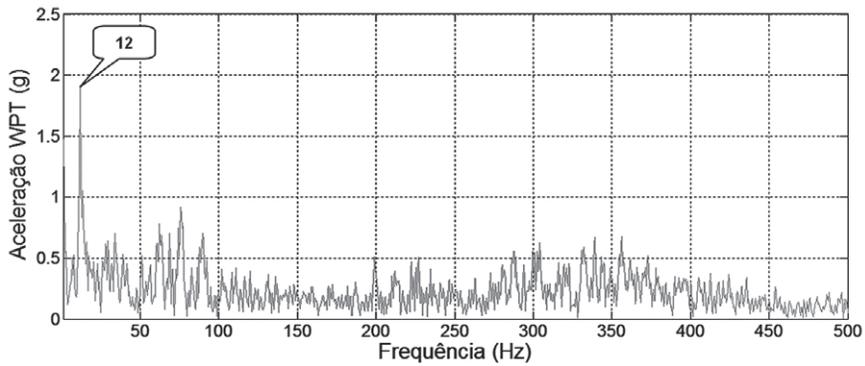


Figura 9: FFT do nó (3,0) da WPT – Defeito na Gaiola (FTF)

A Figura 11 apresenta a FFT da decomposição do sinal pela Transformada de *Wavelet*, onde há evidências da frequência característica de falha de pista externa do rolamento (Figura 10). Verifica-se a presença da frequência característica de falha e seus harmônicos de 108 *Hz*, 216 *Hz* e 324 *Hz*.

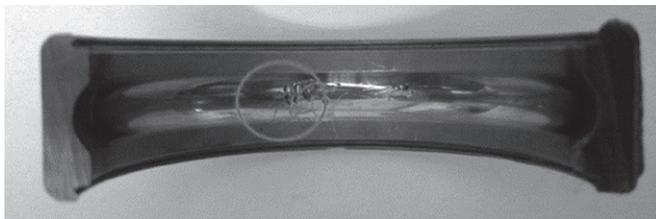


Figura 10: Detalhe da falha inserida na pista externa do rolamento SKF 6205

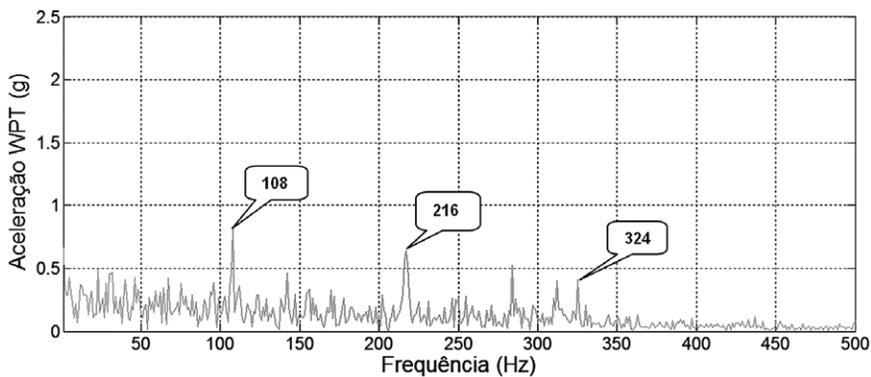


Figura 11: FFT do nó (3,0) da WPT – Defeito na Pista Externa (BPFO)

A Figura 13 ilustra a FFT da decomposição do sinal pela Transformada de *Wavelet* em que há evidências da frequência característica de falha de pista interna do rolamento (Figura 12). Pode-se verificar a presença da frequência característica de falha e seu primeiro harmônico de 162 Hz e 324 Hz .

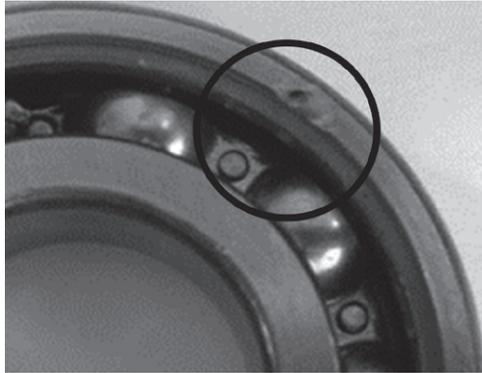


Figura 12: Detalhe da falha inserida na pista externa do rolamento SKF 6205

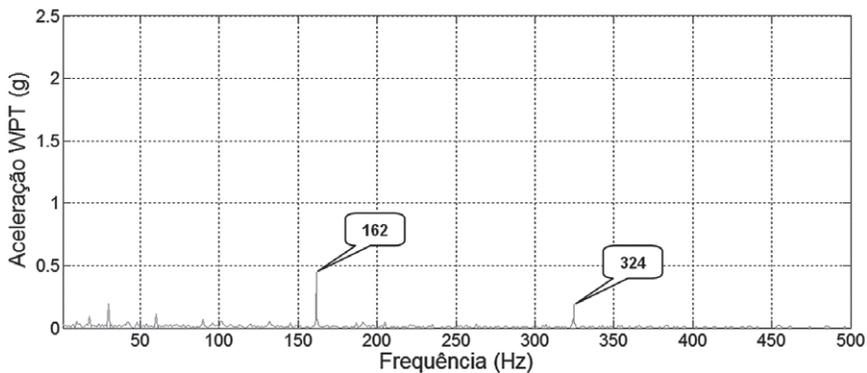


Figura 13: FFT do nó (3,0) da WPT – Defeito na Pista Interna (BPFI)

A Figura 14 apresenta a FFT da decomposição do sinal pela Transformada de *Wavelet* do rolamento apresentando defeito. Pode-se verificar a presença da frequência característica de falha e seus harmônicos de 108 Hz , 216 Hz e 324 Hz . Percebe-se também que o nível global de vibração é mais elevado em relação à condição sem defeito. Nota-se ainda a presença de indícios de falha na gaiola nas frequências de 12 Hz , 24 Hz e 36 Hz com amplitudes menores.

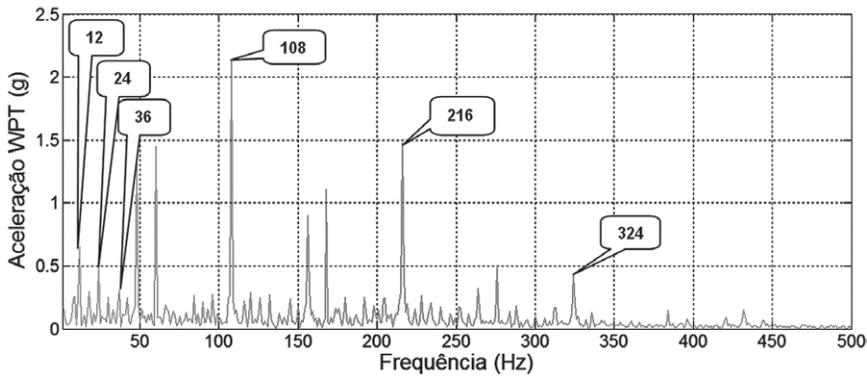


Figura 14: FFT do nó (3,0) da WPT – Defeito na Pista Externa (BPFO) e na Gaiola (FTF)

7 Conclusão

Os resultados obtidos mostram a potencialidade da técnica *Wavelet*, sendo possível identificar diferentes tipos de falha em rolamentos.

A análise baseada na decomposição de um sinal através da Transformada de *Wavelet Packet* (WPT) e na quantificação da energia do sinal em bandas de frequências específicas permite a extração e a obtenção de informações bastante compactas, permitindo também evidenciar claramente os defeitos introduzidos nos rolamentos.

A retenção da informação do sinal original de forma compacta pela WPT é muito importante na análise e processamento de sinais, principalmente na área de diagnóstico de falhas, podendo-se reter informação do sinal somente na banda onde as frequências do defeito aparecem, descartando-se os *packets* que contêm ruído e informações menos importantes, o que torna o processamento dos dados mais rápidos.

A Transformada de *Wavelet* associada à Transformada de Fourier é uma ferramenta mais adequada para se trabalhar com sinais de natureza transiente como os defeitos em rolamentos. Por se tratar de uma ferramenta ainda não muito difundida e muito abrangente, a Transformada de *Wavelet* pode vir a ser estudada futuramente, apresentando soluções mais precisas e satisfatórias que as oferecidas pelas atuais técnicas de processamento de sinais.

A nova metodologia de diagnósticos de falhas apresentada nesse trabalho mostrou-se eficiente, podendo ser incorporada em conjunto às técnicas preditivas no monitoramento de máquinas rotativas, aumentando a confiabilidade e a disponibilidade dos equipamentos inspecionados.

Agradecimentos

Os autores expressam seus agradecimentos à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro necessário ao desenvolvimento desta pesquisa.

Referências

- ALMEIDA M.T.; GÓZ, D.S. *Análise de Vibrações II: Rolamentos e Engrenagens*. Itajubá, MG: Fundação de Pesquisa e Assessoramento à Indústria, 2000. p. 102-106.
- BORGHESANI, P.; PENNACCHI, P.; CHATTERTON, S. The relationship between kurtosis based indexes for the diagnostic of rolling element bearings. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 43, p. 25-43, 2014.
- BRITO, J. N. *Desenvolvimento de um Sistema Inteligente Híbrido para Diagnóstico de Falhas em Motores de Indução Trifásicos*. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.
- CHUI, C. K. *Wavelet Analysis and Its Applications: an Introduction to Wavelets*. Boston: Academic Press, 1992. v. 1.
- DAUBECHIES, I. Orthonormal Bases of Compactly Supported Wavelets. *Comm. Pure Applied Mathematics*, v.41, p. 909-996, 1988.
- FELDMAN, M. Hilbert transform in vibration analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 25, p. 735-802, 2011.
- HANSELMAN, D.; LITTLEFIELD, B. *Matlab 6.5: release 13 Curso Completo*. 1.^a ed. São Paulo: Makron Books, 2004.
- IEEE Tencon. 1999. p. 1547-1550.
- LEE, J.J.; LEE, S.M.; KIM, I.Y.; MIN, H. K.; HONG, S.H. *Comparison Between Short-Time Fourier and Wavelet Transform for Feature Extraction of Heart Sound*.
- MALLAT, S.G.A. *Wavelet Tour of Signal Processing*. San Diego, USA: Academic Press, 1998.
- MAMEDE, W. F. *Análise de Falhas em Redutores Utilizando Transformada de Wavelet*. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 1997.
- MESQUITA, A.L.A.; SANTIAGO, D.F.A.; BEZERRA, R.A.; MIRANDA, U.A.; DIAS, M.; PEDERIVA, R. Detecção de Falhas em Rolamentos Usando Transformadas Tempo-Frequência: Comparação com Análise de Envelope. *Mecânica Computacional*, v. 21, p. 1938-1954, 2002.
- MISITI, M.; MISITI, Y.; OPPENHEIN, G.; POGGI, J. M. *Wavelet Toolbox: User's Guide*. The MathWork, Inc, 1997.

- NIKOLAOU, N.G.; ANTONIADIS, I.A. Rolling element bearing fault diagnosis using wavelet packets. *JNDT&E*, v. 35, p. 197-205, 2002.
- OLIVEIRA, H. M. *Análise de Sinais Para Engenheiros: Uma Abordagem Via Wavelet*. 2007. p. 26.
- RANDALL, R. B.; ANTONI, J. Rolling element bearing diagnostics: a tutorial. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 25, p. 485-520, 2011.
- RIOUL, O.; VETTERLI, M. Wavelets and Signal Processing. *IEEE, SP Magazine*, p. 14-38, 1991.
- SANTIAGO, D. F. A. *Diagnóstico de Falhas em Máquinas Rotativas Utilizando Transformada de Wavelet e Redes Neurais Artificiais*. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, 2004.
- SHI, D. T.; WANG, W. J.; QU, L. S. Defect Detection for Bearings Using Envelope Spectra of Wavelet Transform. *Journal of Vibration and Acoustics*, v.126, p. 567- 573, 2004.
- SKF. *Manual SKF de Manutenção de Rolamentos*, 1997.
- TANDON, N.; CHOUDHURY, A. A Review of Vibration and Acoustic Measurement Methods for the Detection of Defects in Rolling Element Bearings. *Tribology International*, v. 32, p. 469-480, 1999.
- WANG, D.; TSE, P.W.; TSUI, K.L. An enhanced kurtogram method for fault diagnosis of rolling element bearings. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 35, p. 176-199, 2013.
- ZHANG, S.; GANESAN, R.; XISTRIS, G. D. Neural Networks for Automated Machinery Monitoring Systems. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v.10, n.5, p. 517-532, 1996.
- ZHANG, W.; QIN, Z.Y.; CHU, F. L.; Envelope calculation of the multi-component signal and its application to the deterministic component cancellation in bearing fault diagnosis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 50-51, p. 70-100, 2015.

Artigo recebido em: 16 abr. 2015

Aceito para publicação em: 19 nov. 2015