

DETECÇÃO DE FALHAS EM ROLAMENTOS USANDO TRANSFORMADAS TEMPO-FREQÜÊNCIA – COMPARAÇÃO COM ANÁLISE DE ENVELOPE

**Alexandre L. A. Mesquita, Darley F. A. Santiago, Roberto A. Bezerra, Ubatan A.
Miranda, Milton Dias Jr e Robson Pederiva**

Departamento de Projeto Mecânico, DPM - Faculdade de Engenharia Mecânica, FEM
Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP
Caixa Postal 6122, Campinas, São Paulo, Brasil, CEP 13083-970
e-mail: amarante@fem.unicamp.br

Palavras-chave: Tempo-Freqüência, Transformada de Wavelet, Distribuição de Wigner, Mancais de Rolamento, Análise de Envelope.

Resumo. *Defeitos em rolamentos são causas comuns de falhas em máquinas rotativas. Portanto, faz-se necessário a aplicação de técnicas que permitam a detecção e a localização do problema o mais cedo possível a fim de evitar a destruição do rolamento e conseqüentemente a parada da máquina. Durante as últimas décadas, algumas técnicas de análise de sinais de vibração foram desenvolvidas com o intuito de diagnosticar falhas em rolamentos, tais como Fator de Crista, Curtose, Análise Espectral e Análise de Envelope. Recentemente, novas técnicas de análise de sinais foram desenvolvidas e aplicadas na área de identificação de defeitos, tais como as transformadas tempo-freqüência, que permitem a descrição do conteúdo de energia do sinal simultaneamente nos domínios do tempo e da freqüência. Este trabalho apresenta resultados de simulações numéricas de falhas em mancais de rolamento e a aplicação de três métodos de diagnóstico de falhas: a tradicional análise de Envelope, e duas transformadas tempo-freqüência - a Transformada de Wavelet (WT) e a Distribuição Pseudo-Wigner (DPW). Os resultados de cada metodologia são discutidos e comparados.*

1 INTRODUÇÃO

Desde que mancais de rolamento são bastante usados em máquinas rotativas, as falhas nos mesmos devem ser detectadas o mais cedo possível para evitar danos na máquina e, conseqüentemente, a perda de produção. Portanto, o processo de monitoramento do estado dos rolamentos deve receber uma atenção especial no plano de manutenção de qualquer indústria.

Nas últimas décadas, vários métodos de análise de vibrações têm sido implementados para a detecção de falhas em rolamentos. Estes métodos podem ser agrupados em técnicas no domínio do tempo e no domínio da frequência. Recentemente, com o desenvolvimento da área de processamento de sinais, novas técnicas têm sido implementadas no domínio conjunto do tempo e da frequência, através do uso das transformadas tempo-frequência.

Este trabalho apresenta simulações numéricas de três tipos de sinais de vibração em um rolamento. Primeiramente, considera-se que este está em bom estado, e em seguida, são analisadas duas condições de falha na pista interna: uma em que esta pista está girando e outra em que permanece estacionária. Em seguida são aplicados três métodos de diagnóstico de falhas em rolamentos: o método tradicional de envelope de aceleração e dois tipos de transformadas tempo-frequência - a Transformada de Wavelet e a Distribuição Pseudo-Wigner. Os resultados de cada metodologia são discutidos e comparados.

2 MÉTODOS TRADICIONAIS DE IDENTIFICAÇÃO DE DEFEITOS EM ROLAMENTOS POR MONITORAMENTO DE VIBRAÇÕES

Pode-se classificar os métodos de monitoramento do estado do rolamento, através de análise de vibrações, em três classes conforme o domínio em que o sinal é tratado. Têm-se os métodos no domínio do tempo, métodos no domínio da frequência e os mais recentes métodos no domínio conjunto tempo-frequência. Neste capítulo, os métodos no domínio do tempo e da frequência são revisados. Maior ênfase é dada no método do Envelope de Aceleração, pois é um dos métodos mais utilizados na indústria. No capítulo seguinte os métodos no domínio tempo-frequência são discutidos.

O método mais simples no domínio do tempo é a Medição do Nível Global RMS. Estes níveis são medidos e comparados com valores tabelados para indicar a severidade da vibração. Esta técnica não localiza o defeito, apenas dá uma indicação que está havendo um aumento de energia no sinal, que pode ser causado pelo desenvolvimento da falha. Nos estágios iniciais do defeito o nível RMS pode não ser afetado¹.

O Fator de Crista é definido como a razão do nível do pico da vibração pelo nível RMS, medidos em uma banda de frequência. Este método parte do princípio que quando o rolamento sofre um dano, o nível de pico da aceleração aumenta mais rapidamente do que o nível RMS. Na vibração normal do rolamento, sem defeitos, o fator de crista é baixo, de 2 a 6. Com o surgimento e evolução das falhas, o fator de crista atinge valores altos, acima de 6. Quando as falhas deixam de ser localizadas e se espalham pelas superfícies do rolamento, os picos discretos desaparecem e o nível RMS vai crescendo, fazendo com que diminua o fator de crista, indicando a necessidade troca do rolamento^{2,3}.

A Densidade de Probabilidade do sinal de aceleração de um rolamento também pode ser usada para a detecção de falhas em rolamentos. Um rolamento em boas condições possui uma distribuição Gaussiana de aceleração, enquanto que o rolamento defeituoso produz uma distribuição não-gaussiana devido ao aumento no número dos altos níveis de aceleração¹.

Vários momentos estatísticos podem ser usados para indicar a forma da densidade de probabilidade. Dyer e Stewart⁴ propuseram o Fator de Curtose, que é o quarto momento estatístico, normalizado em relação ao desvio padrão elevado a quarta potência. Ou seja:

$$K = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} (x - \bar{x})^4 p(x) dx}{\sigma^4} \quad (1)$$

sendo $p(x)$ a função de densidade de probabilidade e \bar{x} é o valor médio do sinal de vibração $x(t)$. O Fator de Curtose obtido para mancais em bom estado é igual a 3. Porém, com o surgimento e desenvolvimento da falha, os valores deste fator tendem a aumentar⁵.

Em geral, os métodos no domínio do tempo alertam para o surgimento e o desenvolvimento da falha, contudo, não permitem um diagnóstico preciso e não localizam o defeito. Por outro lado, os métodos no domínio da frequência possuem a capacidade de indicar a localização da falha. Teoricamente, usando a técnica convencional de Análise Espectral via FFT, o espectro de frequências do sinal de vibrações, medido no mancal do rolamento, pode revelar as frequências características de componentes do rolamento que estão defeituosos.

As falhas nos rolamentos tipicamente ocorrem devido a defeitos localizados na pista externa, pista interna, nos elementos rolantes ou na gaiola que direciona os elementos rolantes (ver Figura 1a). Estes defeitos geram uma série de impactos de vibração devido ao choque dos elementos rolantes com a superfície do defeito. Estas vibrações ocorrem em frequências características, que são estimadas em função da velocidade da rotação do eixo e da geometria dos componentes do rolamento. Estas frequências são denominadas de frequências características dos defeitos (FCDs).

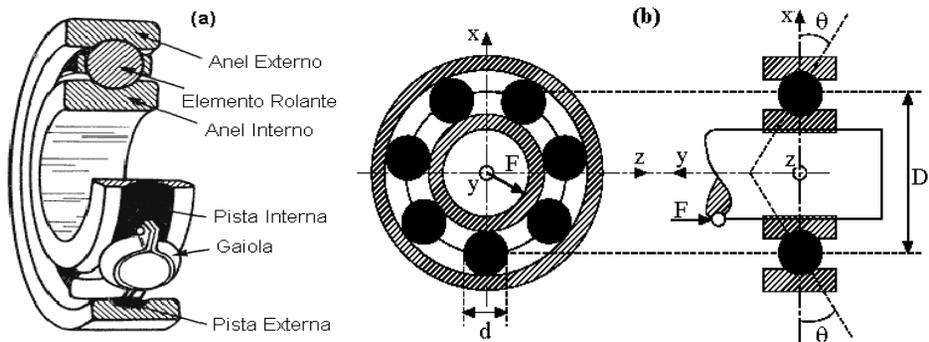


Figura 1: (a) Componentes de um Rolamento. (b) Quantidades Representando as Dimensões do Rolamento⁶.

Na maioria dos casos a pista externa é fixa e a pista interna gira junto com o eixo de rotação da máquina. As fórmulas das frequências características dos rolamentos, para pista externa fixa, são as seguintes:

$$\begin{aligned}
 FTF &= \frac{f_r}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \theta \right) & BPF I &= \frac{N}{2} f_r \left(1 + \frac{d}{D} \cos \theta \right) \\
 BPFO &= \frac{N}{2} f_r \left(1 - \frac{d}{D} \cos \theta \right) & BSF &= \frac{D}{2d} f_r \left[1 - \left(\frac{d}{D} \cos \theta \right)^2 \right]
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

sendo *FTF* (“fundamental train frequency”) a frequência de defeito na gaiola, *BPF I* (“ball pass frequency of the inner race”) a frequência de defeito na pista interna, *BPFO* (“ball pass frequency of the outer race”) a frequência de defeito na pista externa, e *BSF* (“ball spin frequency”) a frequência do elemento rolante.

As quantidades geométricas e físicas que juntamente com a velocidade de rotação são necessárias para o cálculo das frequências dos defeitos são: o número de elementos rolantes, *N*, o diâmetro destes elementos, *d*, o diâmetro médio do rolamento, *D*, e o ângulo de contato, θ . Estas quantidades estão mostradas na Figura 1b.

As expressões das FCDs são baseadas na consideração de movimento rolante puro. Contudo, na realidade algum deslizamento pode ocorrer causando leve desvio nos valores das frequências características. Portanto, estas equações devem ser consideradas apenas como uma aproximação do valor real⁷.

O método da análise espectral consiste em calcular as FCDs, fazer a medição do sinal de vibração do rolamento e então obter o espectro de frequências. Comparando-se as frequências identificadas no espectro com as FCDs calculadas, pode-se determinar se está havendo um defeito no rolamento e qual componente está defeituoso.

Uma vez que a vibração dos impactos (no defeito) possui, relativamente, baixa energia e considerando que, no espectro, as FCDs podem ser mascaradas por ruído e vibrações geradas por outros elementos da máquina, muitas vezes torna-se difícil identificar as frequências dos defeitos em uma análise espectral tradicional. Outro problema que surge na análise espectral é que devido a pequenas variações na velocidade rotacional, os picos correspondentes às FCDs são espalhados (“smeared”) em linhas espectrais adjacentes e têm seus níveis de amplitudes reduzidos, dificultando mais ainda a identificação das FCDs⁷. Portanto, outros métodos no domínio da frequência foram desenvolvidos. O mais utilizado na indústria é o envelope de aceleração, que será visto em detalhes na seção seguinte.

3 ANÁLISE DE ENVELOPE ATRAVÉS DA TRANSFORMADA DE HILBERT

Como já mencionado, as FCDs, em geral, são difíceis de serem detectadas em uma simples análise espectral. Contudo, os impactos oriundos do defeito do rolamento causam vibração que excita alguma ressonância de algum componente do rolamento ou da máquina. Estes componentes têm frequência muito mais alta que a faixa de frequência em que, geralmente,

surgem as FCDs. No espectro, a frequência de ressonância surge flanqueada por bandas laterais (“sidebands”).

Estas bandas laterais surgem nos espectros devido a uma modulação no sinal, que pode ser na amplitude (AM) (Figura 2) ou na frequência (FM). Modulação na amplitude é uma variação de amplitude em um sinal de frequência constante, enquanto que modulação na frequência é uma variação em frequência de um sinal de amplitude constante.

Além disto, tais bandas laterais nos sinais de vibração em rolamentos defeituosos surgem em torno de uma frequência de ressonância (frequência portadora). Modulações em amplitude são comuns nestes sinais. Frequências naturais podem ser moduladas em amplitude pela frequência do defeito, e esta, por sua vez, pode ser modulada pela frequência da rotação da máquina, devido à variação da amplitude de vibração quando o defeito na pista interna, ou do elemento rolante, entra e sai da zona de carga (Figura 3).

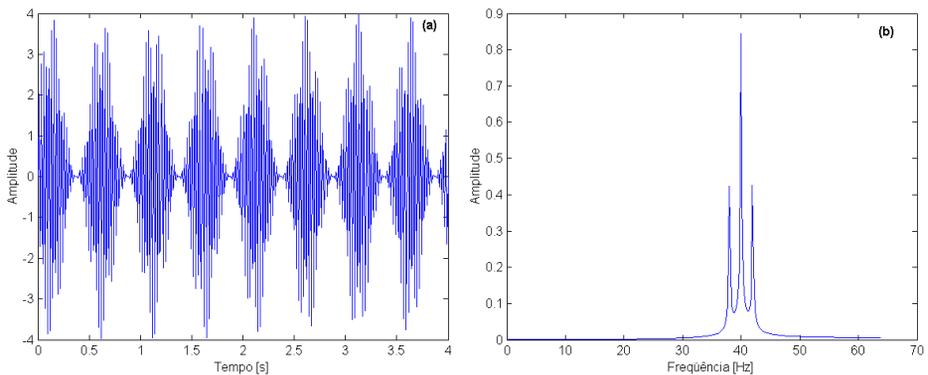


Figura 2: (a) Sinal com Frequência Portadora, f_p , de 40 Hz Modulado em Amplitude com Frequência Moduladora, f_m , de 2 Hz. (b) Espectro Mostrando a Frequência Portadora e as Bandas Laterais que Correspondem a 38 Hz ($f_p - f_m$) e 42 Hz ($f_p + f_m$).

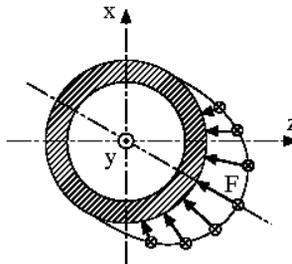


Figura 3: Distribuição de Carga em um Rolamento⁶.

O método do envelope de aceleração consiste primeiramente em filtrar o sinal de aceleração por um filtro passa-banda em torno da frequência de uma ressonância para

eliminar as outras frequências, tais como as frequências geradas por desbalanceamento do eixo, engrenamento, ruído, e outras. O sinal de banda estreita remanescente, no domínio do tempo, consiste nas respostas às seqüências de impactos. O centro da frequência de corte do filtro passa-banda deve coincidir com a frequência de ressonância. A largura de banda deve ser pelo menos duas vezes a mais alta frequência característica de defeito calculada. Isto garantirá que o filtro deixará passar a frequência portadora e pelo menos um par de bandas laterais de modulação. Na prática, a largura de banda deve ser selecionada de modo a conter os dois primeiros pares de bandas laterais em torno da frequência portadora².

A frequência de ressonância não é de interesse, mas sim a moduladora FCD. Portanto a FCD deve ser extraída do sinal por algum processo de demodulação. Em um processo digital, esta demodulação consiste em aplicar a transformada de Hilbert no sinal filtrado no domínio do tempo, para obter o contorno (envoltório ou envelope) das respostas. Através deste contorno, pode-se medir a frequência dos impactos, que é a mesma frequência do defeito, ou seja, o inverso do espaçamento das respostas aos impactos. O espectro do envoltório do sinal filtrado mostrará a frequências do defeito e seus harmônicos – o espectro do envelope. A Figura 4 ilustra as etapas do método.



Figura 4: Etapas do Método de Envelope de Aceleração de Vibração.

Esta técnica é aplicada facilmente para detecção de defeitos na pista externa, mas para defeitos na pista interna e nos elementos rolantes, muitas linhas adicionais surgem no espectro devido à modulação com a rotação, dificultando a análise⁸.

4 TRANSFORMADAS TEMPO-FREQÜÊNCIA

4.1 Considerações Iniciais

Em geral, o monitoramento de máquinas e equipamentos é realizado através da obtenção dos sinais de vibração da máquina operando a uma velocidade constante, o que caracteriza este sinal como estacionário, ou seja, suas componentes em frequência não variam com o tempo. Neste caso, a transformada de Fourier pode ser utilizada como ferramenta para o estudo das características espectrais do sinal no domínio da frequência.

Em situações mais complexas, os sinais podem apresentar características não-estacionárias, como, por exemplo, sinais transientes e sinais de vibração em máquinas rotativas com rotação variável. Nestes casos, torna-se mais adequado analisar o comportamento da variação das componentes espectrais no tempo.

É com este intuito que são aplicadas as chamadas *transformadas tempo-freqüência (TFDs)* à análise de máquinas e equipamentos visando detecção e diagnóstico de falhas. Uma das vantagens do uso das TFDs para o monitoramento de máquinas é que elas informam quando e como o conteúdo de frequência do sinal está variando. A distribuição de Wigner (DW) é uma

destas ferramentas. Ela possui a vantagem de apresentar uma boa resolução no plano tempo-freqüência, porém possui a desvantagem de incorporar termos de interferência quando sinais com mais de uma componente espectral são analisados.

Uma outra distribuição bastante utilizada é a *Transformada de Fourier de Curta Duração (STFT)*. Esta técnica consiste na divisão do sinal não-estacionário em intervalos pequenos o suficiente de modo que se possa assumir estacionaridade em cada um deles, e assim a transformada de Fourier pode ser aplicada com bons resultados. A totalidade dos espectros de cada intervalo mostra como o conteúdo de freqüência do sinal está variando com o tempo. A divisão do sinal é feita através do uso de uma janela de observação para enfatizar as características do sinal apenas nas proximidades do instante de interesse.

Uma das limitações associadas à STFT diz respeito à largura da janela, cujo valor é constante para todos os instantes de tempo. Pelo princípio da incerteza de Heisenberg, uma janela larga permite uma boa resolução no domínio da freqüência, mas resolução pobre no domínio do tempo, e vice versa⁹. Desta maneira, as informações obtidas pela STFT têm precisão limitada devido à largura da janela.

Para resolver o problema de resolução (escala) fixa da STFT, pode-se utilizar uma transformada que seja independente da escala, ou seja, que apresente a característica de multiresolução. Esta transformada é conhecida como Transformada de Wavelet (WT), e possibilita que um sinal seja analisado com boa resolução no tempo ou freqüência, dependendo da escolha da largura da janela.

A seguir, apresentam-se alguns conceitos, aspectos teóricos e informações a respeito da Transformada de Wavelet e da distribuição de Wigner.

4.2 Transformada de Wavelet

A WT representa um avanço em relação a STFT, pois ela é uma técnica que utiliza escalas variáveis. A análise de wavelets permite o uso de uma escala menor quando se deseja maior resolução da informação contida no sinal em alta freqüência, e uma escala maior quando se deseja maior resolução da informação contida no sinal em baixa freqüência. As grandezas freqüência e escala são inversamente relacionadas, isto é, uma escala menor implica uma alta freqüência e vice-versa¹⁰.

A noção de escala na WT foi introduzida como alternativa para freqüência, levando-a a uma decomposição tempo-escala. Isto significa que um sinal pode ser mapeado num plano tempo-escala, através de um escalograma. Isto é equivalente ao mapeamento tempo-freqüência, usado na STFT. De fato, existe uma correspondência entre escala e freqüência, por isso diversos autores consideram a Transformada de Wavelet como sendo uma representação em tempo-freqüência¹¹.

A Transformada de Wavelet consiste em encontrar uma família de funções chamadas de wavelets filhas, a partir de operações de dilatação e translação da wavelet mãe, como será visto mais adiante. Existem muitos tipos de Wavelets que podem ser usadas como wavelet mãe, são elas, Wavelet de Haar, Wavelet de Meyer, Wavelet de Coiflet, Wavelet de Morlet, Wavelet de Daubechies, etc. Estas Wavelets tem diferentes características. Neste trabalho, utilizam-se as Wavelets de Daubechies.

A Transformada Contínua de Wavelet (CWT) do sinal $x(t)$ é definida por:

$$CWT(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \tag{3}$$

em que, $\psi(t)$ é a wavelet mãe e $\psi(t-b/a)$ são as wavelets filhas. O parâmetro a é chamado de escala, que modifica o comprimento de uma função por compressão ou dilatação; b é o chamado de coeficiente de translação, que avança ou atrasa a posição da wavelet no eixo do tempo. A diferença básica entre a STFT e a WT é que na WT usa-se uma escala, a , variável, ao invés de uma frequência, f , variável na STFT. Os valores da Transformada Contínua de Wavelet obtidos a partir da Equação (3) são chamados de coeficientes da wavelet, que são função da escala e posição¹².

A CWT implica que escala e posição, dados pelos parâmetros a e b , mudam continuamente. Contudo, o cálculo dos coeficientes da wavelet para toda escala possível pode representar um considerável esforço computacional e uma quantidade de dados muito grande para serem analisados posteriormente. Assim sendo, o uso da Transformada de Wavelet Discreta (DWT) torna-se imprescindível, pois ela permite a discretização da wavelet numa escala baseada na potência de dois, ou seja, na escala 2^j , chamada de escala dyadica, em que j significa o número de níveis de decomposição do sinal. O uso dessa escala torna a implementação computacional mais eficiente e a análise dos dados bastante precisa. Semelhante a Transformada Rápida de Fourier (FFT), existe um algoritmo para implementação rápida da DWT, que é normalmente o mais utilizado^{13,14}. Então, os parâmetros a e b da Equação (3) são substituídos por 2^j e $k2^j$, respectivamente. A Tabela 1 define, resumidamente, os coeficientes da CWT e DWT.

Tabela 1 – Coeficientes da Transformada de Wavelet Contínua e Discreta

Análise Contínua – CWT	Análise Discreta – DWT
$CWT(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$	$DWT(a,b) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi\left(\frac{t-k2^j}{2^j}\right) dt$
$a \in \mathbb{R}^+ - \{0\}, b \in \mathbb{R}$	$a = 2^j, b = k2^j, (j,k) \in \mathbb{Z}^2$

A análise de wavelet utilizando o algoritmo da DWT processa os dados em diferentes escalas ou resoluções. Uma importante vantagem da transformada de wavelet é que a largura da janela usada na análise pode ser ajustada automaticamente. Em baixas frequências, a largura da janela é maior, enquanto em altas frequências, a largura é menor. Isto significa que a transformada de wavelet pode fornecer melhor resolução no tempo para componentes do sinal em alta frequência e melhor resolução em frequência para componentes do sinal em baixa frequência. Então, duas características importantes da WT são a sua capacidade de

localização no tempo e a análise em multiresolução. Estas razões tornam a WT muito interessante em aplicações de detecção e diagnóstico de falhas¹⁵.

Em particular, a WT é adequada para análise de sinais estacionários, não-estacionários ou transientes, porque ela introduz o conceito de escala como alternativa para frequência utilizada pela Transformada de Fourier de Curta Duração (STFT). Portanto, a Análise de Wavelet possibilita a obtenção imediata de informações em relação a outras técnicas de análise em tempo-frequência¹⁶.

4.3 Distribuição de Wigner

Historicamente, as distribuições tempo-frequência surgiram na década de 30 com a introdução da distribuição de Wigner no campo da mecânica quântica. Posteriormente, ao final da década de 40, foi adaptada à teoria de sinais⁹. Esta distribuição possui algumas características que a tornam uma boa ferramenta na análise de sinais, como a boa resolução no plano tempo-frequência, porém também apresenta características indesejáveis do ponto de vista de identificação dos componentes espectrais.

A distribuição de Wigner de um sinal $s(t)$ é calculada pela seguinte equação

$$P_{WIG}(t, \omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t + \frac{\tau}{2}) s^*(t - \frac{\tau}{2}) e^{-j\tau \omega} d\tau. \quad (4)$$

Esta distribuição possui boa resolução no plano tempo-frequência, porém, em contrapartida, apresenta termos de interferência quando são analisados sinais que possuem mais de uma componente espectral, como no caso da soma de dois ou mais sinais. Por exemplo, a distribuição de Wigner para um sinal do tipo $s(t) = s_1(t) + s_2(t)$ é dada por

$$P_{WIG}(t, \omega) = P_{WIG11}(t, \omega) + P_{WIG22}(t, \omega) + 2 \operatorname{Re}\{P_{WIG12}(t, \omega)\}, \quad (5)$$

ou seja, compreende-se que o termo $2 \operatorname{Re}\{P_{WIG12}(t, \omega)\}$ é um termo adicional aos auto-termos da distribuição, e são chamados termos cruzados ou termos de interferência.

Sob o aspecto computacional, o cálculo da distribuição de Wigner é extremamente inviável, em virtude da presença dos limites infinitos na integração. É necessário, então, estudar os efeitos da imposição de limites finitos à distribuição. Isto pode ser feito multiplicando-se o produto $s(t + \frac{\tau}{2}) s^*(t - \frac{\tau}{2})$ por uma função janela, $h(\tau)$, centrada em $t = 0$.

A presença da janela influencia também na intensidade dos termos de interferência em sinais multicomponentes. Desta forma, com a inclusão da janela, pode-se definir a distribuição pseudo-Wigner (DPW):

$$P_{PWIG}(t, \omega) = \int h(\tau) s(t + \frac{\tau}{2}) s^*(t - \frac{\tau}{2}) e^{-j\omega t} d\tau \quad (6)$$

O maior problema desta distribuição no processo de discretização está relacionado com o fenômeno de **aliasing**. A periodicidade no domínio da frequência da distribuição de Wigner é π , enquanto na transformada de Fourier a periodicidade é 2π . Isto significa que deve-se

utilizar uma frequência de amostragem duas vezes maior que a usada na transformada de Fourier, ou seja, quatro vezes a maior componente do sinal a ser analisado.

Uma outra solução para este problema é a utilização do sinal analítico, $z(t)$, que é um sinal complexo no qual a parte real é igual ao sinal real original, e a parte imaginária é a transformada de Hilbert do sinal original. Particularmente, o espectro deste sinal contém apenas as componentes de frequências positivas, de maneira que os termos de interferência entre as componentes positivas e negativas da representação são eliminados. Assim, o uso do sinal analítico permite que o sinal seja amostrado segundo o teorema de Nyquist.

A distribuição de Wigner pode ser calculada com o uso de um algoritmo FFT¹⁷. Assim, a distribuição de Wigner discreta pode ser obtida através da expressão¹⁷

$$P_{DPWIG}(t, \omega) = 2 \text{ DFT} [z(n+m) \cdot z^*(n-m)], \quad (7)$$

$$m \rightarrow 2k$$

5 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DOS SINAIS

Os resultados apresentados a seguir foram obtidos considerando um defeito na pista interna de um rolamento de esferas. São simulados três tipos de sinais. O primeiro corresponde a um sinal do rolamento sem falha e é composto por ruído e 4 harmônicos que representam respostas dinâmicas do rotor a forças geradas devido à rotação e possíveis ressonâncias. Este sinal e seu espectro estão apresentados na Figura 5.

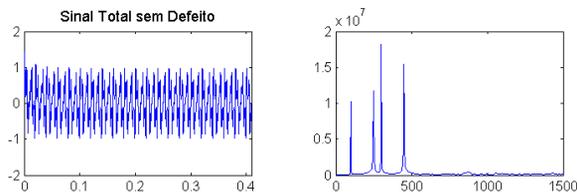


Figura 5: Sinal Total do Rolamento Sem Falha e Seu Espectro.

O segundo sinal simulado corresponde ao mesmo sinal da Figura 5, somado a um trem de respostas impulsivas que representam as respostas aos impactos das esferas ao passarem pelos defeitos na pista interna, quando esta permanece estacionária (Figura 6a). O sinal total e seu espectro são mostrados na Figura 6b.

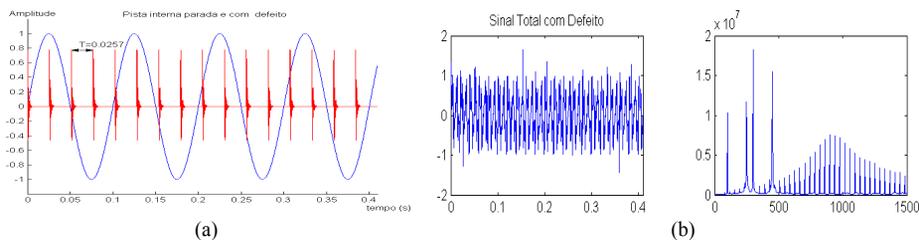


Figura 6: (a) Trem de Respostas Impulsivas Simulando os Defeitos na Pista; (b) Sinal Total e Seu Espectro.

O terceiro sinal simulado corresponde ao mesmo sinal da Figura 5, somado a um trem de respostas impulsivas, porém modulado em amplitude pela frequência de rotação, para representa o efeito do defeito na pista rotativa (Figura 7a). O sinal total e seu espectro são mostrados na Figura 7b.

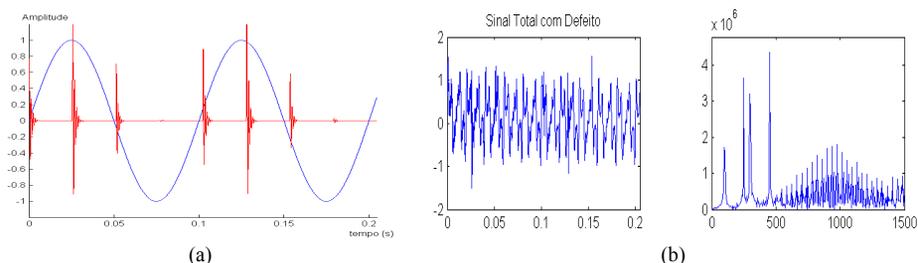


Figura 7: (a) Trem de Respostas Impulsivas Simulando os Defeitos na Pista Interna Girando; (b) Sinal Total e Seu Espectro.

Os sinais simulados para a análise foram implementados no Matlab. Os parâmetros adotados para a geração das falhas têm valores: número de pontos, $N = 2048$; frequência de amostragem, $f_s = 10000\text{Hz}$; frequência de rotação, $f_r = 10\text{Hz}$; frequência de ressonância excitada pelo defeito, $f_c = 900\text{Hz}$; e frequência do defeito, $f_d = 38,91\text{Hz}$.

6 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 Aplicação da Técnica de Envelope.

A técnica mostrou-se bastante eficiente na detecção de falhas incipientes, mesmo quando o sinal encontra-se contaminado com ruído. A frequência do defeito, para o primeiro caso, é de 39,062 Hz, o que está bem caracterizado na Figura 8a, em que as frequências estão espaçadas deste mesmo valor, caracterizando claramente o defeito.

Para o segundo tipo de defeito, em que o sinal é modulado em amplitude pela rotação do eixo (10 Hz), a Figura 8b também possibilita a visualização do defeito. Logo, pode-se concluir que para o caso apresentado a técnica de envelope mostrou-se eficiente.

A Figura 8 mostra o procedimento da técnica de envelope aplicada aos sinais de um rolamento com falha na pista interna. O primeiro dos gráficos em cada figura apresenta o espectro do sinal defeituoso filtrado em torno da frequência de ressonância. Após a filtragem, foi calculada a transformada inversa de Fourier do espectro, e em seguida foi aplicada a transformada de Hilbert (segundo gráfico das figuras 8a e 8b). Ao sinal resultante desta aplicação, foi aplicada a FFT, mostrada no terceiro gráfico das figuras 8a e 8b.

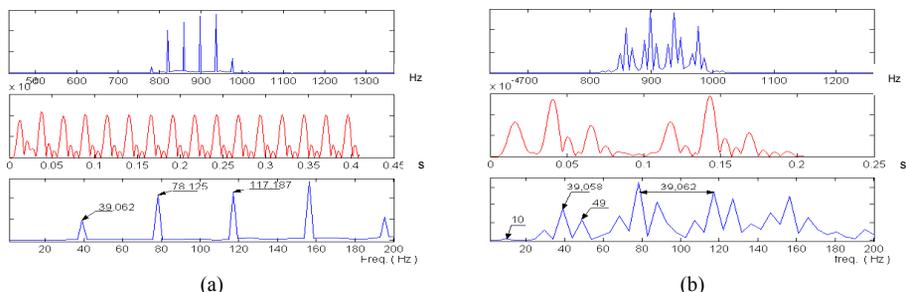


Figura 8: (a) Envelope do sinal sem modulação; (b) Envelope do sinal com modulação.

6.2 Análise dos Resultados Utilizando a Transformada de Wavelet

As Figuras 9 a 11 mostram os resultados obtidos pela Transformada de Wavelet Contínua (CWT) para os sinais de vibração simulando a condição do rolamento sem defeito, com defeito na pista interna e anel interno nas condições estacionária e girando.

Utilizou-se para obtenção dos resultados a wavelet-mãe de Daubechies e o Toolbox de Wavelet do Matlab. Outros tipos de wavelets tais como, wavelet de Morlet, Biortogonal, Coiflets e Symlets foram testadas para efeito de comparação com os resultados obtidos pela wavelet de Daubechies, e os resultados foram bastante satisfatórios e semelhantes.

Observando-se a Figuras 10 e 11, verifica-se um aumento de energia causado pelo defeito na pista interna que aparece claramente na Figura 10, com frequência de aproximadamente 38Hz, e também excitando a frequência de 900 Hz. Por outro lado, o defeito na pista interna, quando a mesma encontra-se girando, aparece claramente espaçado de aproximadamente 38Hz, sendo modulado pela frequência de 10 Hz, a qual é visível pelos espaçamentos maiores na Figura 11.

A análise dos sinais em alta frequência (região de 900 Hz) com a wavelet permite um diagnóstico claro do defeito. O algoritmo para obtenção das Figuras 9 a 11 foi implementado utilizando-se a CWT e uma faixa de escala variando de 6 a 10. A escala de valor 7,4 corresponde à frequência de 900 Hz¹⁴. Uma boa resolução no tempo (10^{-4} s) foi necessária para visualização dos defeitos em alta frequência. A utilização de uma escala maior que percorra todo espectro (por exemplo, 1:1256) não foi necessária para diagnóstico dos defeitos, pois os mesmos aparecem claramente em torno da frequência de 900 Hz. O processamento dos sinais nesta faixa de escala apresenta algumas desvantagens como maior tempo computacional e capacidade de memória. Neste trabalho, observou-se que a CWT é de fácil implementação e bastante adequada para análise de sinais estacionários e não-estacionários. A análise de wavelet permite o processamento de sinais em várias escalas ou resoluções. Isto possibilita a localização do defeito de maneira evidente no tempo, como mostra os resultados apresentados nas Figuras 9 a 11.

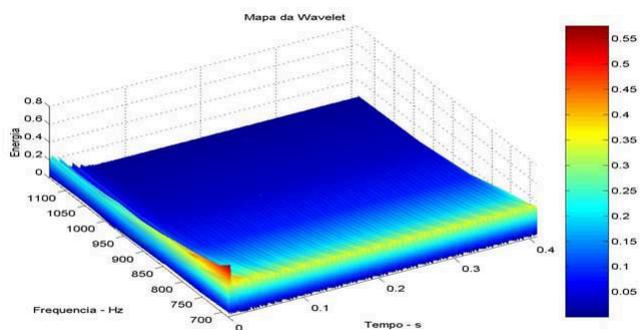


Figura 9: Wavelet do Sinal Sem Falha.

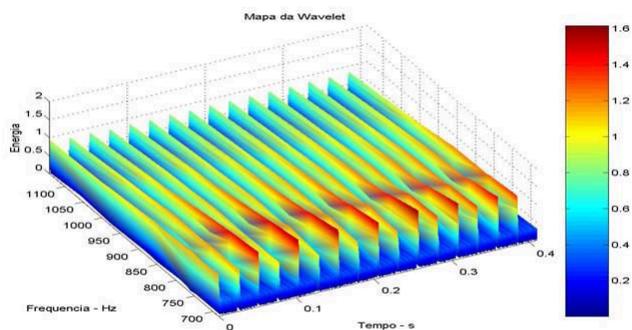


Figura 10: Wavelet do Sinal Com Falha na Pista Interna: Pista Interna Estacionária.

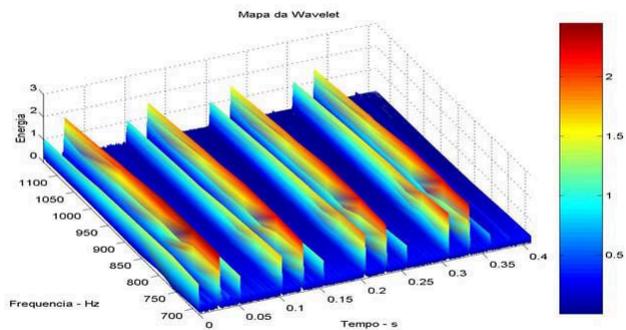


Figura 11: Wavelet do Sinal Com Falha na Pista Interna: Pista Girando.

6.3 Análise dos Resultados Utilizando a Distribuição Pseudo-Wigner

A análise dos mesmos sinais discutidos anteriormente será feita utilizando-se agora a distribuição pseudo-Wigner. Além do objetivo principal, que é identificar e localizar as componentes espectrais relativas à falha no rolamento, também serão estudadas algumas características intrínsecas desta distribuição, como as consequências da utilização da janela.

A Figura 12 também pode ser utilizada para melhor visualizar o efeito da largura da janela na distribuição de Wigner. Cada uma das figuras mostra uma região central que representa o plano tempo-freqüência sobre o qual a energia do sinal está distribuída. Nas margens lateral-esquerda e inferior, pode-se observar, respectivamente, o espectro de freqüência e o sinal temporal correspondentes ao sinal que está sendo estudado.

A Figura 12a representa a distribuição pseudo-Wigner do sinal do rolamento em bom estado, utilizando-se uma janela temporal de largura grande. Isto proporciona uma distribuição com boa resolução em freqüência, porém, baixa resolução no domínio do tempo. São identificadas as componentes das freqüências naturais e/ou ressonâncias, e também nota-se a presença dos termos de interferência entre estas componentes.

A Figura 12b mostra a distribuição pseudo-Wigner para o mesmo sinal sem falha, porém sendo utilizada uma janela estreita. Como consequência, nota-se uma boa resolução temporal para as componentes do sistema em detrimento de uma resolução ruim no domínio da freqüência. Além disso, não são encontrados termos de interferência.

Ao serem analisados os sinais que representam um rolamento com falha na pista interna estacionária, Figuras 12c e 12d, percebe-se que a DPW apresenta um aumento de energia em regiões de alta freqüência, correspondente à faixa onde se encontram as freqüências de ressonância do defeito. A Figura 12c (DPW com janela larga) mostra, além das componentes em freqüência da máquina, regiões do plano que concentram energia nos instantes de tempo em que ocorrem os impactos, e que correspondem, no domínio da freqüência, às regiões de ressonância do defeito, em torno de 900 Hz. Percebe-se também, com o auxílio do gráfico do sinal temporal, que existem alguns termos de interferência entre as componentes do impacto. A Figura 12d mostra que o uso de uma janela estreita melhora a resolução no tempo, possibilitando a identificação das respostas impulsivas nos instantes em que eles ocorrem, e com intensidade maior que a mostrada na Figura 12c. Percebe-se também que estas intensidades são maiores, no domínio da freqüência, exatamente na faixa em torno de 900 Hz.

Ao se considerar, no entanto, que a pista onde se encontra o defeito está girando, surge um efeito no trem de impulsos, em que este é modulado em amplitude pela freqüência de rotação. Este efeito pode ser visualizado nas Figuras 12e e 12f. Na primeira, que representa uma DPW calculada com uma janela larga, encontram-se as linhas correspondentes às freqüências do sistema, com boa resolução, e também um aumento de energia nos instantes de tempo correspondentes aos impulsos, e nas freqüências de ressonância do defeito. Estas componentes, entretanto, estão presentes com intensidade diferente do caso anterior uma vez que a amplitude está modulada. Pela Figura 7a, percebe-se que apenas três impulsos estão presentes em cada período, o que é comprovado pela DPW. Já a Figura 12f mostra mais claramente este efeito da modulação, uma vez que é utilizada uma janela estreita, o que melhora a resolução no tempo.

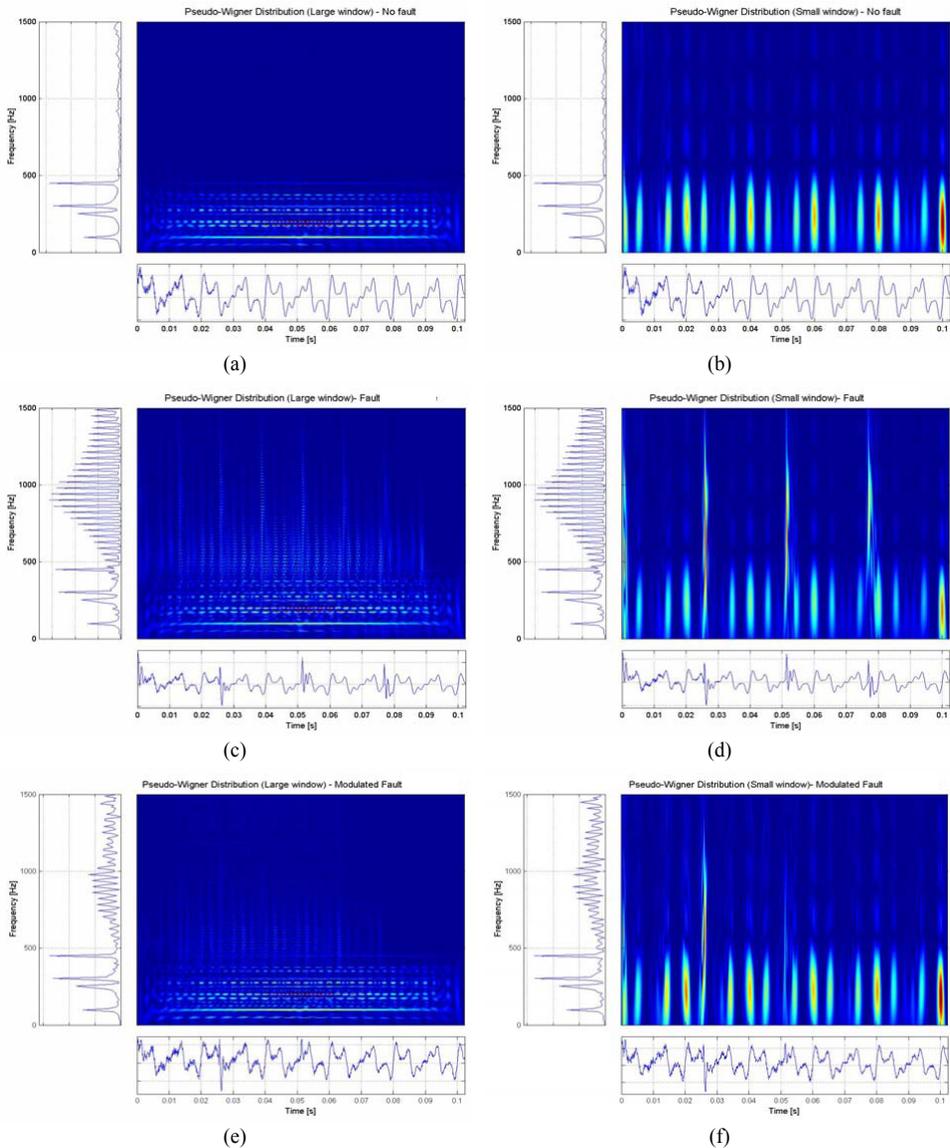


Figura 12: DPW utilizando janelas estreita e larga, aplicada a sinais de rolamento sem defeito, com defeito na pista girante, e com defeito na pista estacionária.

7 COMENTÁRIOS FINAIS

Os resultados numéricos obtidos satisfizeram os objetivos do trabalho, uma vez que a condição de falha introduzida no rolamento foi identificada pelas três técnicas utilizadas.

A análise de Envelope conseguiu identificar as componentes em frequência das falhas, tanto na condição de pista estacionária quanto na de pista girando, esta última provocando uma modulação em amplitude no sinal do defeito. Este efeito ficou bem caracterizado no gráfico apresentado, através da presença de componentes laterais no espectro, com valor da frequência de modulação (rotação da máquina).

Como forma de comparação com a técnica de Envelope, foram utilizadas transformações tempo-frequência que, além de identificarem as falhas, conseguem também localizá-las no tempo. Através da técnica de Wavelets, foi possível identificar claramente as falhas através da visualização de um aumento de energia na região correspondente ao defeito. De forma semelhante, a técnica pseudo-Wigner também localiza os dois tipos de defeito através da visualização de um aumento de energia na região do plano tempo-frequência que corresponde à falha. Além disso, foi apresentada uma característica desta transformada no que se refere à presença da janela, cujos efeitos puderam ser notados nos resultados apresentados de acordo com o princípio da incerteza de Heisenberg: não se pode ter boa resolução nos domínios do tempo e frequência simultaneamente. Desta forma, de acordo com o tamanho da janela utilizada, foi possível obter boa resolução no tempo ou na frequência.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fapesp e ao CNPq pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Mathew e R. Alfredson, “The Condition Monitoring of Rolling Element Bearing Using Vibration Analysis”, *Journal of Vib., Acoust., Stress and Reliab. in Design*, 106, 447–453 (1984).
- [2] M. Lebold, K. McClintic, R. Campbell, Byington e M. Kenneth, “Review of Vibration Analysis Methods for Gearbox Diagnostics and Prognostics”, *Proc. of the 54th Meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology*, Virginia, Maio, 623-634 (2000).
- [3] M. T. Almeida e R. Góz, “Análise de Vibrações II – Rolamentos e Engrenagens”, *Apostila de Curso, Fundação de Pesquisa e Assessoramento à Indústria - FUPAI*, 2000.
- [4] D. Dyer e R. Stewart, “Detection of Rolling Element Bearing Damage by Statistical Vibration Analysis”, *ASME, Journal of Mechanical Design*, 100(2), Abril, 229-235 (1978).
- [5] A. A. Silva, *Detecção e Análise Dinâmica de Falhas em Rolamentos*, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos, (1999).
- [6] D. Brie, “Modeling of the Spalled Rolling Element Bearing Vibration Signal: an Overview and Some New Results”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 14(3), 353-369 (2000).

- [7] P. Tse, Y. Peng e R. Yam, “Wavelet Analysis and Envelope Detection for Rolling Element Bearing Fault Diagnosis – Their Effectiveness and Flexibilities”, *Journal of Vibration and Acoustics*, 123(3), 303–310 (2001).
- [8] N. Tandon e B. Nakra, “Vibration and Acoustical Monitoring Techniques for the Detection of Defects in Rolling Element Bearings – A Review”, *Shock and Vibration Digest*, 24(3), 3–11 (1992).
- [9] L. Cohen, *Time-Frequency Analysis*, New Jersey, Prentice–Hall (1995).
- [10] L. Satish, “Short-Time Fourier and Wavelet Transforms for Fault Detection in Power Transformers During Impulse Tests”, *IEEE Proc. Sciences Measurement Technology*. 145(2), 77-84 (1988).
- [11] K. Mori, N. Kasashima, T. Yoshioka, Y. Ueno, “Prediction of Spalling on a Ball Bearing by Applying the Discrete Wavelet Transform to Vibration Signals”, *Wear*, 195, 162-168 (1996).
- [12] Y. T. Chan, *Wavelet Basics*, Kluwer Academic Publishers (1996).
- [13] S. G. Mallat, “A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation”, *IEEE Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 11(7), 674-693 (1989).
- [14] M. Misiti, Y. Misiti, G. Oppenheim, J. M. Poggi, *Wavelet Toolbox – User’s Guide*, The MathWorks, Inc. (1997).
- [15] Z. Ye, B. Wu, A. R. Sadeghian, “Signature Analysis of Induction Motor Mechanical Faults by Wavelet Packet Decomposition”, *IEEE*, 1022-1029 (2001).
- [16] A. Graps, *An Introduction to Wavelets*. IEEE Computational Science & Engineering, 50-61 (1995).
- [17] B. Boashash, 1991, “Time-frequency signal analysis”, in *Advances in Spectrum Analysis and Array Processing*, Cap.09, 418-517, v.01, S. Haykin (ed.), Prentice-Hall.