

MONITORAMENTO DE CONDIÇÃO DE ROLAMENTOS ATRAVÉS DA ANÁLISE CONJUNTA TEMPO-FREQUÊNCIA DE SINAIS DE VIBRAÇÃO

Antonio Almeida Silva

Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Aprígio Veloso, 882, 58.109-970, Campina Grande, PB, Brasil.
E-mail: almeida@dem.ufpb.br

Mario Francisco Mucheroni

Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Dr. Carlos Botelho, 1465, 13.560-250, São Carlos, SP, Brasil.
E-Mail: mariofm@sc.usp.br

Resumo

O objetivo deste trabalho é caracterizar a detecção e diagnóstico de falhas em rolamentos de esferas através da análise conjunta tempo-frequência como suporte para a manutenção preditiva. Os sinais de vibração são analisados por diferentes técnicas no domínio do tempo e da frequência, e por métodos usando representações tempo-frequência baseados na distribuição pseudo-Wigner-Ville (PWVD). Vários estágios de falhas em rolamentos foram produzidos e medidos num banco de ensaios e os resultados experimentais confirmam que o método PWVD é muito eficiente quando comparado com os métodos tradicionais. A validação do modelo é conduzida usando os sinais medidos a partir do surgimento de defeitos pontuais localizados na pista externa de rolamentos.

Palavras-chave: Detecção de falhas, Rolamentos, Manutenção preditiva, Vibrações.

1. INTRODUÇÃO

O monitoramento de máquinas a partir da análise de sinais vibratórios já vem sendo bastante utilizado em instalações industriais de médio e grande porte, principalmente em situações onde uma parada imprevista de algum equipamento possa causar prejuízos financeiros ou de natureza ambiental. Por outro lado, detectar falhas e julgar a sua severidade requer conhecimento e habilidade do especialista no domínio das técnicas e na interpretação das medidas físicas realizadas. Dentre as várias técnicas de análise de vibrações destaca-se a análise espectral clássica, baseada na aplicação da transformada de Fourier. É uma ferramenta bastante útil para grande parte dos problemas, especialmente na análise de sinais com características periódicas e estacionárias. Em situações mais complexas, onde tem-se a combinação de mais de uma fonte de excitação somada aos ruídos transmitidos através dos suportes e das fundações das máquinas, os sinais medidos podem apresentar algumas dificuldades de análise, especialmente quando ocorrem mudanças abruptas do sinal no tempo,

efeitos locais transientes ou mesmo quando os sinais apresentam características do tipo não-estacionárias. Nestes casos, faz-se necessário o uso de ferramentas mais poderosas como as distribuições conjuntas tempo-frequência, capazes de prover informações sobre o comportamento de diferentes componentes em frequência de um sinal de vibração para cada instante de tempo (González *et al*, 1996). Dentre as transformadas lineares mais conhecidas estão as transformadas de Fourier de curto tempo (STFT), a transformada de Gabor e a transformada de “wavelets”. Nas representações bilineares estão as distribuições de Wigner-Ville (WVD), Choi-Williams (CWD) e Cohen-Posch (CPD), dentre outras. O uso destas ferramentas pode permitir um melhor entendimento de fenômenos como desgastes, trincas e ressonâncias estruturais em componentes de máquinas, oferecendo subsídios para a manutenção preditiva.

2. SINAIS DE VIBRAÇÃO GERADOS POR ROLAMENTOS

Nos sistemas mecânicos rotativos, os rolamentos se apresentam como um dos componentes mais sensíveis ao desenvolvimento de falhas devido aos problemas a que estes são expostos como desalinhamentos e desbalanceamentos, montagens inadequadas, lubrificação deficiente, sobrecargas imprevistas, desgastes por contaminação e fadiga superficial das pistas ou elementos rolantes. Estes fatores justificam as razões pelas quais verifica-se o constante interesse pela manutenção preditiva de rolamentos em instalações industriais. Em condições normais de operação os rolamentos estão sujeitos a várias fontes de excitação gerando sinais que apresentam características relacionadas com o estado do elemento. Inicialmente, quando o rolamento se encontra em bom estado, o sinal se apresenta como um ruído aleatório de banda larga em frequência com baixa amplitude de vibração. Em seguida, com o surgimento e desenvolvimento de uma pequena falha na pista estacionária o sinal obtido mostra alguns transientes periódicos com amplitudes praticamente invariantes no tempo, o que facilita sua análise pelos métodos baseados na aplicação da transformada de Fourier. Porém quando a falha se desenvolve na pista rotativa ou no elemento rolante, o efeito do carregamento e do meio de transmissão irão causar uma modulação na amplitude de vibração gerando um sinal cujo espectro apresenta bandas laterais mistas que dependem da posição angular da falha. Além disso, a presença de ruídos e de outras fontes de vibrações internas da máquina ou transmitidas através das fundações podem aumentar a complexidade dos sinais, dificultando a sua análise. Num estágio mais avançado de falha em rolamentos, o sinal volta a apresentar características típicas de ruído aleatório somado a pequenos transientes. O seu espectro apresenta uma configuração de banda larga em frequências, não permitindo fazer um diagnóstico confiável da frequência característica de defeito. Neste caso, o maior impacto irá dominar o espectro e a sua amplitude se torna alta em relação às amplitudes de vibração medidas quando os rolamentos estavam em bom estado.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA PARA O MODELO DE VIBRAÇÃO

As vibrações geradas por um rolamento novo são de nível baixo e vistas como um ruído aleatório. Porém com o surgimento e desenvolvimento de falhas, as vibrações começam a se modificar e a apresentar frequências características. Neste modelo supõe-se que apenas o modo dominante com frequência central de ressonância $\omega_c = 2\pi f_c$ é significativo e que os pulsos são gerados em intervalos regulares T_d correspondentes à frequência característica do defeito $f_d = 1/T_d$. A resposta vibratória $x_i(t)$ do sistema no tempo para uma falha localizada na pista externa estacionária do rolamento é dada por Braun & Datner (1979):

$$x_i(t) = \sum_{k=1}^{\infty} g_i(t - kT_d) U(t - kT_d) \quad (1)$$

onde:

$$g_i(t) = A_i \exp(-\alpha_i t) \sin \omega_c t \quad (2)$$

Nas expressões acima, k é o índice do período, $g_i(t)$ é a resposta do impacto induzido pela falha, α_i é um parâmetro de amortecimento estrutural e $U(t)$ é a função degrau unitário.

A Tabela 1 mostra os parâmetros geométricos do rolamento de esferas utilizado nos ensaios experimentais e adotado para a simulação do modelo, onde a frequência característica do defeito $f_e = 105$ Hz, foi obtida da equação deduzida por Braun & Datner (1979). A Figura 1 mostra os sinais simulados nos domínios do tempo e da frequência, gerados a partir do modelo de falha localizada na pista externa do rolamento, utilizando 4096 pontos discretos no tempo, faixa de análise de 0 a 20 kHz e velocidade de rotação do eixo $f_s = 1500$ rpm (25 Hz). Analisando-se o sinal no tempo visualiza-se a forma e a periodicidade dos impactos, representando a passagem das esferas sobre a falha. Na análise espectral via FFT, mostrada apenas até 5 kHz, destacam-se a frequência central de ressonância $f_c = 1300$ Hz e as linhas espectrais igualmente espaçadas da frequência característica do defeito f_d .

Tabela 1. Parâmetros do rolamento de teste (FAG E-20).

Terminologia	Parâmetros	Valor adotado
Número de esferas do rolamento	n_b	11 esferas
Diâmetro das esferas	d	8 mm
Diâmetro no círculo primitivo	D	34 mm
Frequência de rotação do eixo	f_s	25 Hz
Freq. de defeito na pista externa	$f_e = 4,20 f_s$	105 Hz

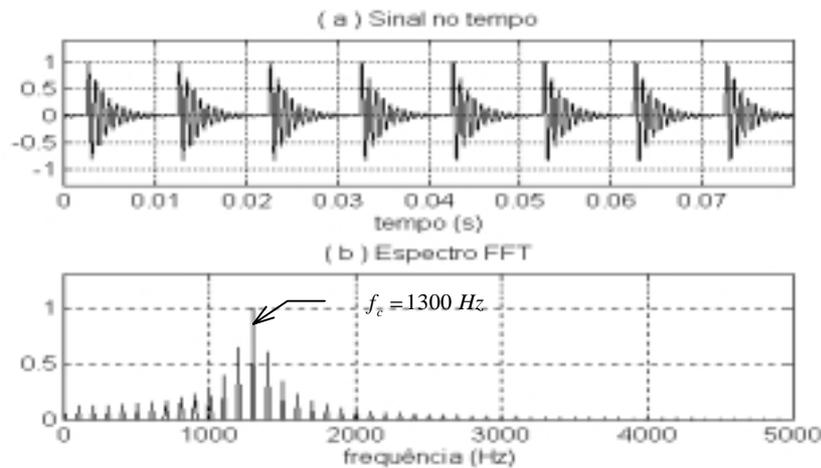


Figura 1. Falha na pista externa: sinais de vibração simulados.

4. CÁLCULO DAS DISTRIBUIÇÕES TEMPO-FREQUÊNCIA

As distribuições tempo-frequência (TFDs) podem ser expressas em termos do produto bilinear proposto por Cohen (1989). A expressão na forma discreta é obtida por

$$\rho_z(n, k) = \sum_{m=-M}^M \sum_{p=-M}^M G(p, m) z(n+p+m) z^*(n+p-m) e^{-j4\pi mk/N} \quad (3)$$

onde n e k são as variáveis discretas representando o tempo e a frequência, e os parâmetros m e p são inteiros variando de $-M$ a M pontos discretos. Esta equação pode ser reduzida ao produto na forma

$$\rho_z(n, k) = F_{m \rightarrow k} [G(n, m) * K_z(n, m)] \quad (4)$$

onde $F_{m \rightarrow k}$ denota a transformada de Fourier discreta no instante de tempo m para a frequência k , e o símbolo $*$ denota a convolução discreta no tempo.

Um procedimento geral para implementação das TFDs baseado nas classes de Cohen pode ser expandido em três passos, conforme Boashash & Reilly (1992):

- i) formar o produto bilinear $K_z(n, m) = z(n+m) z^*(n-m)$;
- ii) convoluir a função $G(n, m)$ com $K_z(n, m)$ na direção n (tempo);
- iii) calcular a transformada de Fourier do produto $[G(n, m) * K_z(n, m)]$.

A Figura 2 mostra o diagrama esquemático para o cálculo da PWVD adotada neste trabalho, obtido a partir do sinal no tempo, e implementado conforme o procedimento proposto por Shin & Jeon (1993). Destaca-se que a aplicação da janela Gaussiana no plano tempo-frequência reduz os termos cruzados ou interferências comuns nas distribuições Wigner-Ville (VWD). Uma análise comparativa entre os métodos STFT e PWVD calculados a partir de sinais sintetizados é feita por Silva & Mucheroni (1998).

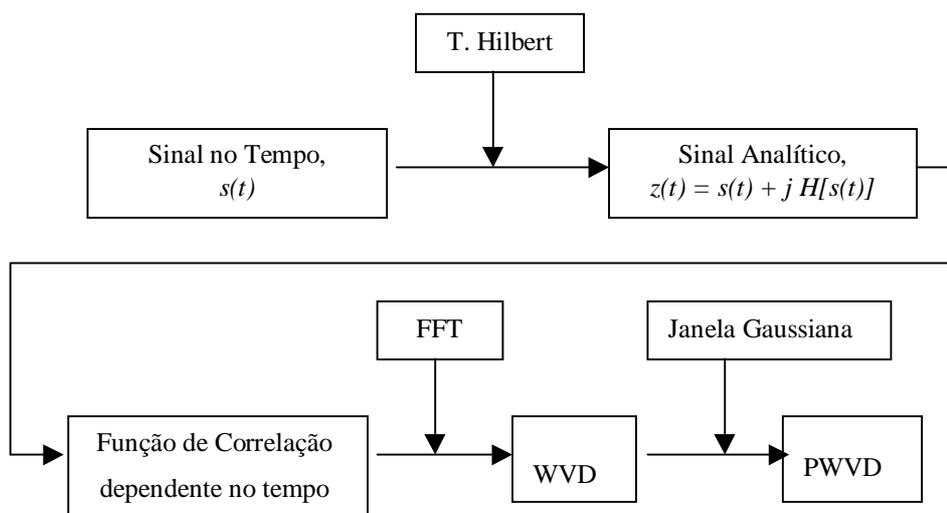


Figura 2. Esquema para o cálculo da PWVD.

5. RESULTADOS DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

A Figura 3 mostra uma vista geral do banco de ensaios experimentais, onde são observados os principais componentes do conjunto. Com o objetivo de investigar o desempenho dos métodos de análise, inicialmente foram realizadas medidas com o rolamento novo (*c1*) e, em seguida, produzidas falhas do tipo riscos transversais na pista externa com tamanho de falhas crescentes variando de 1 a 3 mm², conforme a Tabela 2. Os riscos foram produzidos por usinagem através de uma caneta odontológica, representando falhas por fadiga superficial na pista externa do rolamento de teste. Nota-se que mesmo para a condição de falha mais severa (*c8*), a área do defeito é inferior aos padrões industriais, conforme recomendações da Timken ($A_c \cong 6,45 \text{ mm}^2$) *apud* Shiroishi *et al* (1997).

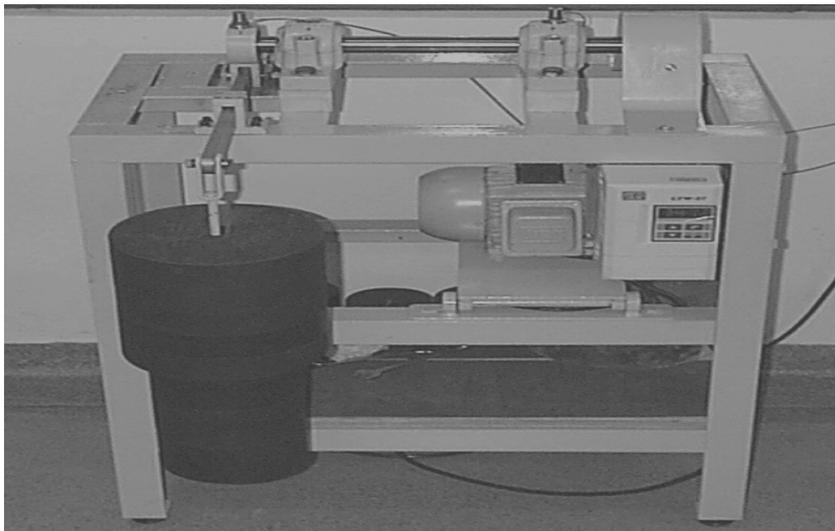


Figura 3. Vista geral da bancada de ensaios experimentais.

Tabela 2. Condições de falhas adotadas.

Condições de falhas	Comprimento do risco, (mm)	Largura do risco (mm)	Área do defeito A (mm ²)
<i>c1</i>	-	-	-
<i>c2</i>	3,0	0,3	0,9
<i>c3</i>	3,0	0,4	1,2
<i>c4</i>	3,0	0,5	1,5
<i>c5</i>	3,0	0,6	1,8
<i>c6</i>	3,0	0,7	2,1
<i>c7</i>	3,0	0,8	2,4
<i>c8</i>	3,0	1,0	3,0

A aquisição dos sinais de vibração foi feita através de um analisador de Fourier, modelo TEKTRONIX 2630, com aquisição de blocos de sinais de 4096 pontos e faixa útil de análise de 0 a 20 kHz. Na aquisição dos sinais de vibração foram utilizados dois acelerômetros B&K 4371, montados sobre os suportes dos rolamentos de teste. Para condicionamento dos sinais foram usados dois amplificadores de carga, modelo B&K 2626. As amplitudes dos sinais foram calibradas para unidades de aceleração em “g” visando facilitar a sua interpretação.

5.1 Análise no domínio do tempo

A Figura 4 mostra os sinais medidos no rolamento de teste sujeito a falhas produzidas na pista externa. Observa-se que estes sinais apresentam algumas características semelhantes em relação ao sinal simulado da Figura 1, especialmente nas condições mais severas (*c7* e *c8*). Nota-se ainda, que para algumas condições de falhas incipientes (*c2* a *c4*) a presença de ruídos nas medidas dificulta bastante a identificação dos impactos relacionados com a falha.

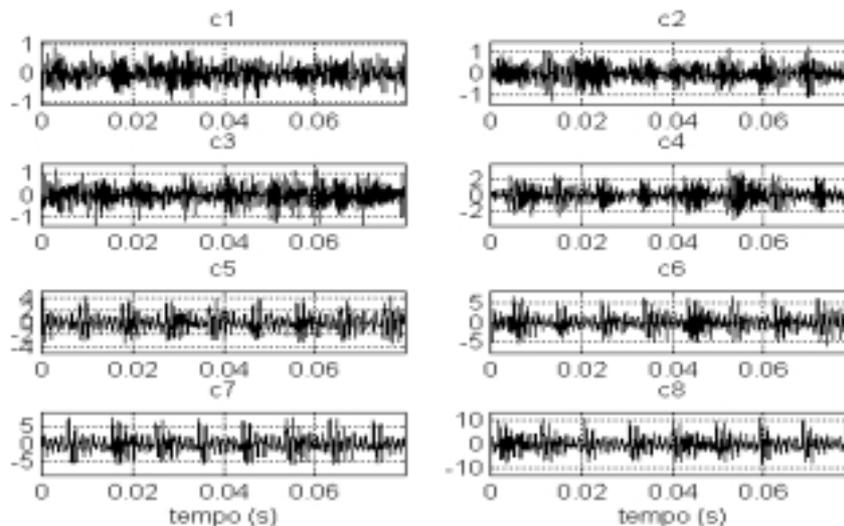


Figura 4. Falha na pista externa: sinais medidos no tempo.

5.2 Análise no domínio da frequência

A Figura 5 mostra os espectros FFT e seus espectros do envelope HFRT obtidos a partir dos sinais medidos para quatro condições de falhas. Nos espectros FFT é possível visualizar mudanças progressivas das faixas de frequências excitadas no sentido das frequências mais altas para as mais baixas. Nos espectros do envelope HFRT, obtidos a partir de um filtragem em torno de 1300 Hz, verifica-se que a frequência característica do defeito é facilmente localizada pelo pico principal já a partir da condição *c2*.

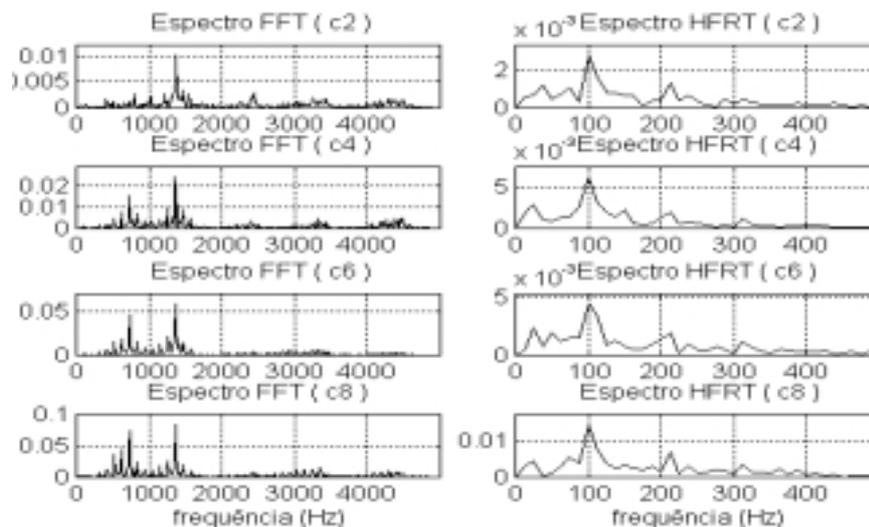


Figura 5. Espectros FFT e HFRT em frequência.

5.3 Análise conjunta tempo-frequência

As Figuras 6 e 7 mostram os mapas de contorno PWVD para duas condições de falhas ($c2$ e $c6$) produzidas na pista externa do rolamento de teste. Analisando o mapa PWVD da Figura 6, obtido para uma condição de falha incipiente $c2$, nota-se que os impactos devido à falha são representados por manchas ou “spots” concentrados na região de maior densidade espectral. Observa-se manchas em tons mais claros distribuídas de forma irregular no plano tempo-frequência devido à forte presença de ruídos contidos no sinal medido. Analisando o mapa PWVD da Figura 7, obtido para uma condição de falha mais severa $c6$, este apresenta uma estrutura de “spots” bem definida, situados na faixa de frequências entre 500 e 2000 Hz, representando bem a repetição dos impactos devido à falha.

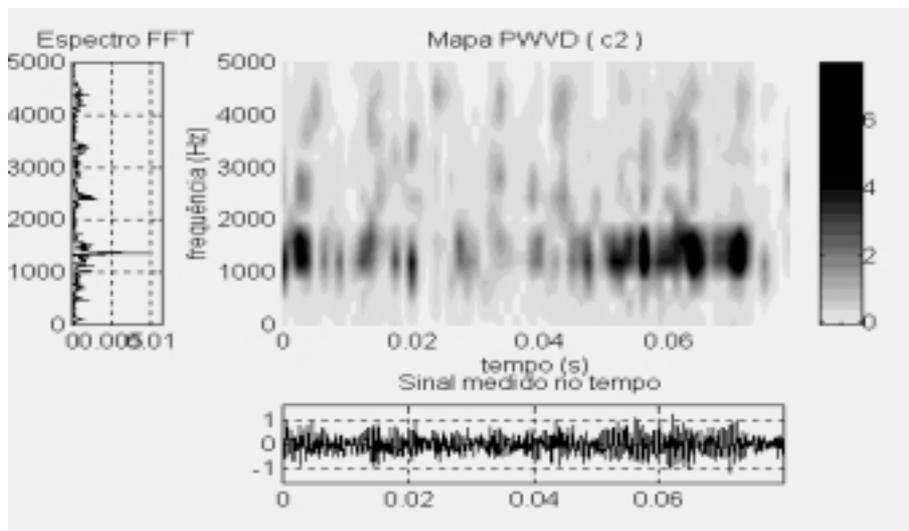


Figura 6. Mapa PWVD obtido para a condição de falha $c2$.

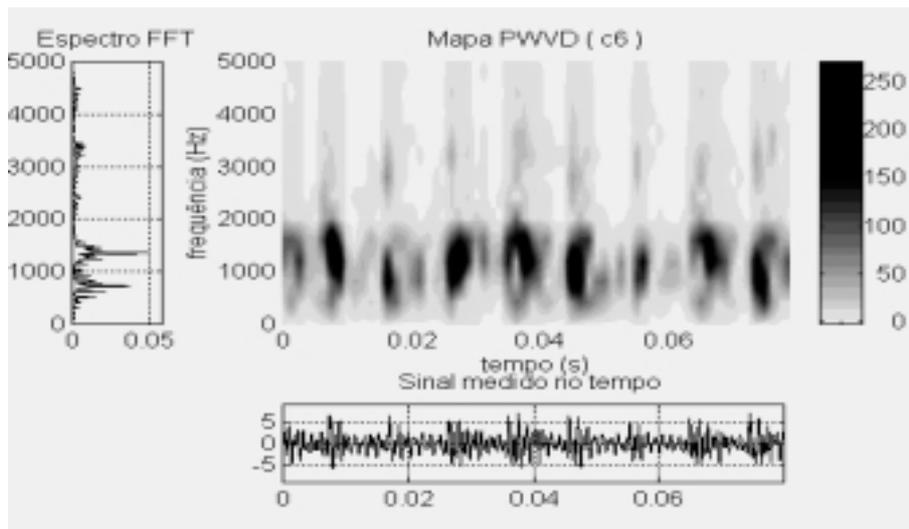


Figura 7. Mapa PWVD obtido para a condição de falha $c6$.

6. CONCLUSÕES

Embora os métodos de análise no domínio do tempo possibilitem o monitoramento do crescimento da falha e sejam utilizados como indicador do nível de alarme em máquinas num programa de manutenção preditiva, estes não permitem por si só o diagnóstico da localização de falhas em rolamentos. Por outro lado, o método de análise em frequência através dos espectros do envelope HFRT se mostrou bastante sensível para detecção e localização de falhas incipientes, embora não apresente boa sensibilidade com o crescimento da falha. Outra dificuldade desta técnica está relacionada com a escolha da faixa de frequência de filtragem mais adequada, que depende do conhecimento “a priori” das frequências de ressonâncias que foram mais excitadas pela falha. Quanto ao método de análise conjunta tempo-frequência através dos mapas de contornos PWVD os resultados se mostraram satisfatórios, apresentando estruturas típicas de captura simultânea das características temporais e espectrais dos sinais medidos, o que a torna uma ferramenta bastante útil na análise de sinais mais complexos.

7. AGRADECIMENTOS

O autor gostaria de agradecer ao programa CAPES / PIDCT / UFPB pela concessão da bolsa de pesquisa e à Escola de Engenharia de São Carlos, pela estrutura oferecida no LAMAFE, onde foram realizados todos os ensaios experimentais.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Boashash, B. & Reilly, A. , 1992, “Algorithms for Time-Frequency Signal Analysis”, Chapter 7, *in* Boashash, B. Time-Frequency Signal Analysis – Methods and Applications, Longman Cheshire, Wiley, pp. 163-181.
- Braun, S. & Datner, B. , 1979, “Analysis of Roller / Ball Bearing Vibrations”, Transactions of ASME - Journal of Mechanical Design, v.101, n.1, pp. 118-125.
- Cohen, L. , 1989, “Time-Frequency Distributions – a review”, Proceedings of the IEEE, v.77, n.7, pp. 941-981.
- González, P. S. *et al.*, 1997. “Nuevos metodos para el diagnostico de fallas en maquinas rotatorias mediante analisis de vibraciones”, Chile, Proceedings of VII Congreso Nacional de Ingenieria Mecanica, pp. 181-184.
- Shin, Y. S. & Jeon, J. J. , 1993, “Pseudo Wigner-Ville Time-Frequency Distributions and Application to Machinery Condition Monitoring”, Shock and Vibration, v.1, n.1, pp. 65-76.
- Shiroishi, J. *et al.* , 1997, “Bearing Condition Diagnostics via Vibration and Acoustic Emission Measurements”, Mechanical Systems and Signal Processing, v.11, n.5, pp. 693-705.
- Silva, A. A. & Mucheroni, M. F. , 1998, “Métodos de análise conjunta tempo-frequência aplicados ao monitoramento de condição de máquinas”, Anais do V CEM-NNE 98: Congresso de Engenharia Mecânica Norte-Nordeste, v.1, pp. 243-250.