



## ANÁLISE DAS BANDAS DE ALTAS FREQUÊNCIAS UTILIZADAS NA DETECÇÃO DE DEFEITOS EM ROLAMENTOS

**Francisco Paulo Lépore Neto**

**Hemerson Bovi**

Universidade Federal de Uberlândia

Departamento de Engenharia Mecânica

Laboratório de Sistemas Mecânicos

Campus Santa Mônica

Av. João Naves de Ávila, s/n

Cep. 38400-902 – Uberlândia- MG

**Resumo.** Monitorar as condições de operação das máquinas rotativas é um pré-requisito indispensável para detectar o aparecimento de falhas. A técnica de Análise de Bandas de Alta Frequência tem sido utilizada como ferramenta de comprovada eficiência no diagnóstico de falhas incipientes em rolamentos. Esta técnica consiste na extração, por meio do envelope, de informações, relativas aos defeitos, contidas nas bandas de altas frequências do espectro do rolamento. Contudo, o espectro de um sinal medido na estrutura possui várias bandas de altas frequências que podem ser tomadas como objeto de estudo, sendo que, algumas delas são mais viáveis que outras. Neste trabalho, apresentamos uma metodologia para o estudo do comportamento das bandas de altas frequências, pré-selecionadas através da função resposta em frequência associada à dinâmica da estrutura. A metodologia é aplicada a uma montagem experimental em laboratório, onde é introduzido um defeito na pista externa de um rolamento rígido de uma carreira de esferas e os seus efeitos sobre as bandas selecionadas são analisados. Esta análise, tem como objetivo determinar as bandas de frequência mais sensíveis aos impulsos gerados pelo defeito na carcaça do mancal e conseqüentemente aquelas que fornecem informações mais úteis para detecção do defeito.

**Palavras-chave:** Frequência característica, Banda de alta frequência, Envelope

### 1. INTRODUÇÃO

Nas máquinas rotativas, onde vários processos cinemáticos estão envolvidos, o monitoramento das vibrações possibilita a aplicação de um programa de manutenção objetivando a detecção prematura de falhas ( Braun et al., 1986). Considerando que os rolamentos são componentes utilizados em larga escala, o monitoramento do seu estado de funcionamento é muito importante, podendo ser realizado através da análise de sinais de vibração (SKF, 1996).

As falhas geradas nos rolamentos causam preocupação devido sua influência no funcionamento global do sistema, pois implica, por exemplo, na perda de potência, no aumento de folgas e na perda de precisão, podendo culminar no travamento da máquina (Nunes, 1989). A vida útil de um rolamento, sob condições normais de serviço, pode ser calculada teoricamente, através dos dados fornecidos pelos fabricantes. No entanto, devido a

não uniformidade das condições de operação, podem ocorrer falhas inesperadas num espaço de tempo menor ou maior que o previsto, ou seja, há uma diminuição da vida útil do rolamento.

Assim, como não há uma regra geral para se calcular da vida útil do rolamento em face das milhares de variações das condições de serviço, faz-se necessário o monitoramento destes elementos, para verificar as alterações no seu funcionamento provocadas pelo aparecimento dos defeitos (Harker et al., 1989).

As cargas aplicadas aos rolamentos, devido até mesmo à sua configuração, submetem uma das pistas, quando não as duas, à forças de natureza cíclica, o que faz com que ocorra geralmente, segundo ( Hai-Ping et all, 1995 ), lascamento por fadiga de contato nas pistas dos rolamentos sob condições normais de serviço. Porém, em muitos casos estes defeitos são constituídos por irregularidades nos elementos girantes do rolamento, como as pistas, a gaiola e as esferas, e podem ser do tipo cavidade, trinca ou desgaste ( Barkov,1995 ). Estas irregularidades produzem esforços dinâmicos que dão origem à vibrações de baixa energia, que se propagam do rolamento para o mancal e daí para a estrutura.

A propagação se faz através da estrutura do mancal, em geral por uma excitação impulsiva gerada pelo contato entre as esferas e a superfície defeituosa. Além desta fonte de energia outras fontes como por exemplo: desbalanceamentos, desalinhamentos, engrenamentos, que neste caso tem muita energia, excitam o mancal do rolamento. Assim, um sensor instalado no equipamento nos permite medir simultaneamente, as vibrações produzidas pelas diversas fontes, mascarando os sinais gerados pelos defeitos do rolamento.

A técnica da análise das bandas de alta frequência é uma das mais apropriadas para o monitoramento de vibrações devido à sua capacidade de separar a vibração gerada por um rolamento defeituoso daquelas geradas por outros elementos de máquinas (McFadden et al., 1984). No entanto, o espectro de um sinal medido em uma estrutura que contém um rolamento possui várias bandas de altas frequências que podem ser tomadas como objeto de estudo, porém algumas delas são mais indicadas que outras. Isto ocorre, pelo fato de que algumas bandas são contaminadas por outras fontes de vibrações além dos defeitos nos rolamentos, tornando-as portadoras de informações irrelevantes para a detecção das falhas, além de algumas vezes ocultar o defeito.

Neste trabalho, é apresentada uma metodologia para a comparação entre algumas bandas de altas frequências utilizadas na detecção de defeitos, pré-selecionadas através da função resposta em frequência associada a dinâmica da máquina que contém o rolamento. Deste modo, é verificada aquela mais apropriada para diagnosticar o defeito introduzido na pista externa de um rolamento rígido de uma carreira de esferas. A metodologia é aplicada a uma montagem experimental em laboratório.

## **2. VIBRAÇÕES GERADAS POR DEFEITOS EM UM ROLAMENTO**

Ao aplicarmos uma entrada na forma de uma força não periódica à uma estrutura sua resposta será um movimento transiente, uma vez que as perturbações produzidas não tem caráter permanente. As oscilações da estrutura ocorrerão preponderantemente nas suas frequências naturais (Thomson,1972).

Por exemplo, uma cavidade pontual na pista estacionária de um rolamento de esferas, produz um impulso cada vez que uma das esferas entra em contato com este defeito (McFadden, 1984). Este impulso é transmitido do anel do rolamento para o mancal e daí para o sistema, provocando oscilações de natureza impulsiva na estrutura do equipamento. Estes impulsos tem uma natureza repetitiva, com período bem definido, e portanto há uma frequência que caracteriza a ocorrência dos impulsos. No entanto, é impraticável observar esta frequência no espectro de um sinal medido na carcaça do mancal do rolamento visto que a energia contida nesta frequência, característica do defeito, é insuficiente para se destacar num espectro rico em frequências de maior energia, relativas a outras fontes. Algumas destas fontes produzem vibrações contendo altos valores de energia, numa faixa comumente abaixo de 1 KHz. Os defeitos, por sua vez, geram vibrações também com frequência abaixo de 1 KHz, porém devido a sua baixa quantidade de energia não se destacam no espectro de potência de um sinal medido no mancal do rolamento, que é dominado por frequências de maior energia. (Angelo, 1987) Entretanto, as vibrações geradas pelos defeitos excitam frequências naturais

da estrutura, que estão acima das frequência de alta energia. Além disso, as frequências naturais excitadas tem energia suficiente para serem detectadas no espectro.

O primeiro passo para extrairmos informações sobre os defeitos dos rolamentos das altas frequências é a determinação da função resposta em frequência para entrada impulsiva, aplicada na posição do rolamento sob análise, identificando as bandas que contém as frequências naturais preponderantes para um determinado ponto de medição. Esta etapa pode ser realizada experimentalmente ou também por um modelo matemático-computacional da estrutura. Algumas das bandas de frequências naturais serão portadoras mais eficientes das vibrações geradas pelos defeitos, em função das perdas de energia existentes nos caminhos de propagação da energia vibratória e do modo de excitação.

Monitorando o rolamento em funcionamento é possível verificar variações nas bandas das frequências naturais, identificadas na função resposta em frequência. Isto pode ser um sinal do aparecimento de defeitos. Em seguida procede-se a filtragem do sinal para a retirada das componentes de frequência provenientes de fontes indesejáveis e deixar o espectro dominado apenas pelas frequências naturais excitadas pelos defeitos. Assim, são filtrados os sinais referentes a desalinhamentos, desbalanceamentos e ruídos de baixa frequência. A seguir deve-se preparar o sinal filtrado para a detecção do envelope, o que envolve um processo de retificação. Finalmente, obtém-se o envelope do sinal por meio de um filtro passa-baixo, onde as frequências acima da frequência de corte são descartadas, sendo conservado apenas a contorno do sinal. O sinal resultante no domínio do tempo tem a forma de um trem de pulsos espaçados periodicamente, de acordo com a frequência característica defeito que será explicitada ao passarmos do domínio do tempo para o domínio da frequência. Os valores das frequências associadas ao defeitos de um rolamento podem ser previstas conhecendo-se suas características geométricas. No caso da pista externa, pode ser avaliada pela Eq. 1, onde  $P_d$  é o diâmetro primitivo,  $B_d$  é o diâmetro das esferas,  $n$  é o número de esferas e  $\phi$  é o ângulo de contato.

$$\text{Defeito na pista externa} = \frac{n \text{ RPM}}{2 \cdot 60} \left( 1 - \frac{B_d}{P_d} \cos \phi \right) \quad (1)$$

### 3. ESTUDO DAS BANDAS DE ALTAS FREQUÊNCIAS

A bancada experimental é constituída por um eixo montado sobre dois mancais, com o rolamento a ser testado instalado no meio do eixo, com uma caixa de fixação com capacidade de ajuste da pressão de montagem. O eixo é acionado por um motor de indução e um inversor de frequências. A carga radial estática sobre o rolamento é aplicada por peso morto. O sistema de medição utiliza um acelerômetro B&K tipo 4367 e um amplificador de carga tipo 2365. Os sinais dos experimentos são adquiridos por um microcomputador e por um analisador de sinais. O rolamento ensaiado é rígido, com uma carreira de esferas, gaiola de poliamida e folga normal, tendo  $P_d = 53,1$  mm,  $B_d = 12,5$  mm,  $n = 8$  e  $\phi = 0$ . A rotação do eixo é de 29,3 Hz, medida através do seu desbalanceamento. O defeito, introduzido no rolamento através de uma riscador, é um risco longitudinal na pista externa, que devido as característica da montagem é a pista estacionária. A frequência estimada para o defeito na pista externa, calculada de acordo com a Eq. 1, é igual a 88,6 Hz.

O esquema da bancada e do sistema de aquisição são mostrados na Fig. 1.

A Fig. 2 mostra a FRF, a coerência e a fase calculadas em 200 médias, com o sistema parado, para uma excitação impulsiva aplicada sobre a caixa do rolamento na direção radial, e medida na mesma caixa, porém numa posição oposta. As bandas em torno das frequências naturais de 2000, 3100 e 5700 Hz são candidatas a portadoras das periodicidades do defeitos, pois estão suficientemente afastadas da região de baixa frequência onde predominam as vibrações de alta energia não geradas pelos defeitos nos rolamentos.

Os sinais da aceleração radial da caixa do mancal foram adquiridos com frequência de amostragem de 20 KHz, com filtro passa-baixo do amplificador de carga ajustado em 10 KHz. Cada amostra no domínio do tempo tem 16384 pontos, sendo utilizada a média de 30 amostras no domínio da frequência.

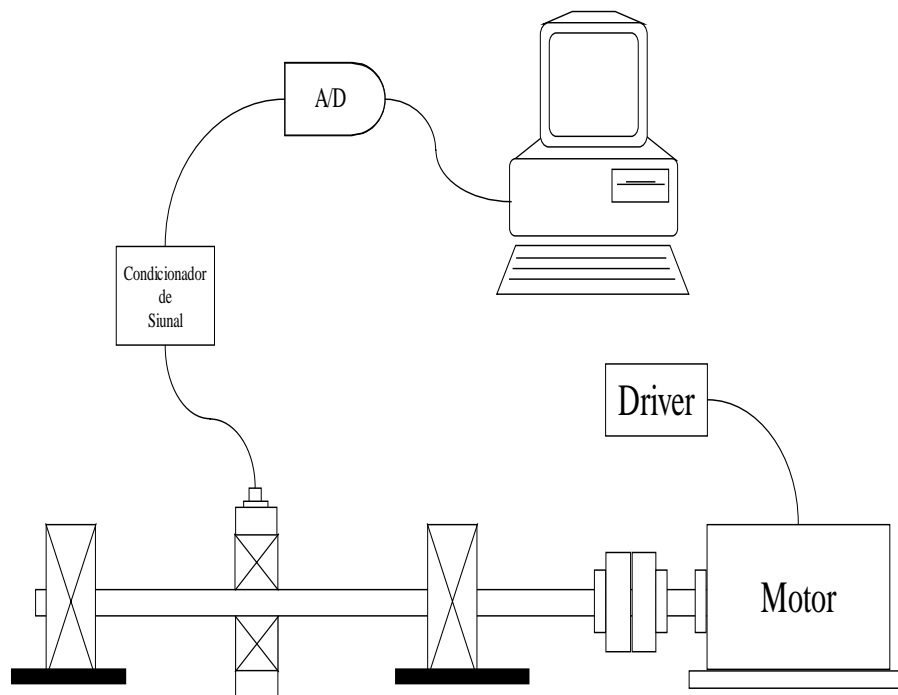


Figura 1- Esquema da Bancada e do sistema de medição

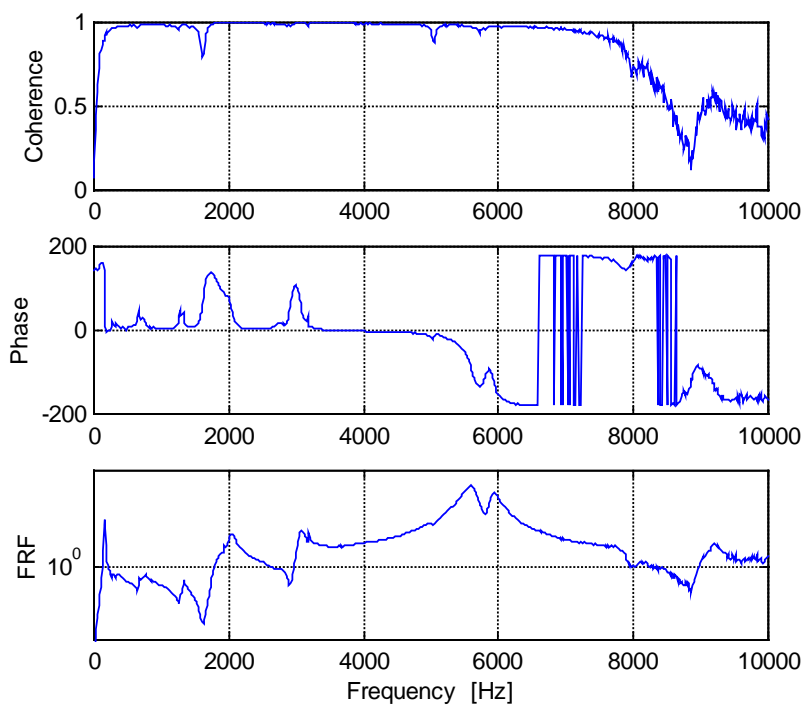


Figura 2- Coerência, Fase e Função Resposta em Frequência do sistema

A Fig. 3 apresenta uma comparação entre os espectros de frequência do rolamento novo e após a introdução do defeito. Pode-se notar que em ambos os casos ocorrem picos nas

posições próximas as frequências naturais determinadas pela análise modal. Além disso, há um aumento do nível de energia em todo o sinal com a introdução do defeito na pista externa. Isto ocorre pois, todas as fontes de excitação da estrutura foram mantidas e foi adicionado o defeito o que provocou um aumento na energia do sinal medido na caixa do mancal. Observa-se também que o aumento da energia não se dá de maneira uniforme em todo o espectro de frequências medido.

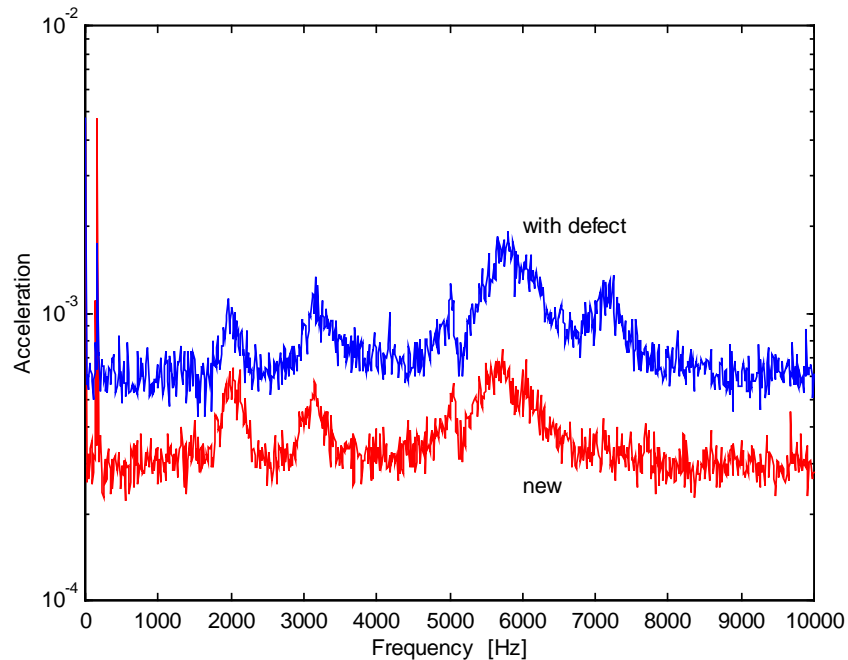


Figura 3- Comparação entre os espectros do rolamento novo e com defeito

A Fig. 4 apresenta o espectro do envelope do sinal filtrado em três posições diferentes: Fig. 4a, frequência central de 5700 Hz; Fig. 4b, frequência central de 3100 Hz e Fig. 4c, frequência central de 2000 Hz. Em todos estes casos foram utilizados um filtro passa-banda digital Butterworth de 4ª ordem com de 23% de banda passante e um filtro passa-baixo Butterworth digital de 4ª ordem, com frequência de corte de 250 Hz.

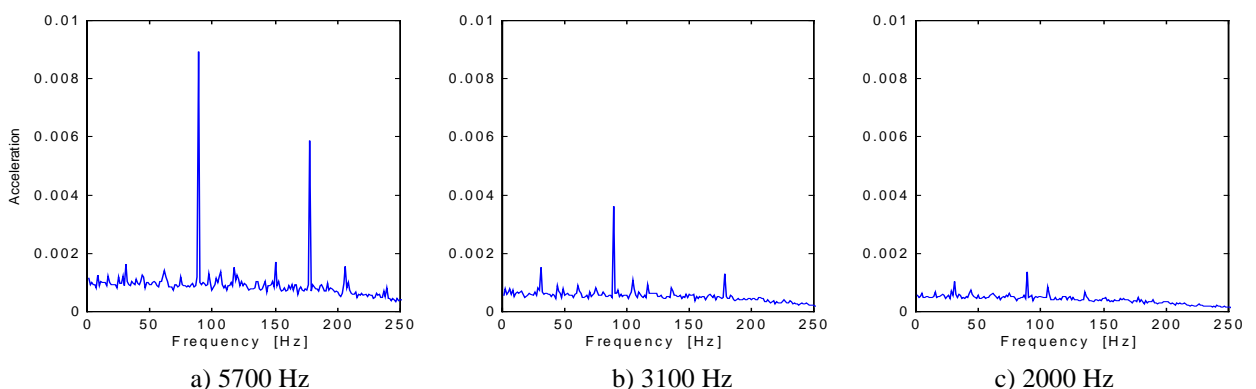


Figura 4 - Espectro do envelope do sinal: a) filtrado em 5700 Hz; b) filtrado em 3150 Hz e c) filtrado em 2000 Hz

As três bandas permitiram determinar a frequência característica do defeito na pista externa do rolamento, de 88,5 Hz, conforme o esperado. No entanto, na banda de frequência central igual a 2000 Hz a frequência característica do rolamento pode ser facilmente

confundida com outros valores de frequência, entre eles os harmônicos da frequência de rotação do eixo. Na banda de frequência central de 3100 Hz a frequência característica do defeito pode ser facilmente detectada, constituindo-se assim numa banda de frequência possível para se fazer a análise da falha. Contudo, fica evidente quando analisamos a Fig. 3 que a banda de alta frequência mais viável para se determinar a frequência relativa ao defeito na pista externa é aquela centrada em 5700 Hz. Apenas para ilustrar, a amplitude da aceleração em  $m/s^2$  na frequência característica é igual a 0.0090 para 5700 Hz, 0.0036 para 3150 Hz e 0.0013 para 1950 Hz.

Na Fig. 3, pode ser feita uma análise prévia destes resultados levando-se em consideração a variação na energia medida na caixa do mancal do rolamento novo e do rolamento no qual foi introduzido o defeito. O aumento da energia foi mais sensível nas bandas de altas frequências centradas em 3100 Hz e 5700 Hz.

Pelo fato da excitação causada pelo defeito ser periódica, aparecem harmônicos da frequência característica, que podem ser observados com mais nitidez na Fig. 4 a.

#### 4. CONCLUSÕES

As bandas de alta frequência centradas em 5700 e 3100 Hz, pré-selecionadas através da análise modal da estrutura, apresentaram um bom desempenho na detecção da falha introduzida no rolamento. No entanto, na banda centrada em 5700 Hz obteve-se um melhor resultado, principalmente pelo fato de apresentar um espectro de frequências do envelope dominado pela frequência característica do defeito e seus harmônicos. No entanto, a banda centrada em 2000 Hz não teve o desempenho esperado, uma vez tratar-se de uma banda de alta frequência relacionada com as frequências naturais da estrutura.

A resposta da banda de frequência a uma excitação impulsiva esta ligada aos modos naturais aos quais esta banda representa. Assim, uma excitação de natureza impulsiva diretamente neste modos permite obter uma resposta mais significativa nas frequências relativas a este modo de que em outras frequências relativas a um modo que é pouco influenciado por esta excitação. Além disso, para este caso, onde a excitação é gerada no interior do rolamento, o caminho de transmissão da excitação até o sensor também influencia na resposta obtida. Caso o sensor fosse posicionado de maneira a detectar mais significativamente a resposta de um modo relacionado com outras frequências a banda mais viável poderia ser outra.

A determinação da banda de frequência mais viável para a determinação e acompanhamento do defeito se torna muito importante, pois permite que se faça análises em uma região do espectro menos influenciada por fontes de excitações externas que fazem com que a análise da frequência característica do defeito seja prejudicada. Isto é devido ao fato de que a banda escolhida é filtrada numa faixa bastante estreita.

Assim, a escolha conveniente de uma banda para aplicação da técnica de análise das altas frequências na determinação de falhas em rolamento permite um diagnóstico mais preciso do defeito. No entanto, a pré-escolha depende de uma análise modal da estrutura, que permite a determinação das suas frequências naturais.

#### BIBLIOGRAFIA

- Angelo, M., Bruel & Kjaer technical review: Vibration Monitoring of machines, No.1, Naerum Offset, Denmark, 1987.
- Barkov, A. and N. Barkova, Condition Assessment and Life Prediction of Rolling Element Bearings; Part 1, Sound and Vibration, June 1995.
- Braun, S., Mechanical Signature Analysis: theory and applications, Academic Press, London, 1986.
- Hai-Ping, H., Guo-Rong, J., Jin-hua, Z. and Si-Kui, Y., Bearing steel fracture toughness and the spalling failure of roller bearing, Proceedings of first International Conference, on Computer-Aided Assessment and Control of Localized Damage, Portsmouth, Vol 1, 283-295 UK
- Harker, R. G. & Sandy, J.L., Rolling element bearing Monitoring and diagnostics, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, vol. 111, p.251-256, 1989.

- McFadden, P. D. and Smith, J. D, Vibration monitoring of rolling element bearings by the high-frequency resonance technique - a review, *Tribology International*, vol. 17(1), pg 3-10, 1984.
- Nunes, M.A.C, Dissertação de Mestrado, Diagnóstico de defeitos em rolamentos pela Técnica do Envelope, Dissertação de Mestrado, UFSC, Santa Catarina, Brasil, 1989.
- SKF Condition Monitoring, Application notes, 1996
- Thomson, W. T., *Theory of Vibration with applications*, Prentice Hall, Usa, 1972.

## **HIGH FREQUENCYS BAND SELECTION TO ANALYSE ROLLER BEARING DEFECTS**

**Abstract.** *Rotary machines operation condition monitoring is a indispensable action to detect their faults. The High Frequency Band Analysis technique has been efficiently used to detect incipient faults of roller bearings, by using the envelops of it's vibration signal. To improve the fault indentification it is necessary to choose wich frequency is more sensitive to the bearing defects. This paper proposes the use of the mechanical system's frequency response function to select the most sensitive frequency bands. Experimental tests are conducted using a rigid ball bearing with a defect introduced on it's outer race. The results obtained in slelected frequency bands are compared, to identify the impulses generated by the bearing faults.*

**Keywords:** *Characteristic frequency, High frequency band, Envelop*