

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECANICA

DIAGNÓSTICO DE DEFEITOS EM ROLAMENTOS
PELA TÉCNICA DO ENVELOPE

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA A UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA
CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA,
ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECANICA, AREA DE CONCENTRAÇÃO
VIBRAÇÕES E RUÍDO

MARCUS ANTONIUS DA COSTA NUNES

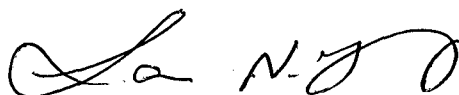
FLORIANÓPOLIS
SANTA CATARINA - BRASIL
JULHO - 1989

DIAGNÓSTICO DE DEFEITOS EM ROLAMENTOS
PELA TÉCNICA DO ENVELOPE

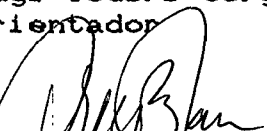
MARCUS ANTONIUS DA COSTA NUNES

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECANICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO VIBRAÇÕES
E RUÍDO, E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECANICA



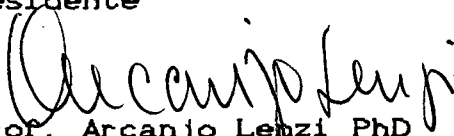
Prof. Samir Nagi Yousri Gerges, PhD
Orientador




Prof. Arno Blass, PhD
Coordenador



Prof. Samir Nagi Yousri Gerges, PhD
Presidente



Prof. Arcanjo Lenzi PhD
Membro



Prof. Nelson Back, PhD
Membro

O que anda em justiça, e o que fala com retidão; o que arremessa para longe de si o ganho de opressões; o que sacode das suas mãos todo o presente; o que tapa os seus ouvidos para não ouvir falar de sangue e fecha os seus olhos para não ver o mal.

Este habitará nas alturas; as fortalezas das rochas serão o seu alto refugio, o seu pão lhe será dado, as suas águas serão certas.

Os seus olhos verão o Rei na sua formosura, e verão a terra que está longe.

ISAIAS 33:15-17

Para:

ROSANGELA, minha esposa, meu grande e único amor, mãe dos meus filhos LUCAS, TIAGO e PEDRO, aos quais devo todo o tempo que dediquei a este trabalho.

JOSE E RUTH, meus pais, a quem devo tantas e tantas coisas mas a que mais importa é o grande e maior ensinamento que é: "O TEMOR DO SENHOR É O PRINCÍPIO DA SABEDORIA".

Agradecimentos

- . Universidade Federal do Espírito Santo e CAPES, pelo apoio financeiro;
- . Prof. Samir N. Y. Gerges, pela orientação e ensinamentos transmitidos;
- . Prof. Arcanjo Lenzi, pelo incentivo, amizade e valiosa colaboração durante todo o curso;
- . Prof. Nelson Back, pelo apoio;
- . Prof. José J. de Espíndola, pela amizade, ensinamentos e empréstimo de livros e equipamentos;
- . Prof. Nelson Diógenes do Valle, pela ajuda e colaboração;
- . Prof. Arno Blass, pelo apoio e compreensão;
- . Prof. Celeste Yeda S. Valentin, pela colaboração e paciência;
- . Sr. Sérgio de Lima Messina, pelo encorajamento e afeição;
- . Eng. Hilton Penha Silva, pela ajuda nas medições;
- . Prof. Roberto Müller Heidrich, pela ajuda e amizade;
- . Prof. Renan Roberto Brazzale, pela ajuda e amizade;
- . Adilto e Verina Teixeira, pela ajuda e amizade;
- . Aos amigos e colegas Paulo Zanin, William Barbosa, Eduardo Marcio, Ednardo Bezerra, Elvira Viveiros, Sandra Bonne, Hilário, Fernando, Márcio e Edmar pela amizade e momentos de descontração.

I N D I C E

Resumo

Abstract

Capítulo 1 - INTRODUÇÃO

1.1 Generalidades	01
1.2 Revisão Bibliográfica	03
1.3 Conteúdo deste trabalho	08

Capítulo 2 - VIBRAÇÕES EM ROLAMENTOS - TEORIA E PRÁTICA

2.1 Introdução	10
2.2 Vibrações em rolamentos - formulação	18
2.3 Técnica do Envelope - teoria e prática	23
2.4 Caso Simulado	33

Capítulo 3 - MEDIÇÃO PRELIMINAR DE ENVELOPE

3.1 Generalidades	39
3.2 Componentes do Sistema	40
3.3 Parâmetros de Medição em altas e baixas frequências	41
3.4 Identificação das frequências de ressonância do sistema	42
3.5 Rolamentos em boas condições	48
3.6 Calibração do Sistema	52
3.7 Medição usando a Técnica do Envelope	61

Capítulo 4 - MEDIÇÃO EM DIVERSOS TIPOS DE ROLAMENTOS
COM FALHAS DISTINTAS

4.1 Materiais e Métodos	77
4.2 Frequências relacionadas aos defeitos e tipos de rolamentos	
4.2.1 Rolamento tipo SKF	82
4.2.2 Rolamento tipo NSK	82
4.2.3 Rolamento tipo TR	83
4.3 Defeitos nas pistas estacionárias	
4.3.1 Defeito tipo puntual	83
4.3.2 Defeito tipo risco	88
4.3.3 Defeito tipo área	92
4.3.4 Defeitos causados por entrada de areia no interior de rolamentos	95
4.4 Defeitos nas pistas rodantes	99
4.5 Defeitos nas esferas	102
 Capítulo 5 - CONCLUSÕES	 105
 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	 108

R E S U M O

Um dos grandes acontecimentos nas indústrias modernas foi o aparecimento da manutenção preditiva. Através dos sinais de vibrações e ruído, medidos sem abrir ou parar o equipamento ou máquina, pode-se monitorar um sistema a fim de se detectar falhas nos componentes internos, ainda na fase inicial. Mancais de rolamentos são usados pela maioria dos equipamentos existentes nas indústrias. Os defeitos em rolamentos produzem séries de impactos que se repetem periódicamente, fazendo o nível de vibrações aumentar nas altas frequências relacionadas aos modos naturais de vibrações e nas frequências relacionadas aos próprios defeitos, como por exemplo defeitos na pista estacionária, defeito na pista rodante, defeito nas esferas ou roletes ou ainda defeitos nas gaiolas. A simples medição do espectro de vibrações falha ao tentar detectar esses picos de vibração nas baixas frequências devido aos níveis altos de vibrações causados por outros componentes do equipamento.

Este trabalho mostra que a técnica do envelope de vibrações aplicada em mancais de rolamentos, é uma técnica eficiente, sensível e segura na detecção dos picos de frequência relacionados aos defeitos nos rolamentos. Esses picos são mostrados no espectro do envelope, sem nenhum mascaramento de outras frequências expurias. O trabalho mostra os resultados de medições experimentais em 18 rolamentos com diversos tipos de defeitos diferentes, mostrando a variação de nível de vibração quando cada defeito em particular, vai aumentando no interior do rolamento.

ABSTRACT

Predictive maintenance based on the monitoring of vibration and noise of machines has been used greatly in modern industries in the last years, whereby faults in components of machines, such as rolling bearings, may be detected even in its initial stage during normal operation of machines.

Bearings are a very common element in machinery. Faults in the inner, outer races or in the rolling element produces series of impacts which excite the bearing support at its high frequencies natural modes. Spectrum measurements at low frequencies have proved to be less than adequate in the early stage detection. This is due to masking of the low level vibration at low frequencies by vibration from other components.

In this work the envelope technique has been studied and applied for faults detection on rolling bearings; the main advantage of this method is the low vibration level detection at low frequencies by measuring the high frequency resonance vibration. Results obtained from tests with eighteen rolling bearings with different kinds of faults have been presented, showing the progressive changing of the vibration levels when each specific type of fault increases.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 GENERALIDADES

Embora os equipamentos e máquinas modernas sejam construídas dentro de padrões rigorosos de tolerância, com materiais cada vez mais sofisticados, não existe equipamento perfeito, assim como não existe máquina ou equipamento isento de vibrações. Existe sempre um certo desbalanceamento residual que dá origem a vibrações e ruído em qualquer equipamento em funcionamento.

Com o aparecimento de folgas devido ao desgaste natural das peças e componentes em movimento, o nível de vibrações aumenta, assim como o ruído, o que pode resultar em quebra de equipamento e/ou até um estado de colapso na linha de produção que depende do equipamento em funcionamento.

Por causa do exposto acima, as indústrias modernas tem investido na manutenção de seus equipamentos com a finalidade de reduzir os custos de produção e operação das mesmas.

A finalidade principal do monitoramento de máquinas é conhecer melhor as características da própria máquina em questão, como também a de se conservar o equipamento em condições satisfatórias de operação para não diminuir ou parar a produção da indústria.

De todos os componentes associados com monitoramento de máquinas rotativas, o rolamento é o que requer maior atenção [1].

As razões para essas afirmações são basicamente as seguintes:

- a) O rolamento é um componente comum na grande maioria das máquinas;
- b) Ele geralmente falha através da fadiga;
- c) Por causa de sua ampla gama, ele é frequentemente usado em situações abusivas e inadequadas.

O rolamento é uma peça conhecida e utilizada praticamente em quase todas as máquinas, e embora eles sejam fabricados com aço de alta qualidade, usinados com grande precisão e temperados, os mesmos exigem cuidados especiais para que possam ter uma vida útil satisfatória e uma elevada eficiência. Mas, o que frequentemente acontece, é que o rolamento, por ser uma peça barata em relação ao equipamento onde está instalado (equipamentos de pequeno porte), nem sempre é tratado com o cuidado e atenção que merece, ocasionando então paradas em um equipamento de grande produção (equipamentos de grande porte, as vezes com rolamentos importados e caros) ou mesmo parada de uma linha de produção, gerando grandes prejuízos.

Medições de vibrações em superfícies de máquinas são usadas para detecção e diagnóstico de falhas em máquinas rotativas. Quando as medições são feitas em mancais de rolamentos, nota-se que os sinais são de difícil análise, quando se quer detectar se o rolamento em questão possui algum tipo de defeito na pista externa, na pista interna, na esfera ou mesmo na gaiola. Os defeitos em rolamentos produzem uma série de pulsos (impactos) que se repetem periodicamente. Dependendo do tipo de falha e aonde ela se localiza, tem-se um aumento de amplitude no

espectro de vibrações, numa determinada faixa de frequência. Como as medições são feitas na superfície do mancal onde se encontra o rolamento, o método comum de se analisar o espectro direto, ou seja, tomar um sinal de vibração e aplicar a transformada de Fourier, obtendo-se o espectro, não mostra claramente se o rolamento está ou não defeituoso porque, no mancal onde é tomado o sinal, existe nível alto de vibração, nesta faixa de frequência, que mascara o espectro de vibrações do rolamento, dificultando assim a análise.

1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Várias técnicas foram desenvolvidas para se detectar e diagnosticar falhas em rolamentos.

Stewart, R.M [1] faz uma comparação entre o sinal gerado por uma falha em uma engrenagem e o sinal de falha num rolamento. O trabalho, primeiramente, mostra qual é o objetivo primário do processamento de sinais para diagnose, e também que um sistema de monitoramento de máquinas é, ao longo de um pequeno tempo, muito mais barato do que uma manutenção simplesmente corretiva de falhas em máquinas e equipamentos. O autor trata, também, sobre inspeção em rolamentos, de várias técnicas que são usadas para diagnose nos mesmos (fator de crista, curtose, envelope, etc) e também quais dessas técnicas são as mais apropriadas para cada caso, por exemplo: falhas simples, falhas severas, etc. A conclusão do autor

é que a aplicação de técnicas de processamento de sinais em monitoramento de máquinas e equipamentos, é de uma valia grandiosa e imprescindível pois, o baixo custo e o alto conhecimento que se terá do equipamento em questão, juntamente com a diminuição de paradas desnecessárias, compensa o estudo e aplicação de cada técnica ou método em um particular equipamento.

Langley, R.S. [2] trata das várias definições do envelope de um processo aleatório. Sabe-se que num rolamento sem defeito, as vibrações geradas pelo rolamento das esferas sobre as pistas é de natureza aleatória, logo, este trabalho dá as definições matemáticas do envelope de um processo aleatório. O autor afirma que existe um grande número de definições de processo de envelope, e mostra as definições dos tres mais importantes.

Courrech, J. e Gaudet, M. [3] fazem uma pequena revisão sobre a natureza das vibrações em rolamentos, mostrando as diferenças entre o sinal de um rolamento avariado na pista estacionária e o sinal de outro rolamento avariado na pista rodante, e a dificuldade da análise num espectro direto da falha em qualquer uma das pistas. Os autores apresentam a técnica do envelope, mostrando o exemplo de um rolamento de esferas com falha em uma das pistas de rolamento. Em sua conclusão, os autores dizem que a técnica de análise de envelope, usada em rolamentos, reduz os problemas das altas frequências para problemas em baixas frequências, isolando a razão (taxa) de repetição de impacto. Isso é muito importante quando as taxas de repetição de impacto são instáveis por causa da flutuação da velocidade de

rotação, como a periodicidade dos harmônicos que não são detectados porque eles estão mascarados nas altas frequências, mas não a fundamental.

Engia, H. e Lippe, J. [4] iniciam o trabalho falando sobre a necessidade atual da manutenção preditiva nas indústrias modernas e que o uso de análise de sinais de vibração e ruído, como ajuda para um perfeito monitoramento de máquinas, pode ser dividido em dois (2):

- a) A detecção de um defeito interno e suas características. Achar uma técnica específica para cada aplicação a fim de obter-se de um sinal de vibração complexo, as características que são altamente relacionadas com o defeito interno, ou seja, achar uma técnica que tem a capacidade de extrair todos os tipos de falsos alarmes e alto ruído de fundo, fixando-se somente nos sinais do defeito.
- b) Estabelecer um critério quantitativo para condições de operação aceitáveis e necessidade de manutenção.

Os autores tratam ainda sobre as propriedades dinâmicas dos mancais de rolamentos, sobre os métodos de cálculo de impedância mecânica dos mesmos e sobre as faixas de frequência de interesse para um monitoramento ideal num mancal de rolamento. Por fim, mostram algumas técnicas de monitoramento e análise de sinais de vibração como por exemplo Método de Pulso de Choque e Envelope, fazendo uma comparação entre as mesmas. Os autores chegaram à várias conclusões:

- I) Rolamentos de esferas com falhas causam uma série de pulsos que contem um grande espectro de frequência;
- II) Pequeno desbalanceamento, desalinhamento e vibração ambiental causam excitação de baixa frequência que são, usualmente, detectadas em frequências abaixo de 200 Hz;
- III) A vibração detectada de um rolamento depende não somente da fonte de vibração, mas também do caminho de transmissão entre a excitação e o transdutor. Quando um sinal de vibração é transmitido através de uma estrutura de máquina, suas componentes de alta frequência são amortecidas mais rapidamente do que as componentes de baixa frequência.
- IV) Os rolamentos tem frequências de ressonância características que dependem da forma do rolamento e de seu assentamento.

Brüel Kjaer [5] em um folheto comercial mostra que falhas em rolamentos podem ser detectados antes da quebra dos mesmos. O trabalho explica o que é um rolamento, como ele falha, porque ele falha e como e porque ele vibra. Mostra como detectar falhas em um rolamento através de uma das seguintes técnicas: aumento do nível de vibrações, fator de crista, BPC (banda de porcentagem constante), zoom, cepstrum e técnica do envelope, dizendo quais são as vantagens e desvantagens de cada uma destas técnicas.

Randal, R.B. [6] fala sobre o monitoramento de máquinas e analisa como as falhas em rolamentos aumentam o nível de ruído e vibração do mancal. O autor mostra algumas técnicas usadas na análise de defeitos em rolamentos.

Martins, L.G e Gerges, S.N.Y [7] apresentam o método da curtose para detecção e análise de falhas em rolamentos, mostrando um caso real de estudo num mancal de rolamento e analisando a potencialidade do método.

Randal, R.B. [8] apresenta uma análise das técnicas de medição de vibração (movimento relativo-sonda de proximidade versus movimento absoluto-acelerômetro) em engrenagens, rolamentos e pás de rotores e mostra como o monitoramento de mancais de rolamentos pode ser feito usando-se a técnica do envelope, inclusive fazendo uma comparação com outras técnicas e mostrando, com exemplos reais, como a técnica do envelope é muito mais eficiente na detecção de falhas em rolamentos.

Martin, A [9] descreve o tipo de sinal de vibração que é esperado por falhas em elementos típicos e as técnicas de análise usadas para detecção prévia das mesmas. O autor mostra que num sistema com motor/rolamentos, motor/engrenagens ou motor/engrenagens/rolamentos, os espectros de frequência obtidos revelam que na região de baixa frequência predominam os defeitos de desbalanceamento, desalinhamento, eixo torto, etc. Na região de média frequência estão as frequências de engrenamento e de falhas em engrenagens. Na região de alta frequência estão os sinais originados de falhas internas em rolamentos. O autor trata ainda de algumas técnicas de diagnose de falhas em elementos de máquinas (envelope, cepstrum) mostrando a potencialidade e utilização de cada uma dessas técnicas.

1.3 CONTEÚDO DESTE TRABALHO

O capítulo 2 trata das vibrações em rolamentos, ou seja: dos tipos de rolamentos; dos defeitos que ocorrem nos mesmos; das origens e causas desses defeitos; das vibrações em mancais de rolamentos; das fórmulas matemáticas conhecidas para o cálculo das frequências relacionadas aos defeitos mais comuns nos rolamentos; de como a vibração de um mancal pode ser usada para o diagnóstico de defeitos em rolamentos e de como falhas em elementos de máquinas, tais como engrenagem, rotor, etc, geram picos em diferentes faixas de frequência. Esse mesmo capítulo trata ainda da formulação matemática dos sinais de vibração de rolamentos defeituosos, mostrando a influência da resposta impulsiva no caminho de transmissão entre o ponto de geração dos pulsos e o ponto de medição no sentido de amplificar ou atenuar um ou outro pico de frequência; da técnica do envelope em si, mostrando quais passos tem que ser dados para a sua obtenção, tanto analógicamente como digitalmente; mostra ainda o circuito elétrico simplificado do detector de envelope analógico construído para este trabalho, e mostra, por fim, a simulação de um sinal de vibração num mancal de rolamento e do uso da técnica do envelope neste sinal simulado.

O capítulo 3 mostra o sistema de medição usado neste trabalho, trata dos componentes do sistema, trata dos parâmetros de medição, mostra como foram identificadas as frequências de ressonância do sistema, mostra os espectros típicos dos rolamentos usados neste trabalho (quando os mesmos estavam em boas condições de uso ou seja, ainda eram novos), mostra como foi feita

a calibração do sistema de medição juntamente com as figuras e gráficos que explicam como se conseguiu essa calibração, e por fim mostra uma medição preliminar em três rolamentos novos SKF tipo 6305-Z, com defeitos feitos propositadamente, cada um em um lugar específico do rolamento: pista estacionária, pista rodante e esfera.

O capítulo 4 trata dos tipos de rolamentos usados neste trabalho, suas dimensões e os tipos de defeitos feitos propositadamente em cada um deles, fazendo-se uma comparação desses defeitos e os defeitos mais comuns que ocorrem na prática e mostra os cálculos das frequências relacionadas aos defeitos em cada tipo de rolamento. Esse capítulo trata ainda dos defeitos na pista estacionária dos rolamentos em questão, mostrando os espectros referentes á cada tipo de defeito pré fabricado, dos defeitos nas pistas rodantes bem como seus espectros e o que acontece com defeitos nas esferas.

O quinto e último capítulo mostra as conclusões a que se pode chegar através desse trabalho.

CAPITULO 2 - VIBRAÇÕES EM ROLAMENTOS

2.1 INTRODUÇÃO

O rolamento é um elemento de máquina (figura 2.1) que, geralmente, suporta (apoiar) eixos rotativos em máquinas. O termo rolamento abrange rolamento de esferas e de roletes. O tipo de rolamento mais usado em situações comuns é o rolamento de esferas.

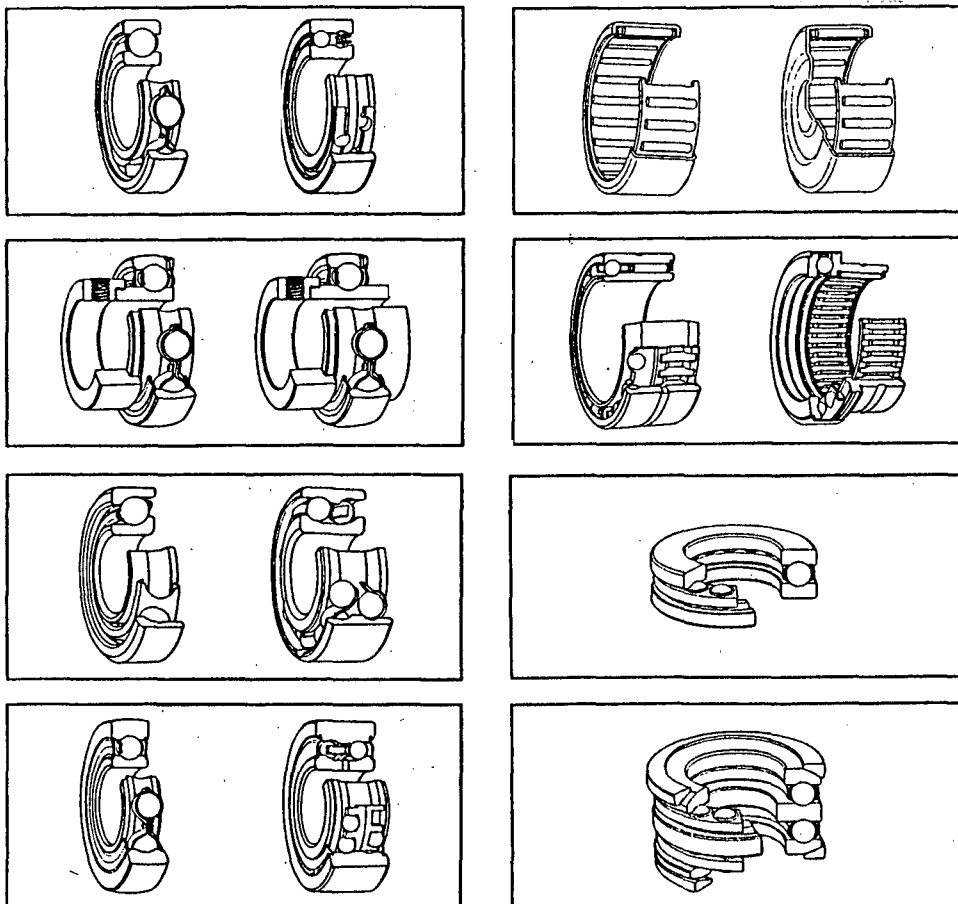


Figura 2.1 Exemplos de alguns tipos de rolamentos

Como qualquer peça ou componente, os rolamentos apresentam deterioração com o uso, uma vez que o desgaste é inevitável. Entretanto, um rolamento pode apresentar ruptura ou falha prematura por uma série de razões. Através das atuais técnicas [18], é possível verificar a extensão e deterioração de rolamentos, estabelecendo-se as seguintes causas:

- a) lubrificação inadequada;
- b) assentos defeituosos do eixo ou da estrutura;
- c) assentamento defeituoso no eixo ou na estrutura;
- d) retentores inadequados;
- e) montagem inadequada;
- f) desalinhamento;
- g) passagem de corrente elétrica;
- h) vibrações externas;
- i) desbalanceamento;
- j) defeitos de fabricação;
- k) fadiga, etc.

Mesmo que um rolamento seja perfeitamente fabricado, muito bem ajustado, montado, lubrificado, etc, muito provavelmente ele irá falhar por fadiga do material do qual é constituído. Um rolamento, seja qual for o seu tipo, sempre apresenta vibrações.

Normalmente os defeitos dos rolamentos são os seguintes:

- 1) defeitos na pista externa;
- 2) defeitos na pista interna;
- 3) defeitos nas esferas ou nos roletes;
- 4) defeitos na gaiola;
- 5) folgas provenientes do desgaste de um ou mais constituintes.

A figura 2.2 mostra os defeitos mais comuns que ocorrem nos rolamentos.

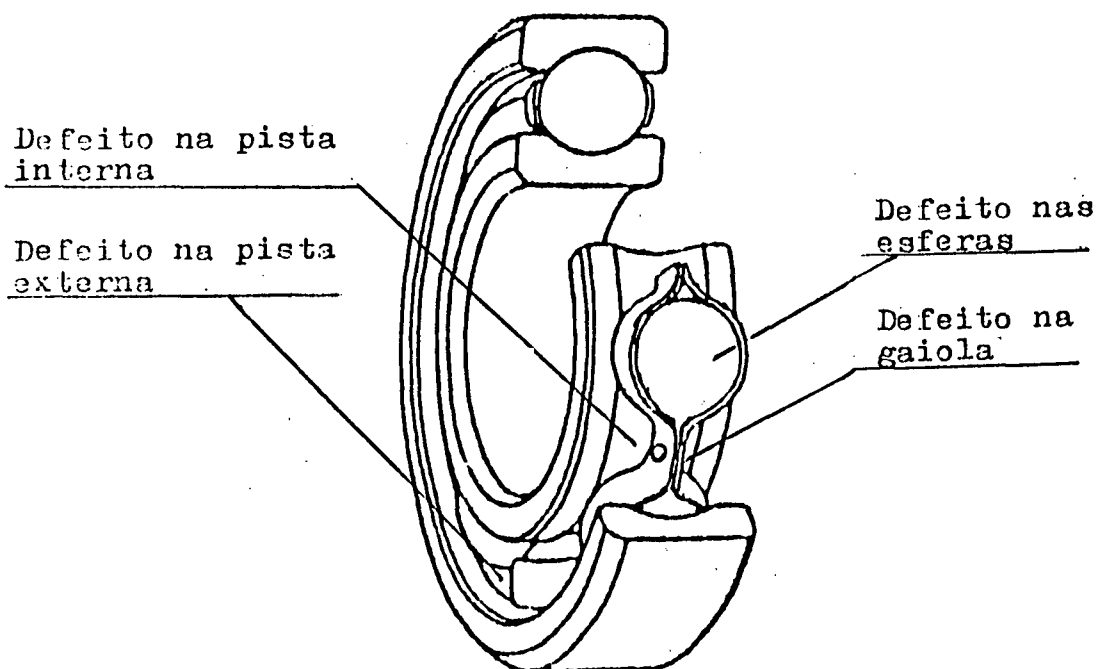


Figura 2.2 Tipos de falhas mais comuns em rolamentos

Sempre que uma falha se inicia, ela começa com ligeiros lascamentos na região carregada de uma das pistas. À medida que o defeito evolue, o lascamento aumenta em profundidade, começando a produzir marcas nos roletes ou esferas. Estas por sua vez transferem falhas para a outra pista, agravando a situação, encurtando a vida útil do rolamento, podendo até ocasionar a sua ruptura.

As vibrações geradas por um rolamento novo e perfeito, são de nível baixo e vistas como um ruído aleatório [5]. Com o aparecimento de falhas, as vibrações no rolamento começam a se

modificar e a apresentar frequências características. Estas frequências são denominadas "frequências de rolamento". A figura 2.3 mostra esquematicamente um rolamento usado para a dedução das equações, através das quais pode-se calcular as frequências relacionadas aos defeitos nos rolamentos.

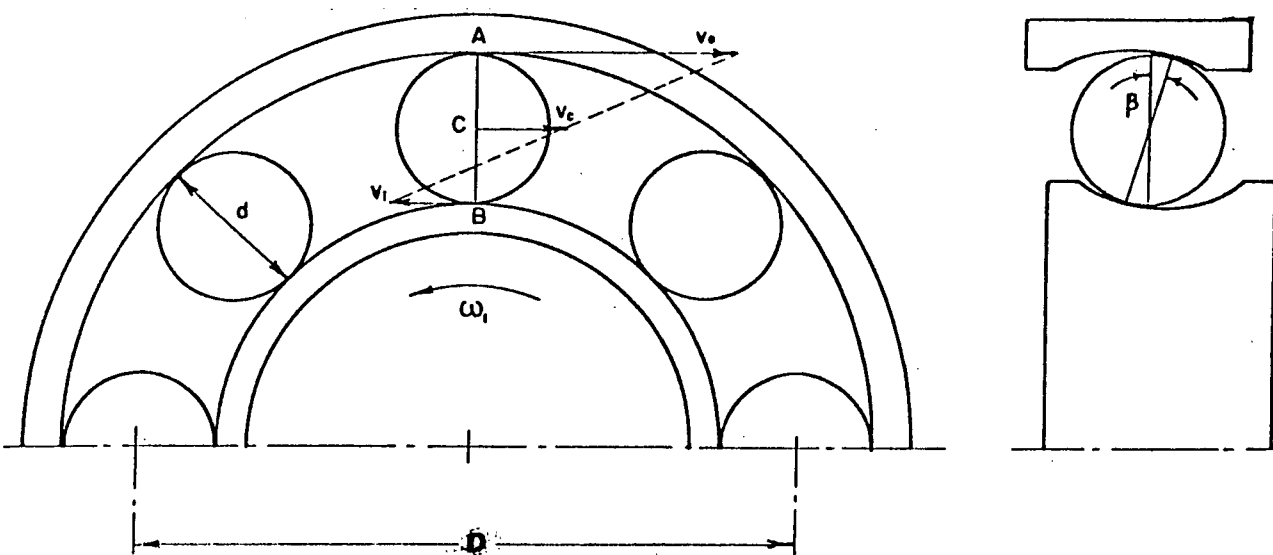


Figura 2.3 Esquema para dedução das frequências relacionadas aos defeitos

As frequências relacionadas aos defeitos, são dadas por [7,17]:

a) Defeito na pista de rolamento externa:

$$f_e(\text{Hz}) = \frac{n}{2} f_r \left[1 - \frac{d}{D} \cos \beta \right] \quad (1)$$

b) Defeito na pista de rolamento interna:

$$f_i(\text{Hz}) = \frac{n}{2} f_r \left[1 + \frac{d}{D} \cos \beta \right] \quad (2)$$

c) Defeito na esfera ou no rolete:

$$f_b(\text{Hz}) = \frac{D}{d} f_r \left[1 - \left(\frac{d}{D} \cos \beta \right)^2 \right] \quad (3)$$

d) Defeito na gaiola:

$$f_g(\text{Hz}) = \frac{1}{2} f_r \left[1 - \frac{d}{D} \cos \beta \right] \quad (4)$$

onde:

f_r = velocidade de rotação do eixo (Hz);

n = número de esferas ou roletes;

d = diâmetro da esfera ou rolete (mm);

D = diâmetro entre centro de esferas ou roletes (mm);

β = ângulo de contato.

A figura 2.4 ilustra a diferença entre um sinal produzido por uma falha na pista estacionária (aqui representada

como a pista externa) e o sinal produzido por uma falha na pista rodante (aqui representada pela pista interna). No primeiro caso, a falha sempre estará sujeita a uma carga, e o impacto resultante terá sempre a mesma amplitude. No segundo caso, a falha também se move e algumas vezes estará fora da região de carga, causando modulação na amplitude do impacto por causa da rotação do eixo. Isto dificulta ainda mais a análise do espectro de vibração do mancal de rolamento exigindo uma técnica mais apurada e sensível para a diagnose de tais defeitos[3].

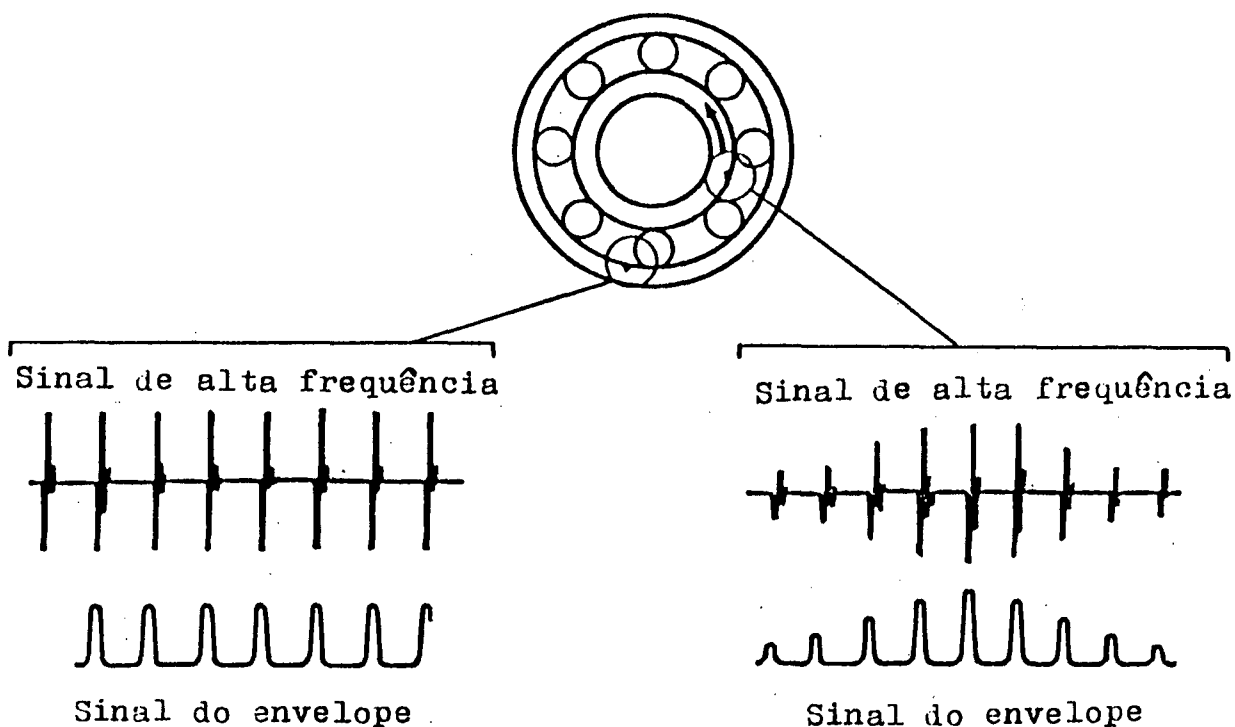


Figura 2.4 Sinais de vibração em rolamentos com falha na pista estacionária ou na pista rodante e seu consequente sinal de envelope

As falhas em rolamentos produzem uma série de impactos que podem ser comparados à pequenos impactos de martelos. Estes irão transmitir energia à estrutura do mancal onde está assentado o rolamento, excitando-o em suas frequências naturais (ressonâncias). A estrutura do mancal funciona, no caso, como um amplificador mecânico. Como esses impactos, em geral, são de curtíssima duração, eles contêm uma taxa muito alta de energia no espectro de frequência. Contudo, em geral, essa energia se concentra mais nas altas frequências do que nas baixas e médias frequências, como pode-se ver no caso típico da figura 2.5. Esta característica é muito importante para o uso da técnica do envelope, como será visto no próximo item.

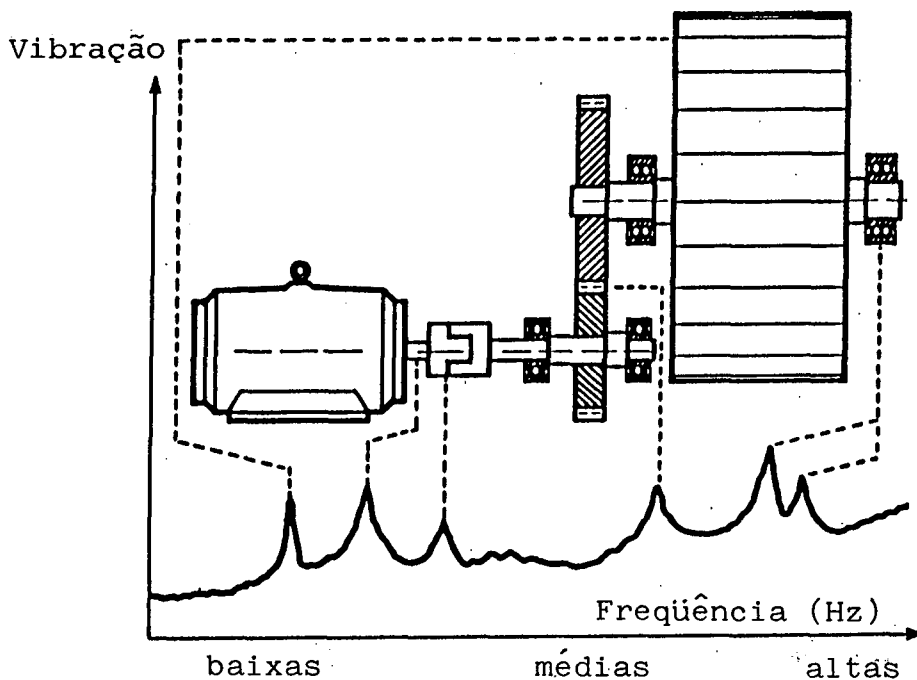


Figura 2.5 Falhas em diferentes tipos de elementos de máquinas gerando picos em faixas específicas de frequência.

A figura 2.6 ilustra o resultado da análise do impacto de uma falha interna num rolamento, excitando sómente uma ressonância.

A linha tracejada representa o espectro de energia de um pulso, que é a resposta em frequência do sistema que no caso possui um único grau de liberdade.

Se os pulsos são idênticos e espaçados uniformemente por T , o espectro da série de impactos seria um espectro de linha contendo todos os harmônicos da frequência de repetição $1/T$, com as amplitudes maiores nas proximidades da frequência de ressonância. A frequência de repetição pode ser determinada por uma ampliação (zooming) na região e, também, estabelecendo a separação entre os harmônicos.

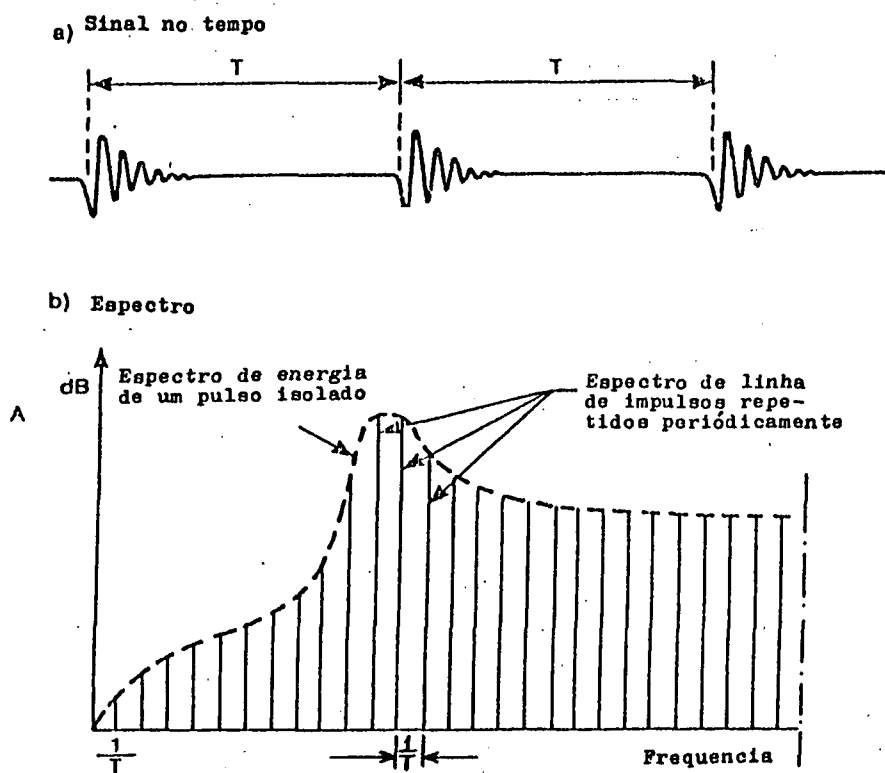


Fig 2.6 Espectro de frequência de um impacto de falha idealizado.

2.2 VIBRAÇÕES EM ROLAMENTOS - FORMULAÇÃO

Já foi visto que quando um defeito entra em contato com outra superfície, é gerado um pulso de curta duração que pode excitar muitas ressonâncias do sistema. Neste modelo, entretanto, supõe-se que apenas o modo de frequência Ω_i é significativo. Tal suposição não é absurda, conforme pode ser observado na figura 2.7. Outra simplificação é feita quando se assume que os pulsos são gerados em intervalos regulares, T_i . Assim, a resposta do sistema $x_i(t)$, mostrada na figura 2.7, é dada pela seguinte expressão:

$$x_i(t) = \sum_{j=1}^{\infty} g_i \left[t - j T_i \right] U \left[t - j T_i \right] \quad (5)$$

onde:

$$g_i(t) = A_i e^{-\alpha_i t} \text{sen } \Omega_i t; \quad (6)$$

$$U(t) = \begin{cases} 0 & \text{para } t < 0 \\ 1 & \text{para } t \geq 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$T_i = \frac{1}{f_i}$$

Nas expressões acima, α_i é o amortecimento da estrutura para o modo de frequência Ω_i e f_i é a frequência característica do defeito, referida anteriormente.

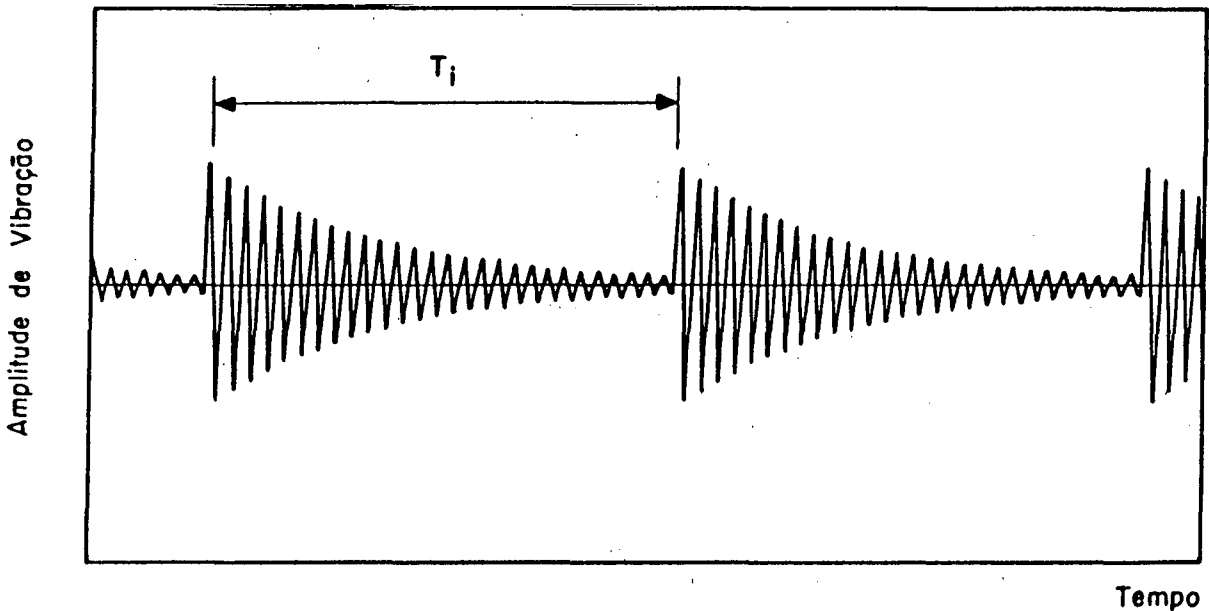


Figura 2.7 Representação da equação (5).

A assinatura de cada defeito, ou seja, o sinal característico de cada defeito, é modificado pela resposta impulsiva da estrutura de modo que, para m defeitos, o sinal medido $v(t)$, é dado por:

$$v(t) = \left\{ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{\infty} A_i e^{-\alpha_i(t-jT_i)} \sin[\Omega_i(t-jT_i)] U(t-jT_i) \right\} * h(t) \quad (8)$$

onde $h(t)$ é a resposta impulsiva do caminho de transmissão entre o ponto de geração dos pulsos e o ponto de medida. O símbolo $*$ significa produto de convolução.

O sinal medido em um rolamento com defeitos é a soma do sinal descrito pela equação (8) com um sinal aleatório de banda

larga, gerado pelo contato das superfícies em boas condições. Assim, a história temporal do sinal medido é bastante complicada, tornando difícil que se tirem conclusões úteis acerca do estado do rolamento.

Este problema pode ser resolvido fazendo-se a análise em frequência do sinal através da transformada de Fourier, TF, definida como:

$$TF[f(t)] = F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (9)$$

TF é um operador linear que muda a expressão entre os colchetes do domínio do tempo para o domínio da frequência. Em geral, $F(\omega)$ é uma função complexa da frequência. No espectro, torna-se fácil saber qual é o conteúdo de frequências do sinal.

A transformada de Fourier de uma função periódica é uma sequência de picos equidistantes no domínio da frequência, separados por um intervalo igual à frequência fundamental. O sinal descrito pela equação (5) é periódico conforme ilustra a figura 2.7. Pode-se mostrar que a sua transformada de Fourier $X_i(\omega)$ é dada por:

$$X_i(\omega) = 2\pi \sum_{n=0}^{\infty} X_{in}(\omega) \delta(\omega - n\omega_i) \quad (10)$$

onde:

δ é a função impulso unitário, também chamada de delta de Dirac;

$$\omega_i = \frac{2\pi}{T_i} ;$$

X_{in} é o coeficiente da série exponencial de Fourier, dado por:

$$X_{in} = \frac{1}{T_i} \int_{-\frac{T_i}{2}}^{\frac{T_i}{2}} g_i(t) e^{-jn\omega t} dt \quad (11)$$

O teorema da convolução no tempo diz que, se $X(\omega)$ é a transformada de Fourier de $x(t)$ e $H(\omega)$ a transformada de Fourier de $h(t)$, respectivamente, é válida a seguinte relação:

$$\text{TF} [x(t) * h(t)] = X(\omega) H(\omega) \quad (12)$$

Aplicando-se o teorema da convolução no tempo para a equação (8), tem-se:

$$V(\omega) = \left[2\pi \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{\infty} X_{in}(\omega) \delta(\omega - n\omega_i) \right] H(\omega) \quad (13)$$

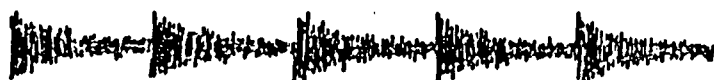
Devido à linearidade do operador, pode-se somar à equação (13) a transformada de Fourier do ruído aleatório de banda larga, $R(\omega)$, e será obtida a T.F. do sinal medido em um rolamento com defeito, $V_m(\omega)$, ou seja:

$$V_m(\omega) = \left[2\pi \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{\infty} X_{in}(\omega) \delta(\omega - n\omega_i) \right] H(\omega) + R(\omega) \quad (14)$$

O módulo da equação (14) representa um modelo matemático simplificado para o espectro do sinal de vibração de um rolamento com m defeitos localizados. Conforme se pode ver, além do ruído (R), o espectro deverá apresentar picos discretos nas frequências relacionadas aos defeitos e nas suas harmônicas. As amplitudes destes picos dependem da resposta em frequência do caminho de transmissão, $H(\omega)$, e dos coeficientes $X_{in}(\omega)$. O método da análise espectral baseia-se no fato de que X_{in} é proporcional à amplitude de A_i de $x_i(t)$, que está diretamente relacionada com a profundidade do defeito. Assim, quando um defeito evolui, a amplitude do pico na frequência a ele relacionada deverá aumentar.

A influência de $H(\omega)$ pode ser a de amplificar uns picos e atenuar outros. Por isso, o método baseia-se no conhecimento do espectro do rolamento novo em cada montagem particular, para comparação com os espectros obtidos em medições periódicas.

A figura 2.8 mostra uma comparação entre o sinal no tempo simulado (equação 5) e um sinal medido num rolamento.



a) Sinal Simulado



b) Sinal Real

Figura 2.8 - Comparação entre um sinal simulado e um sinal real

2.3 TÉCNICA DO ENVELOPE - TEORIA E PRÁTICA

Conforme foi mostrado no modelo matemático, o defeito em um rolamento excita os modos de ressonância do mancal nas altas frequências.

Os seguintes passos, ilustrados na figura 2.9, mostram a técnica do envelope.

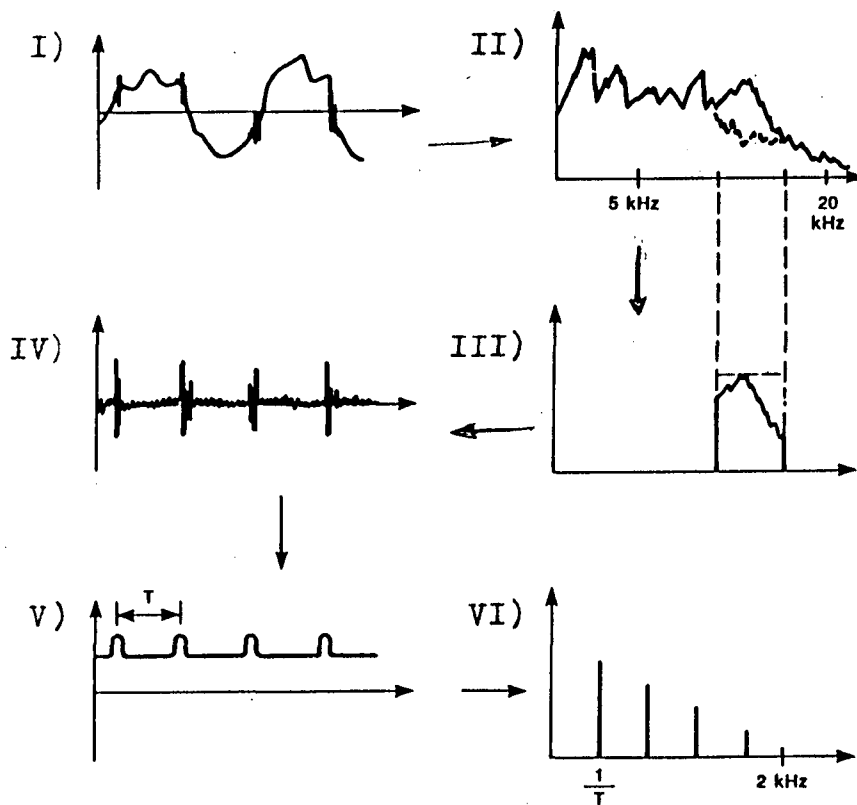


Figura 2.9 Esquema da Técnica do Envelope

Os passos são:

I) é o sinal de vibração no tempo medido na superfície do mancal;
 II) é o espectro de frequência correspondente ao sinal do primeiro passo, obtido pelo uso da transformada de Fourier. O aumento do

nível numa particular faixa de frequência, é detectado quando uma ressonância estrutural é excitada por uma falha.

III) é o espectro de frequência extraído por um filtro passa banda ao redor da faixa de frequência detectada no passo II. Este espectro contém a ressonância estrutural que pode ter sido excitada pelos impactos produzidos por uma ou mais falhas internas do rolamento.

IV) é o sinal no tempo correspondente ao espectro do passo III, que contém somente as frequências de ressonância que são moduladas pela frequência dos impactos.

V) este passo pode ser tanto analógico como digital, como será detalhado mais adiante. O sinal no tempo (passo IV) é então retificado e abrandado por um detector para produzir o envelope do sinal no tempo. Consequentemente, o envelope contém somente as componentes de frequência de baixa modulação relacionadas com as razões de impacto.

VI) é o espectro do envelope analisado nas baixas frequências, a fim de se determinar as frequências de impacto.

Como foi abordado no passo IV da figura 2.9, pode-se obter o envelope do sinal no tempo através de um aparelho analógico denominado "detector de envelope" ou através de técnica digital, utilizando a transformada de Hilbert.

O princípio da técnica digital é o seguinte:

Um sinal modulado em amplitude e fase pode ser representado da seguinte forma:

$$a(t) = \text{Re} \left\{ A(t) e^{i\phi(t)} \right\} \quad (15)$$

onde a função de amplitude $A(t)$ e a função de fase $\phi(t)$ são funções do tempo e Re é a parte real da função. Para uma modulação de amplitude pura, $\phi(t)$ é dado por:

$$\phi(t) = 2 \pi f_1 t \quad (16)$$

onde f_1 é uma frequência portadora (constante).

Com a condição de que o fasor $e^{i\phi(t)}$ contenha apenas frequências positivas, então a função complexa $A(t) e^{i\phi(t)}$ é conhecida como uma função analítica, e sua parte imaginária é a transformada de Hilbert da parte real, isto é:

$$b(t) = \text{Im} \left\{ A(t) e^{i\phi(t)} \right\} = H \{ a(t) \} \quad (17)$$

Assim, de algum sinal no tempo $a(t)$, o sinal analítico equivalente pode ser derivado usando Hilbert, transformando $a(t)$ para se obter um componente imaginário. A amplitude do sinal analítico será, então, o envelope (i.e. componente de amplitude modulada) do sinal original.

Pode-se definir, ainda, da seguinte forma:

Seja $x(t)$ um processo aleatório, que pode ser escrito como a parte real de um processo complexo $z(t)$, com a seguinte forma:

$$z(t) = x(t) + iy(t) \quad (18)$$

onde $y(t)$ é um processo aleatório arbitrário.

Usando-se a equação 18, $x(t)$ pode ser expresso como:

$$x(t) = a(t) \cos \phi t \quad (19)$$

logo

$$a(t) = |z(t)| = \left[x^2 + y^2 \right]^{1/2} \quad (20)$$

e

$$\phi(t) = \tan^{-1} \left[\frac{y}{x} \right] \quad (21)$$

Então, $a(t)$ e $\phi(t)$ são conhecidos como o envelope e a curva de fase associados com $x(t)$, respectivamente. O processo aleatório $y(t)$ deve ser escolhido de tal modo que $a(t)$ tenha o sentido físico requerido, isto é, que $a(t)$ seja uma curva suave unindo os picos de $a(t)$, como mostra a figura 2.10.

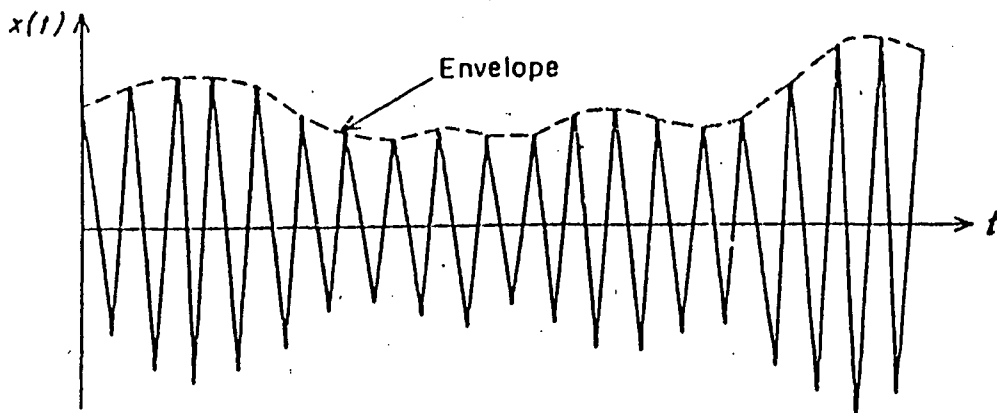


Figura 2.10 Exemplo do envelope de um sinal

Escolhas adequadas de $y(t)$ podem ser determinadas considerando o caso onde $x(t)$ é harmônico, ou seja $x(t) = A \cos \omega t$. Neste caso, o envelope requerido é A , o que implica que $y(t) = \pm A \sin \omega t$. Este resultado para $y(t)$ pode ser relacionado funcionalmente para $x(t)$ por dois caminhos:

I) Um caminho é a derivada no tempo de $x(t)$, $y = -\dot{x}/\omega$,

II) Outro caminho é através da transformada de Hilbert de $x(t)$, $y = \bar{x}$.

A transformada de Hilbert é definida como [11]:

$$\bar{x}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (22)$$

E uma de suas propriedades é converter $\cos \omega t$ para $\sin \omega t$ e $\sin \omega t$ para $-\cos \omega t$.

Baseado neste argumento, duas definições para o envelope de um processo aleatório são possíveis:

$$a_1(t) = \left[x^2 + \left(\frac{\dot{x}}{\omega_c} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (23)$$

e

$$a_2(t) = \left[x^2 + \bar{x}^2 \right]^{1/2} \quad (24)$$

A equação (23) é a definição de envelope de Crandall e Mark [12] e a equação (24) é a definição de envelope sugerida por Dugundgi [13].

A definição de envelope de Crandall e Mark é conhecida como "envelope de energia" e é usada em processos estocásticos[11].

O envelope de Dugundgi é usado em problemas de vibrações aleatórias e como extensão, em processos aleatórios não estacionários [14,15]

Na prática, o que foi usado neste trabalho foi um detector de envelope (analógico), sintonizado na faixa de frequência usada neste trabalho, com o seguinte esquema elétrico simplificado, mostrado na figura 2.11. O diodo usado é um diodo de sinal comum. O valor do capacitor é de $35 \cdot 10^{-9}$ F e a resistência 1 Kohm.

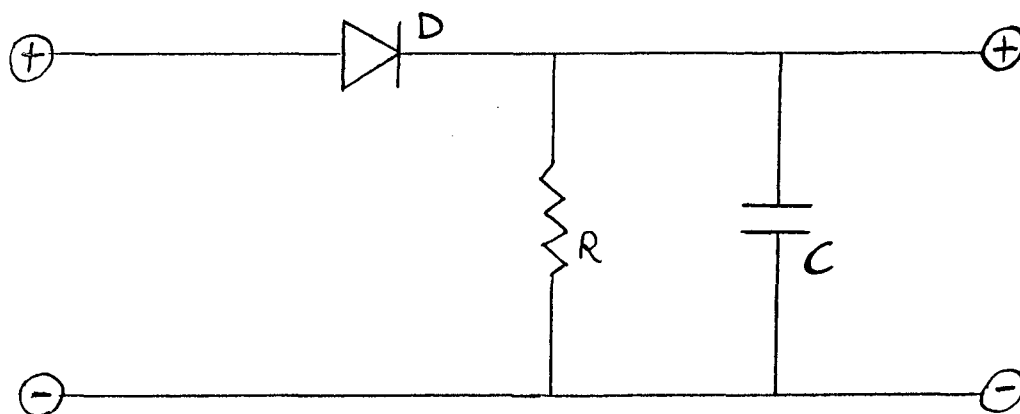


Figura 2.11 Esquema elétrico simplificado do circuito envelope.

Em conjunto com este circuito, em cada sinal medido neste trabalho, foi feito, sempre, uma comparação entre o sinal de

envelope obtido pelo circuito detector de envelope e o envelope obtido pela técnica digital (usando a transformada de Hilbert).

Na prática, o envelope de um sinal de vibração do rolamento medido na superfície do mancal era obtido de duas maneiras: pelo método analógico e pelo método digital.

O esquema da figura 2.12 ilustra a obtenção do envelope de um sinal de vibração de um rolamento medido na superfície do mancal, usando o detector de envelope.

O esquema da figura 2.13 ilustra a obtenção do envelope de um sinal de vibração de um rolamento medido na superfície do mancal, usando a técnica digital.

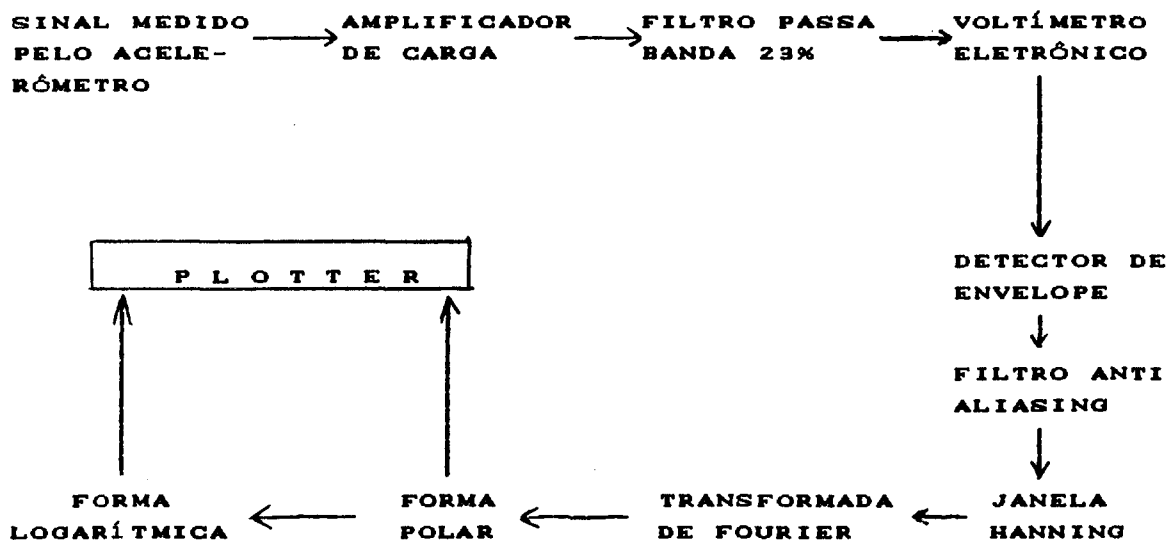


Figura 2.12 Obtenção do envelope - método analógico

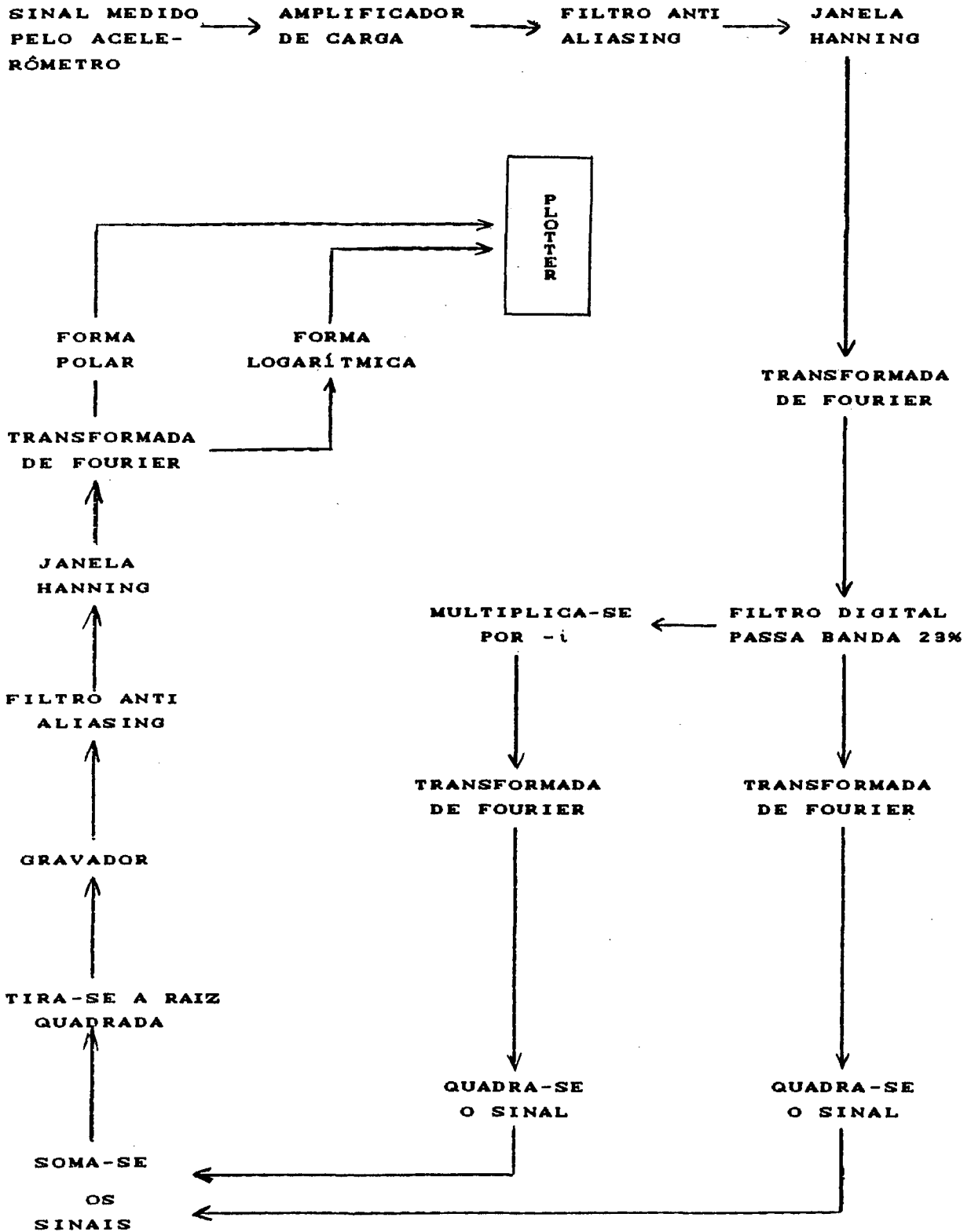


Figura 2.13 Obtenção do envelope - método digital

Mais precisamente, a obtenção do envelope de um sinal de vibração pelo método digital é feita da seguinte maneira, no analisador de frequência HP 5451-C.

- a) O sinal original de vibração do rolamento é medido e posteriormente guardado em um bloco específico (sinal 1);
- b) Aplica-se a transformada de Fourier neste sinal;
- c) Multiplica-se esse sinal por $-i$;
- d) Aplica-se a transformada de Fourier inversa;
- e) Quadra-se esse sinal e guarda-o em outro bloco (sinal 2);
- f) Quadra-se o sinal 1 original (sinal 3);
- g) Soma-se os sinais 2 e 3;
- h) Tira-se a raiz quadrada desta soma.

Com este último passo, obtém-se o envelope do sinal original.

Uma das dificuldades do processamento da técnica digital para a obtenção do envelope, no sistema HP 5451-C é que para a obtenção do espectro do sinal de envelope, a resolução de frequência requerida deve ser alta, ou seja, Δf deve ser pequeno. Como a banda de frequência para obtenção do envelope do sinal original, neste trabalho, se situa entre 0 a 12,5 kHz, tem-se que $\Delta f = 12,21$ Hz, inviabilizando uma boa análise na faixa de frequência de interesse (baixas frequências). Por isso, deve-se gravar o sinal do envelope em um gravador e, depois tornar a entrar com esse mesmo sinal no analisador de Fourier, mas agora na região de baixa frequência. Esse procedimento acarreta muitos problemas, tais como: tempo de execução, aumento do ruído de fundo, digitalização imperfeita do sinal na baixa frequência, etc.

Por causa desses problemas é que escolheu-se a técnica analógica.

A figura 2.14 mostra, também, como a técnica do envelope é usada para detecção de falhas em rolamentos. Na parte (a) da figura em questão, o rolamento não apresenta nenhum defeito e seu nível de vibração é baixo. Na parte (b), um ou mais defeitos foram diagnosticados previamente, indicando claramente as frequências de interesse. Na parte (c), o defeito já existe há muito tempo, ocasionando o aumento do nível de vibração do rolamento e dificultando a análise das frequências de interesse.

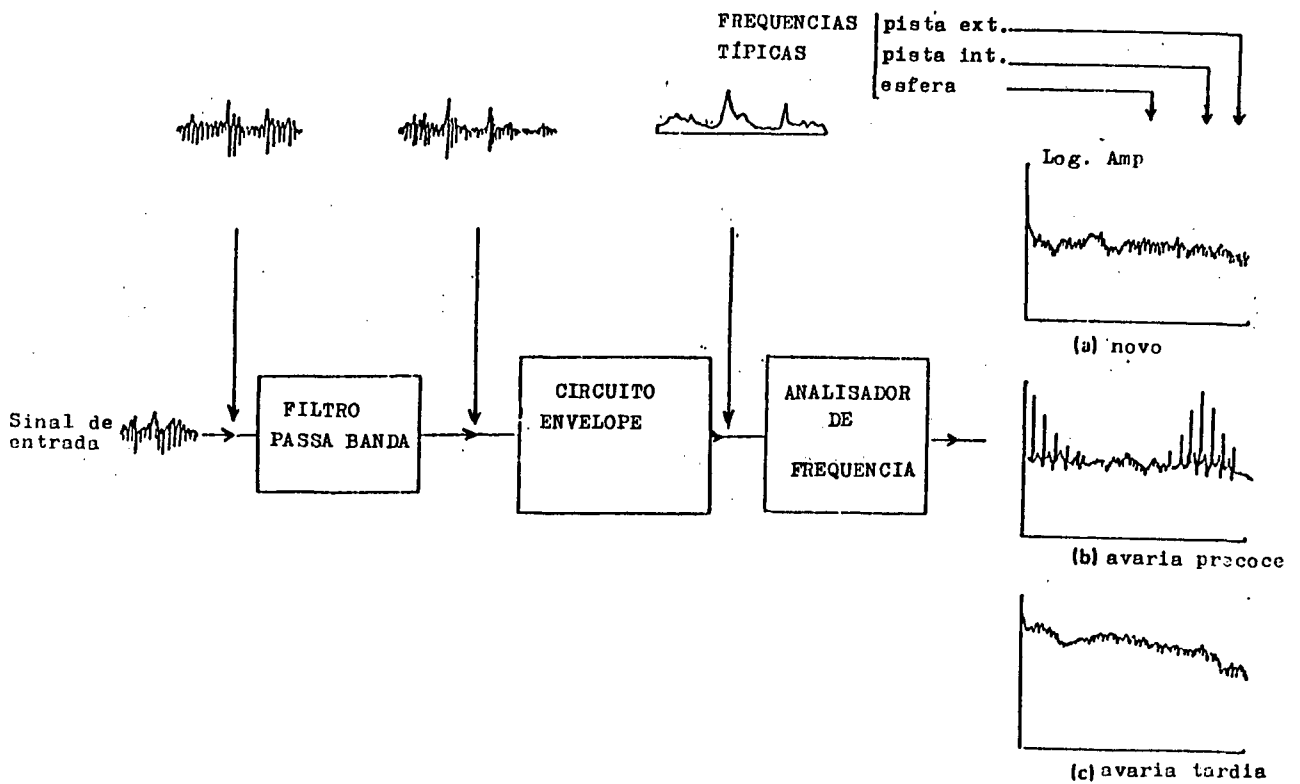


Figura 2.14 Técnica do envelope

2.4) CASO SIMULADO

Neste item, a simulação do sinal de vibração de um rolamento com falha será feito, objetivando-se a obtenção do envelope e seu respectivo espectro, usando-se, primeiramente o método analógico (detector de envelope) e depois o método digital (transformada de Hilbert).

A simulação do sinal será a seguinte:

- I) Um sinal de decaimento exponencial de frequência igual à 97,66 Hz, gerado digitalmente, é guardado num bloco do sistema HP 5451-C (sinal 1 - bloco 1), figura 2.15;
- II) Um outro sinal, ruído branco, na faixa de 2 Hz a 20 kHz gerado num gerador de sinais, é guardado em outro bloco (sinal 2 - bloco 2), figura 2.16;
- III) Multiplicou-se o sinal 1 (bloco 1) pelo sinal 2 (bloco 2) e obteve-se um sinal modulado (sinal 3), conforme a figura 2.17. Este sinal simulado foi então filtrado em 23% com filtro digital, centrado em 6006 Hz, conforme mostra a figura 2.18 e posteriormente guardado num gravador de sinais para eventual análise.

Os sinais originais, como pode-se ver nas figuras 2.15 e 2.16 foram obtidos com frequência máxima de 25 kHz e frequência de corte igual a 12,5 kHz, que são as frequências de igual valor do caso real simples que será visto no próximo capítulo.

Primeiramente, o sinal gravado passou pelo detector de envelope e obteve-se o sinal, mostrado na figura 2.19, com o consequente espectro, na baixa frequência, mostrado na figura 2.20..

O próximo passo foi obter-se o envelope do sinal gravado, usando o método digital, obtendo-se o sinal mostrado na figura 2.21 e o seu conseqüente espectro na baixa freqüência, figura 2.22..

Pode-se notar que, como já era esperado, a freqüência moduladora (97,66 Hz) aparece no espectro do envelope obtido pelo método analógico, juntamente com suas harmônicas e com pouquíssimas outras freqüências espúrias que mascaram (dificultam) a análise do espectro.

O espectro do envelope digital mostra, também a freqüência moduladora (97,66 Hz), e as outras freqüências harmônicas da fundamental.

Essa simulação obedeceu a um critério rígido de semelhança com um sinal de vibração de um rolamento, medido na superfície do mancal, para que esta análise fosse coerente. A freqüência moduladora de 97,66 Hz poderia ser a freqüência de um defeito na pista externa, por exemplo. O ruído branco, na faixa de 2 Hz a 20 kHz, simula o ruído aleatório de um rolamento sem defeito, sendo depois filtrado por um filtro passa-banda digital em 23%, com freqüência central de 6006 Hz.

Então essa simulação mostrou, como também se verá adiante, que a técnica do envelope usada para detecção de falhas em rolamentos é uma técnica muito poderosa e segura, que poderá ser muito usada em grandes indústrias com total êxito e com grande diminuição de falhas e quebras em equipamentos.

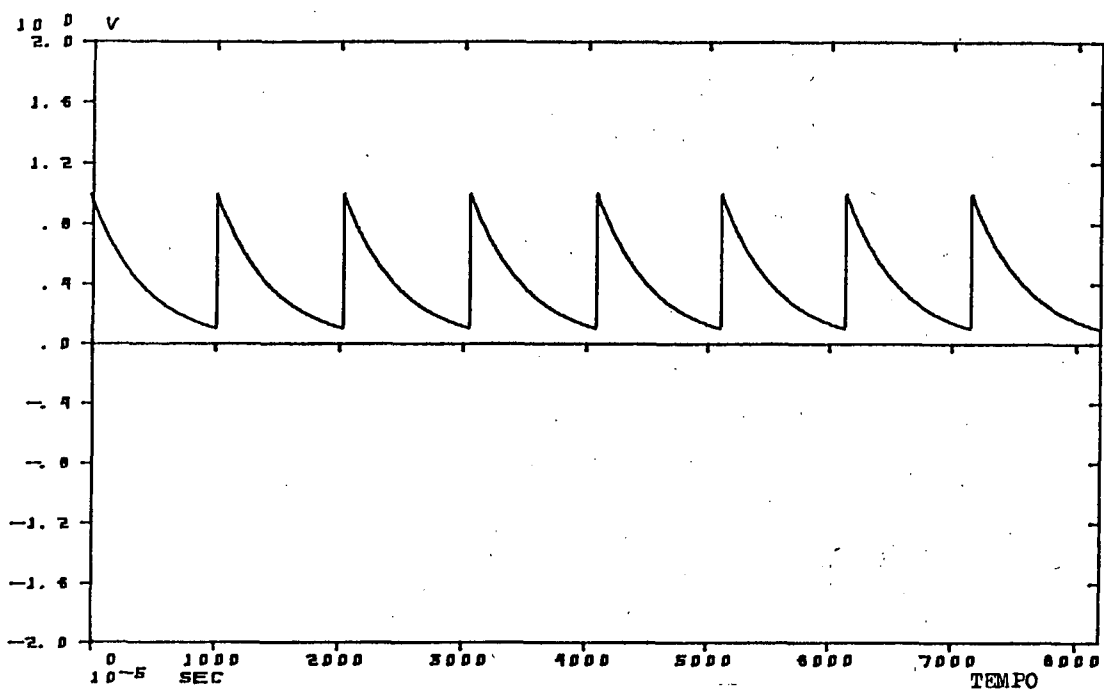


Figura 2.15 Sinal de decaimento exponencial.

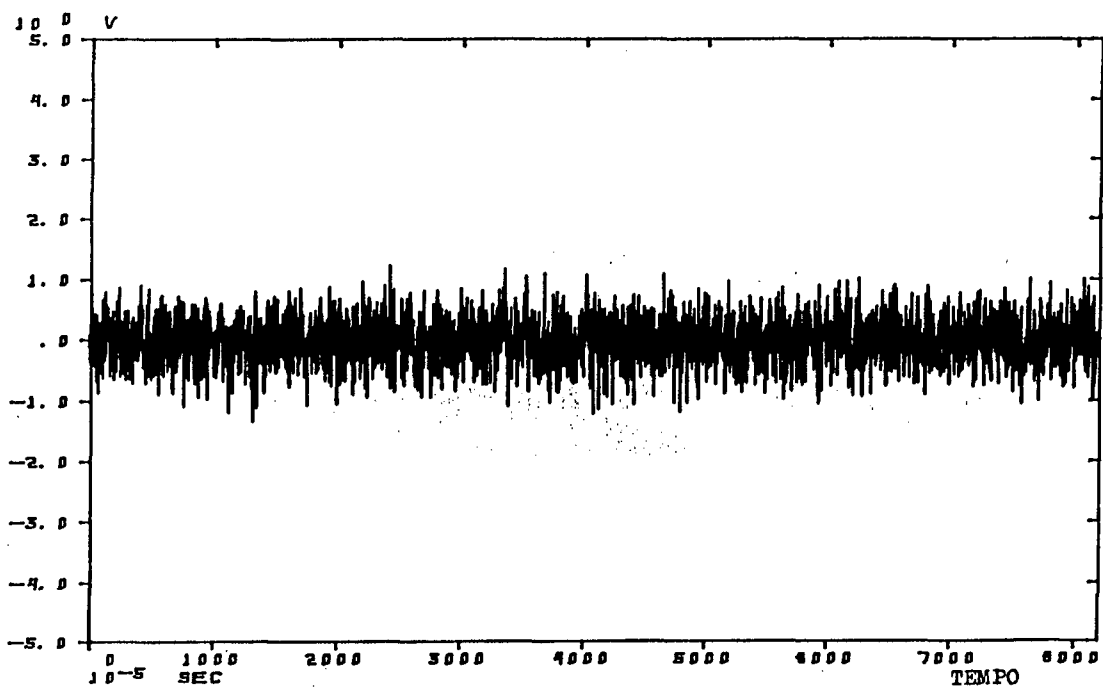


Figura 2.16 Ruído branco - faixa de 2 Hz a 20 KHz.

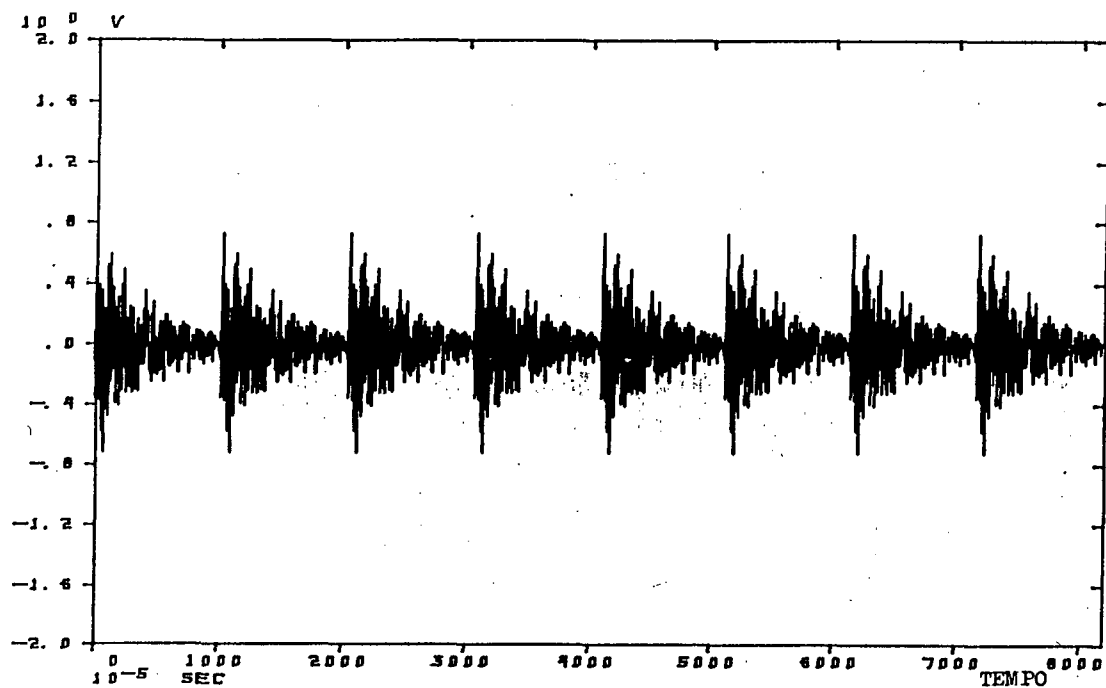


Figura 2.17 Sinal modulado.

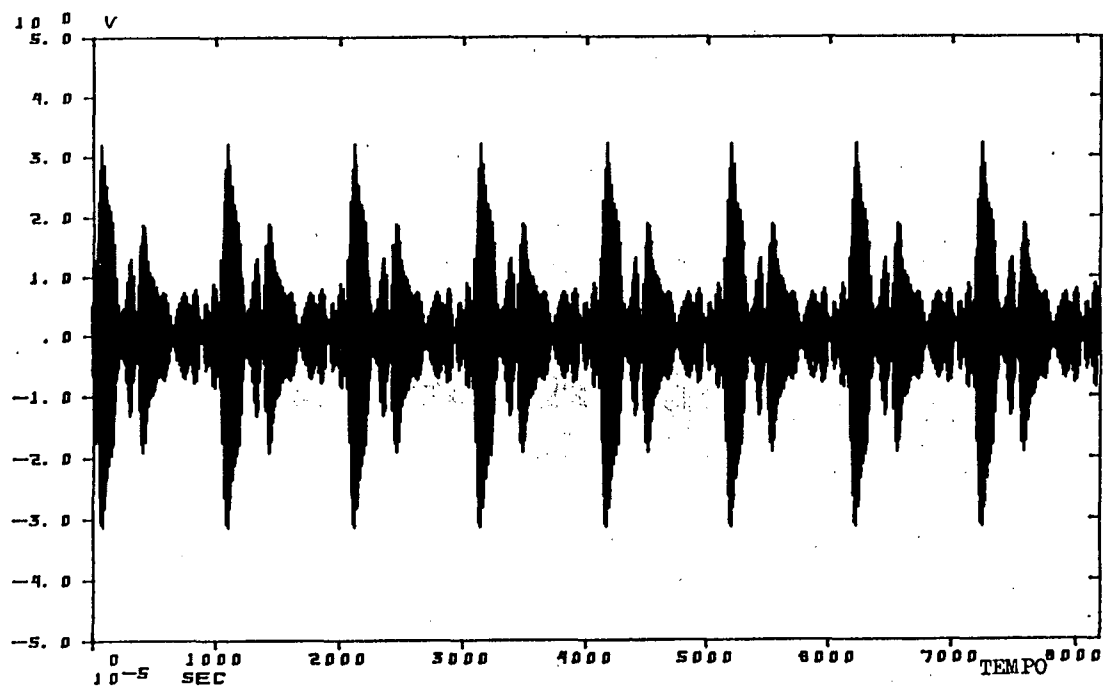


Figura 2.18 Sinal da figura 2.17 filtrado em 23% com frequência central de 6006 Hz.

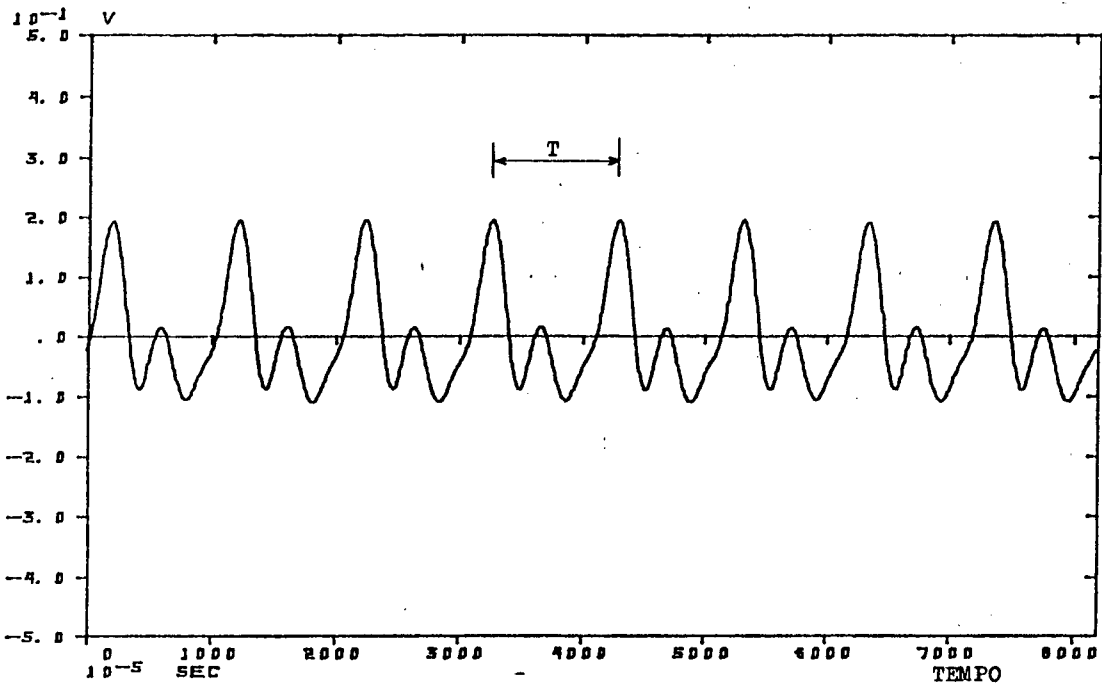


Figura 2.19 Sinal de envelope no tempo - método analógico.

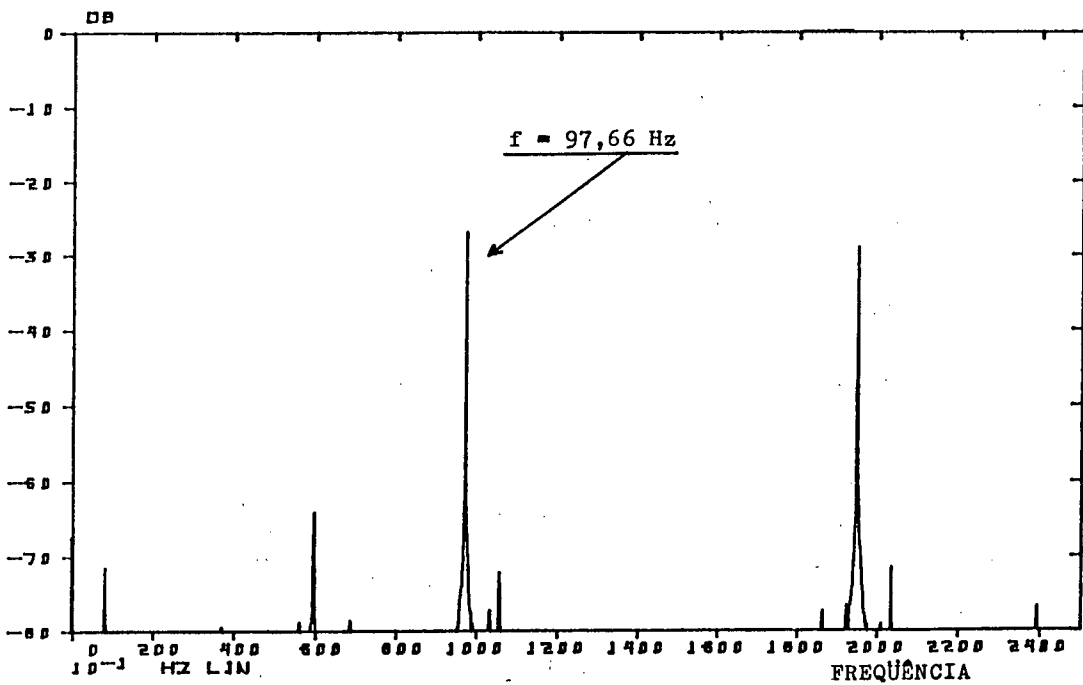


Figura 2.20 Espectro na baixa frequência do sinal da fig.2.19.

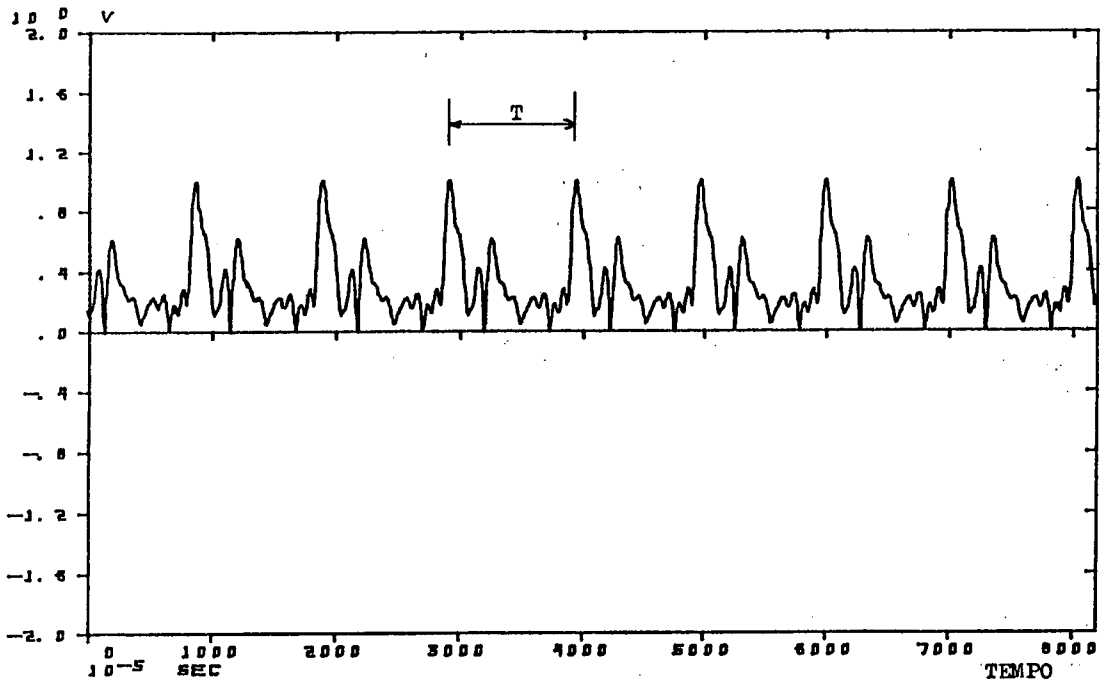


Figura 2.21 Sinal de envelope no tempo - método digital.

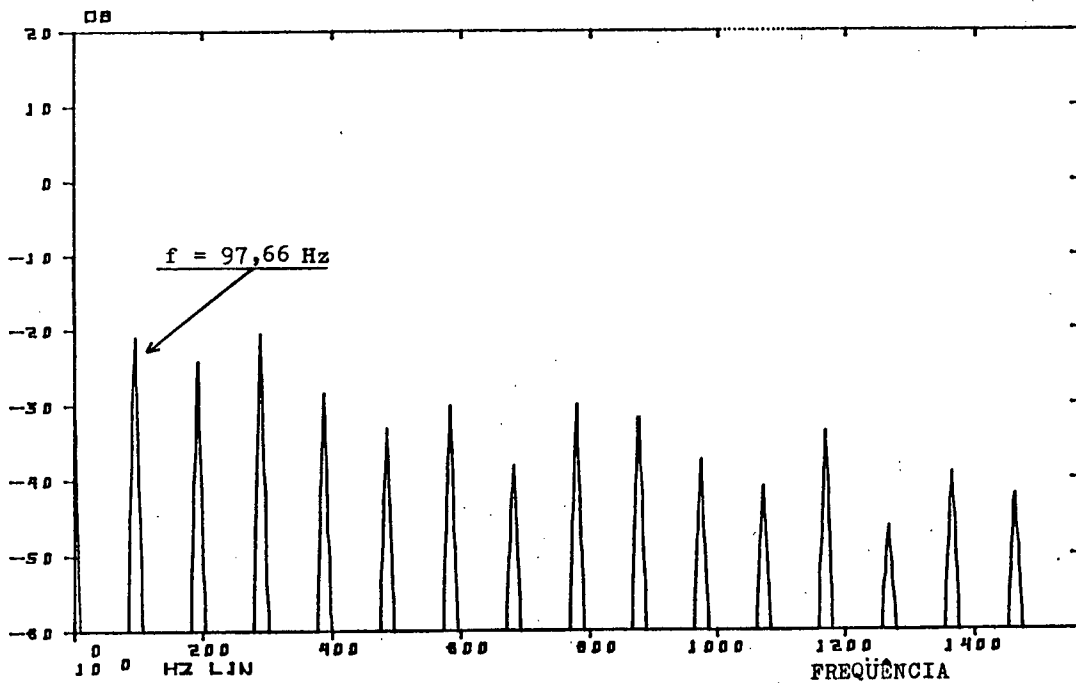


Figura 2.22 Espectro na baixa frequência do sinal da fig.2.21.

CAPITULO - 3 MEDIÇÃO PRELIMINAR DE ENVELOPE

3.1 GENERALIDADES

Como já foi visto anteriormente, as vibrações geradas por falhas em rolamentos se localizam na região de alta frequência no espectro. Para se fazer um teste da técnica do envelope, pensou-se num sistema, com parâmetros conhecidos e controlados.

Montou-se, então, um sistema, como se pode ver na figura 3.1.

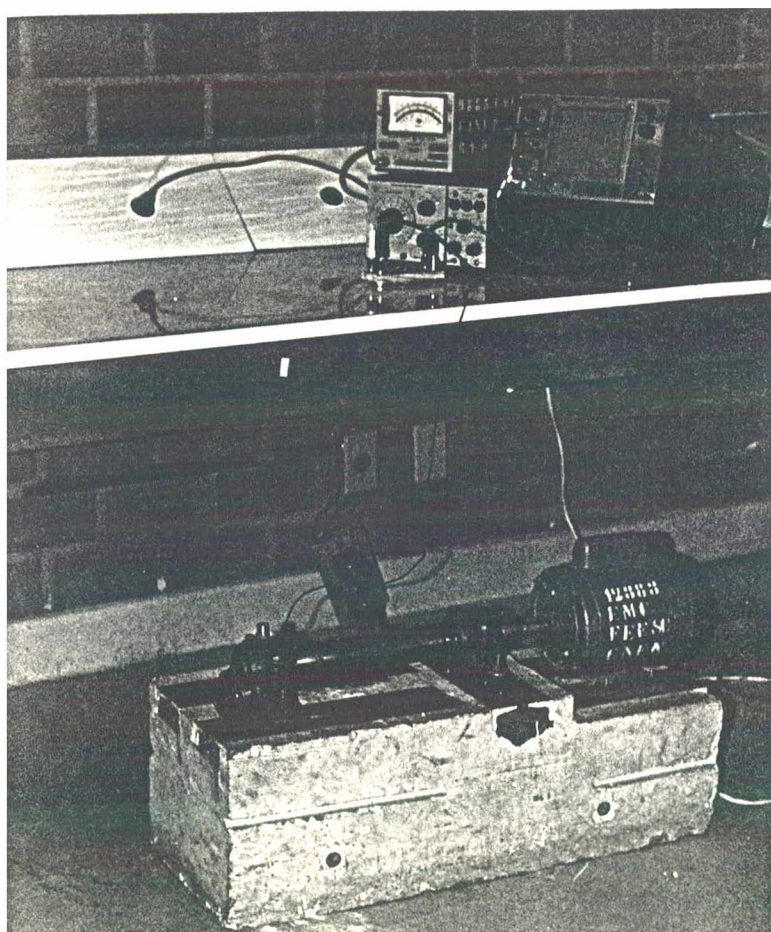


Figura 3.1 Fotografia do Sistema Simples

Com esse sistema, os parâmetros que interessam à análise estão perfeitamente sob controle, fazendo com que se possa verificar e analisar o sinal de vibração do sistema.

3.2 COMPONENTES DO SISTEMA

Como a figura 3.1 mostra, o sistema é composto de:

- a) Um motor elétrico WEG - 1/3 C.V - 1780 rpm;
- b) Dois mancais que abrigam rolamentos tipo 6305-Z;
- c) Um eixo de peso 3616 g;
- d) Acelerômetro B&K tipo 4366;
- e) Amplificador de carga B&K tipo 2635
- f) Filtro Passa-Banda B&K tipo 1621;
- g) Voltímetro eletrônico B&K tipo 2425;
- h) Aparelho detector de envelope;
- i) Analizador de Fourier HP 5451-C.

O acelerômetro B&K 4366 foi usado por possuir uma massa pequena igual a 29 g, sendo que o massa do mancal vale 2197 g, portanto não interferindo no vibração do sistema, tendo alta sensibilidade, e também porque sua curva de resposta mostra que para a faixa de frequência de interesse neste trabalho, está completamente plana.

O filtro passa-banda B&K 1621 foi usado por ter duas opções de largura de banda: 3% e 23%, fazendo com que neste

trabalho, a escolha recaísse sobre a faixa de filtragem que ocasionasse maior precisão nos sinais.

O voltímetro eletrônico foi usado para monitorar e amplificar o sinal que saía do filtro passa banda e entrava no detector de envelope.

O amplificador de carga B&K 2635 e o analisador de Fourier HP 5451-C também foram usados neste trabalho.

3.3 PARÂMETROS DE MEDIÇÃO EM ALTAS E BAIXAS FREQUÊNCIAS

Primeiramente, foram feitas medições no sistema, para se determinar as frequências de ressonância do mesmo.

O mancal em que foram tirados os sinais é o mancal da esquerda, figura 3.1

Sabe-se que para se obter um bom resultado com esta técnica, a faixa de frequência de ressonância que se deve usar se situa entre 5 KHZ e 20 kHz [3]. O sistema HP 5451-C possui, em concordância com o exposto acima, duas faixas de frequência: uma faixa onde a frequência máxima do sinal medido é $f_{\max} = 10$ kHz, e por consequência a frequência do filtro anti-aliasing é $f_{\text{filtro}} = 5$ kHz e uma outra faixa em que $f_{\max} = 25$ kHz e $f_{\text{filtro}} = 12,5$ kHz. Escolheu-se a segunda opção. Já em relação a análise em baixas frequências, utilizou-se a faixa de $f_{\max} = 500$ Hz e $f_{\text{filtro}} = 250$ Hz. Ou seja, o sistema simples obedecia aos seguintes parâmetros:

- a) $f_{\max} = 25$ kHz (frequência máxima), para análise do sinal nas altas frequências
- b) $f_{\text{filtro}} = 12,5$ kHz (filtro anti-aliasing), para análise do sinal nas altas frequências;
- c) $f_{\max} = 500$ Hz (frequência máxima), para análise do sinal nas baixas frequências;
- d) $f_{\text{filtro}} = 250$ Hz (filtro anti-aliasing), para análise do sinal nas baixas frequências;
- e) 4096 pontos de digitalização;
- f) frequência de corte superior no amplificador de carga igual à 30 KHZ;
- g) banda passante no filtro passa-banda igual a 23%;
- h) resolução na frequência de 12,21 Hz (análise nas altas frequências);
- i) resolução na frequência de 0,24 Hz (análise nas baixas frequências).

3.4 - IDENTIFICAÇÃO DAS FREQUÊNCIAS DE RESSONANCIA DO SISTEMA

Para a identificação das frequências de ressonância do mancal em estudo, montou-se a seguinte cadeia de medição, mostrada na figura 3.2.

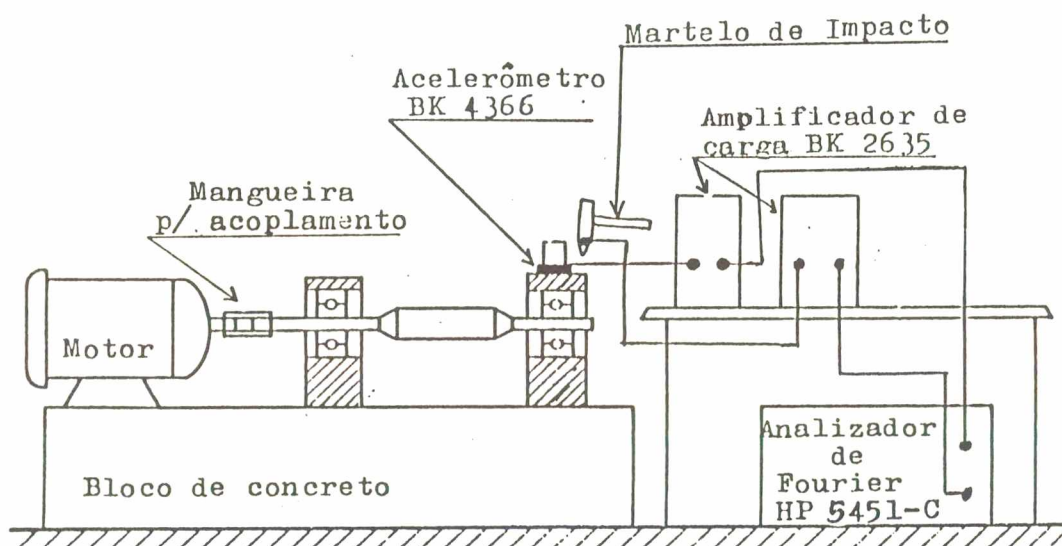


Figura 3.2 Montagem para identificação das frequências de ressonância do sistema

Conseguiu-se identificar que a região de frequência entre 5400 Hz e 6800 Hz é uma região de ressonância estrutural do mancal em estudo.

A figura 3.3 mostra o espectro da força de excitação conseguida através de um martelo de impulso metálico. Pode-se notar que a força manteve um bom nível até a frequência de aproximadamente 8 KHz.

A figura 3.4 mostra o espectro da resposta captada pelo acelerômetro B&K 4366. Nota-se que os picos na região de 5400 Hz a 6800 Hz são acentuados, denotando uma ressonância estrutural do sistema.

A figura 3.5 mostra a função de transferência (função de resposta em frequência) do sistema. Ela é o resultado da divisão do sinal captado pela acelerômetro (resposta) com o sinal do transdutor de força (excitação), no domínio da frequência. Pode-se notar que na mesma faixa de frequência observada no sinal da resposta, figura 3.4, está localizada uma ressonância do sistema.

A função de coerência entre o sinal de excitação e o sinal da resposta está mostrada na figura 3.6.

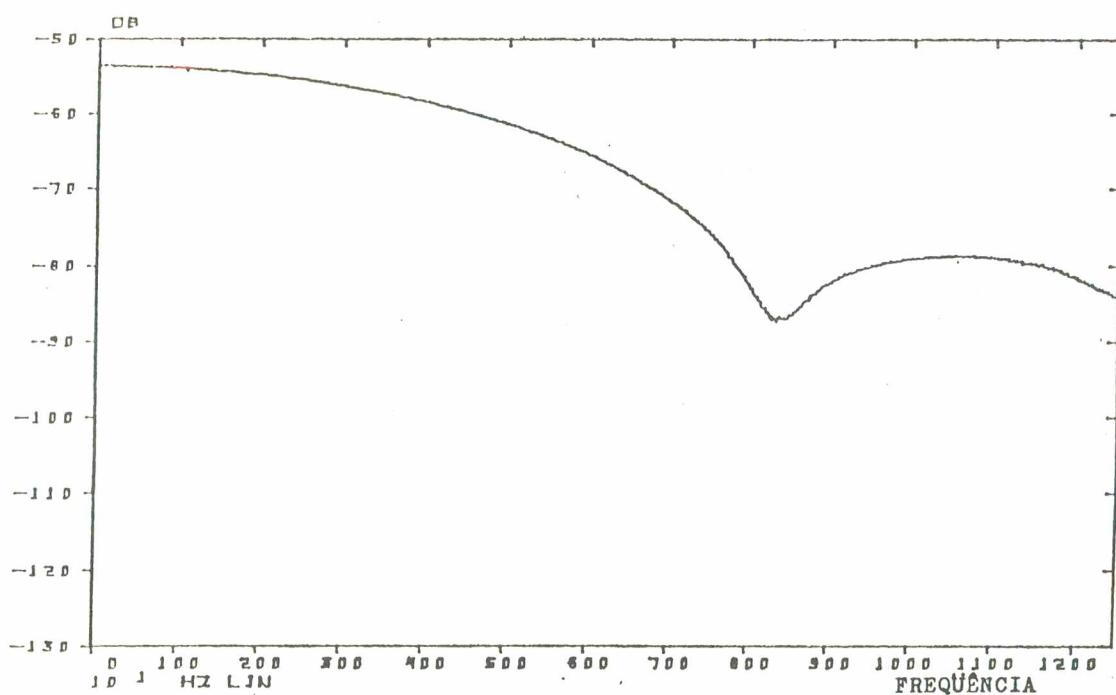


Figura 3.3 Espectro da força obtida por um martelo de impacto.

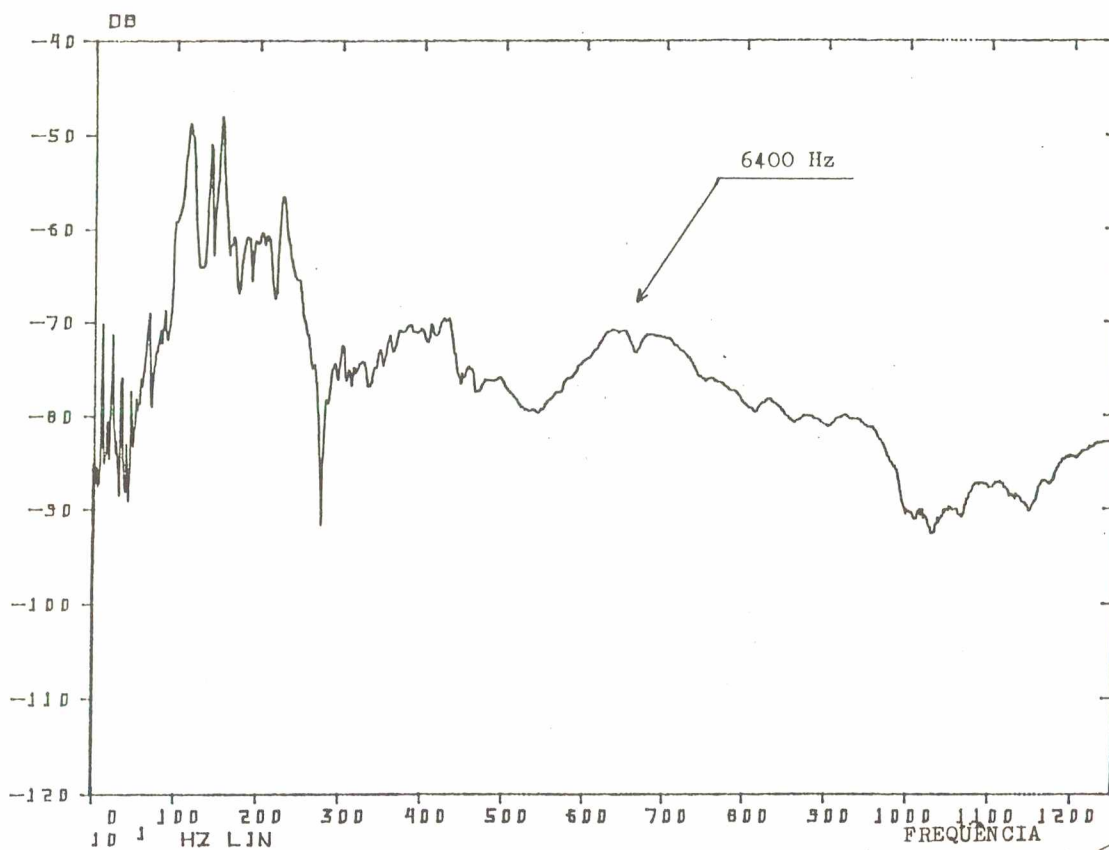


Figura 3.4 Resposta do sistema captada pelo acelerômetro.

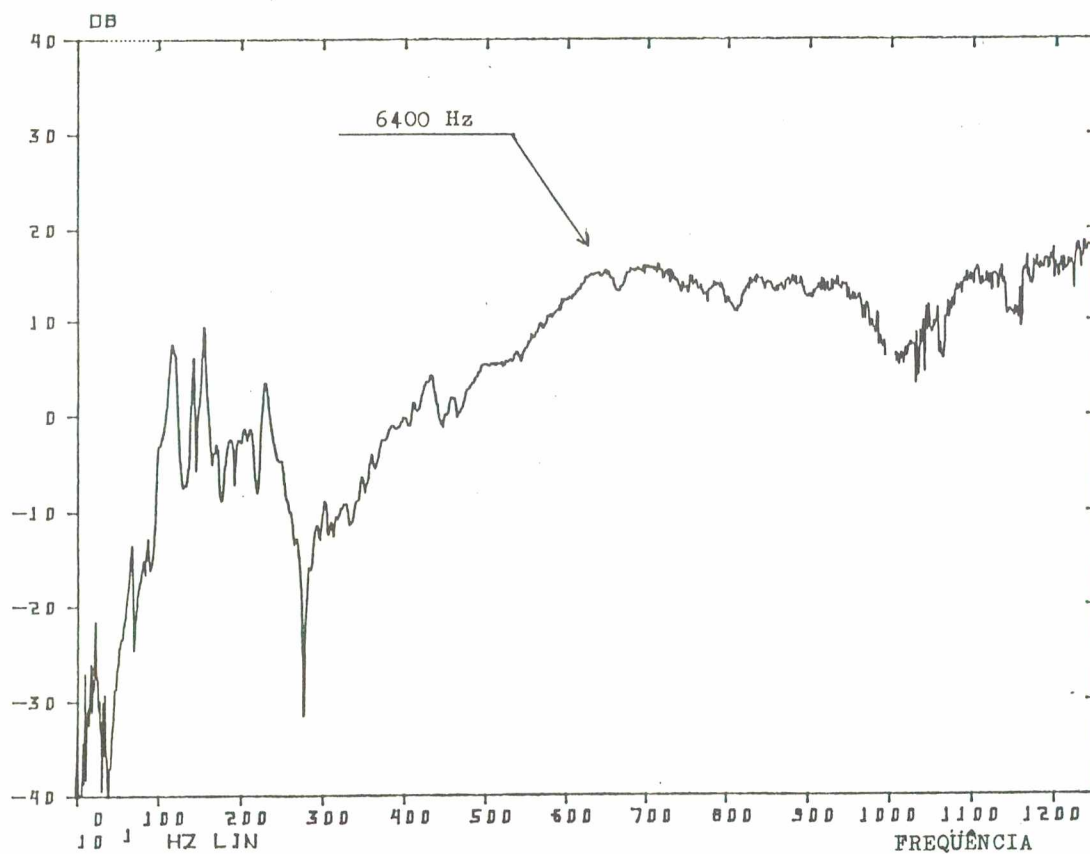


Figura 3.5 Função de transferência do sistema.

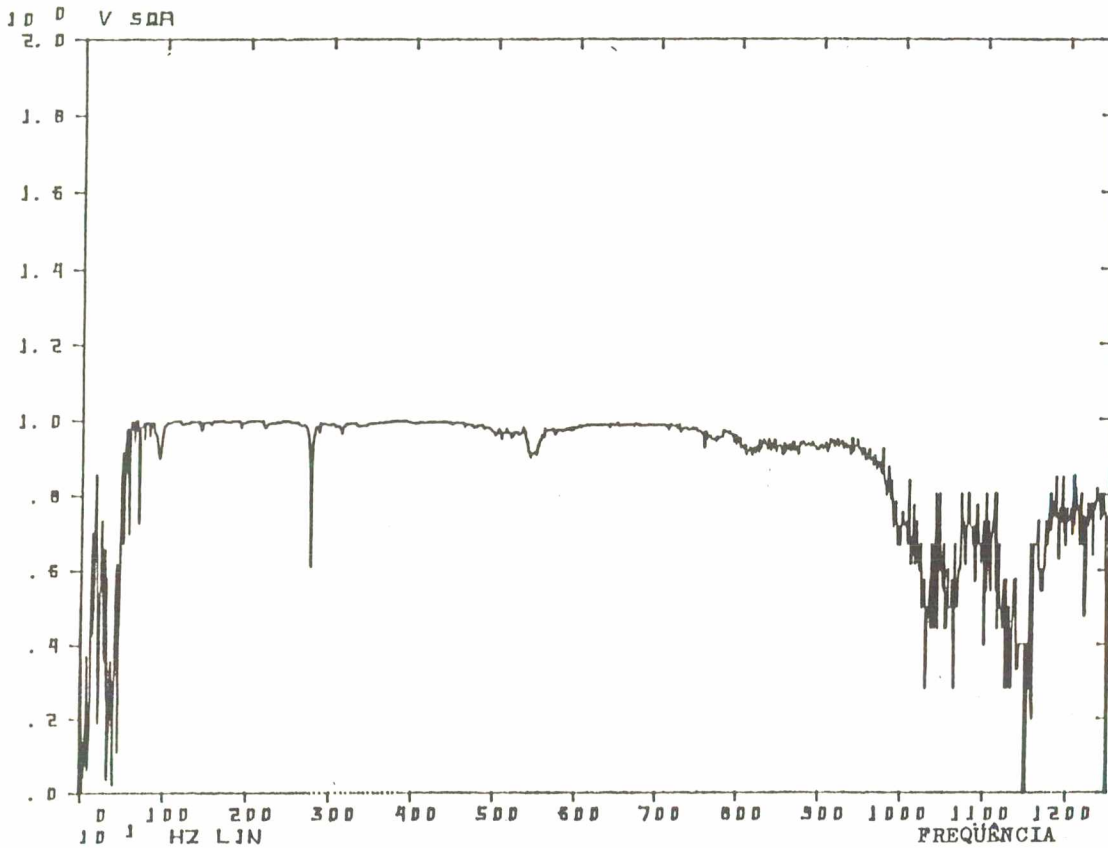


Figura 3.6 Coerência entre a excitação e a resposta do sistema.

A função de coerência indica que existe uma alta correlação entre a excitação e a resposta na mesma faixa de frequência.

Através desses sinais, tomou-se por base que a mais forte frequência de ressonância do mancal está localizada em 6400 Hz. Para uma comprovação maior da decisão tomada acima, foram feitas mais algumas medições. Dessa vez, mediu-se a vibração do mancal com um rolamento previamente defeituoso e com um rolamento novo, sem nenhum defeito.

A figura 3.7 mostra o espectro da vibração do mancal excitado por um rolamento novo e a figura 3.8 mostra o espectro de vibração do mancal com um rolamento defeituoso excitando suas frequências de ressonância. Pode-se notar que na mesma faixa de frequência (5400Hz a 6800 Hz) o nível de vibração aumentou, mostrando que é realmente uma região de ressonância do sistema, mostrando também que a frequência de 6400 Hz é a mais forte

frequencia de ressonância do mancal em estudo.

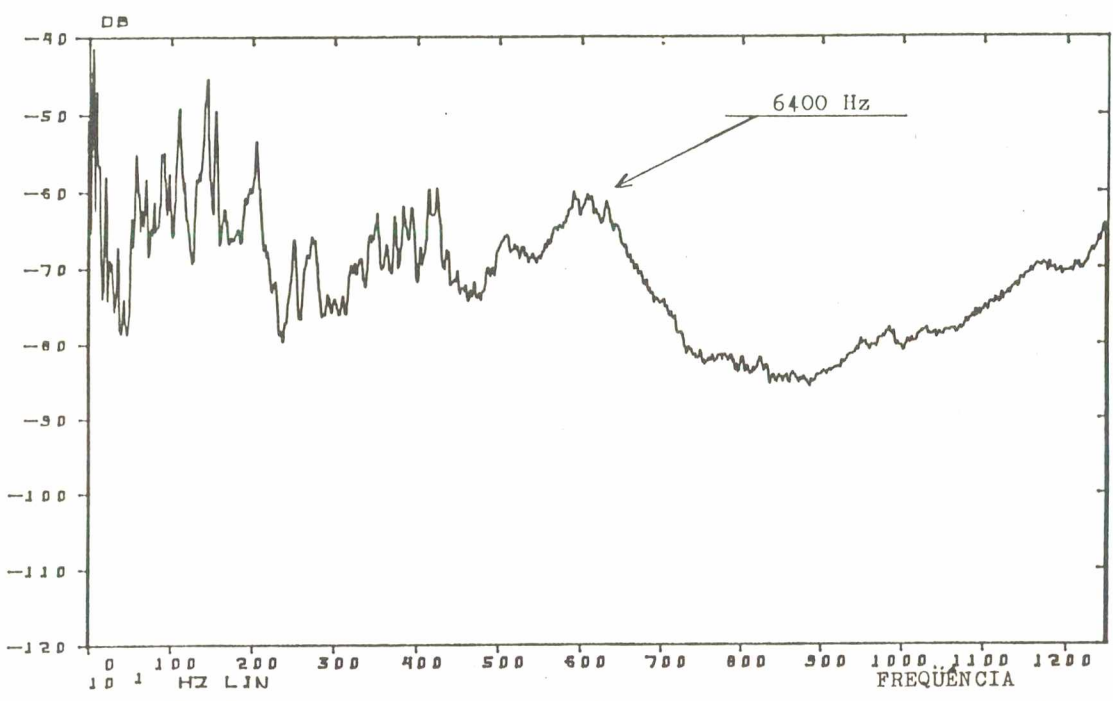


Figura 3.7 Espectro de vibração do mancal, excitado por um rolamento novo.

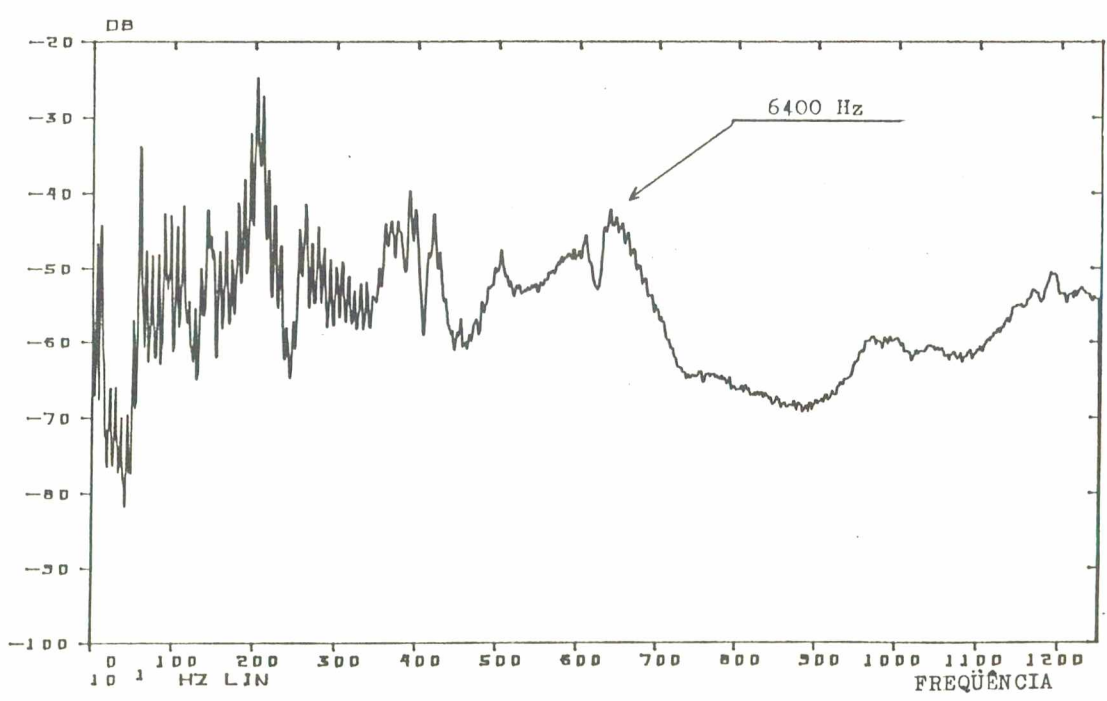


Figura 3.8 Espectro da vibração do mancal excitado por um rolamento defeituoso na pista estacionária.

3.5 ROLAMENTOS EM BOAS CONDIÇÕES

Para se quantificar os níveis de vibração dos rolamentos em estudo, como valor de referência, foram usados 18 rolamentos novos. Todos esses rolamentos foram numerados. De cada um desses rolamentos mediu-se o espectro de potência em duas faixas de frequência. A primeira medição se deu em baixa frequência, mais precisamente na faixa de 0 a 250 Hz. As figuras 3.9 a 3.11 mostram os espectros típicos, correspondentes aos rolamentos de marca SKF, NSK e TR usados. A segunda medição foi na alta frequência, na faixa de 0 a 12500 Hz. As figuras 3.12 a 3.14 mostram os espectros típicos correspondentes aos mesmos rolamentos anteriores.

Todos esses sinais foram tomados diretamente, ou seja, o sinal captado pelo acelerômetro era enviado para o amplificador de carga e daí para o analisador de Fourier. Daqui para frente, qualquer sinal medido dessa forma será denominado "espectro direto".

Usou-se a faixa de frequência de 0 a 250 HZ porque se sabia previamente que as frequências relativas aos defeitos nos rolamentos em questão, se situavam nessa mesma faixa. A faixa de 0 a 12500 Hz foi usada para se comparar o nível de vibração do rolamento em boas condições de uso (novo) com o rolamento avariado. A figura 3.15 ilustra a cadeia de medição de onde se tirou todas as figuras deste item.

Nota-se, figuras 3.9 a 3.11, picos salientes nas frequências correspondentes à defeitos nas pistas estacionárias, mesmo sabendo-se que os rolamentos são novos. Isto dificulta ainda mais a análise do espectro direto.

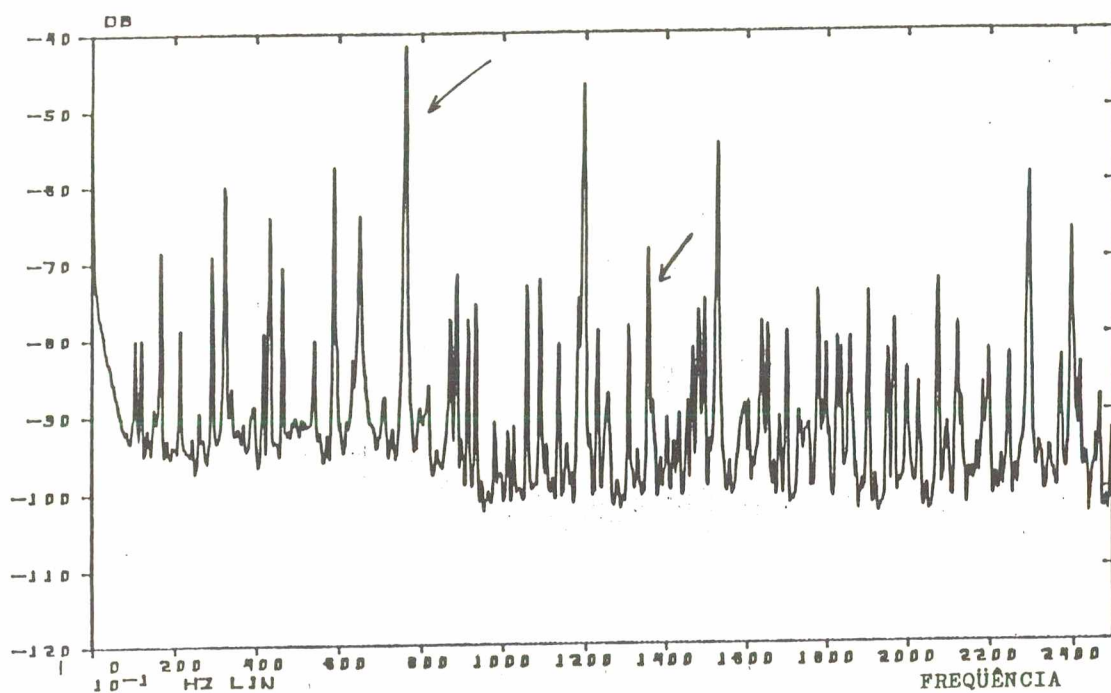


Figura 3.9 Espectro típico de um rolamento novo SKF nas baixas frequências - rol. SKF 04.

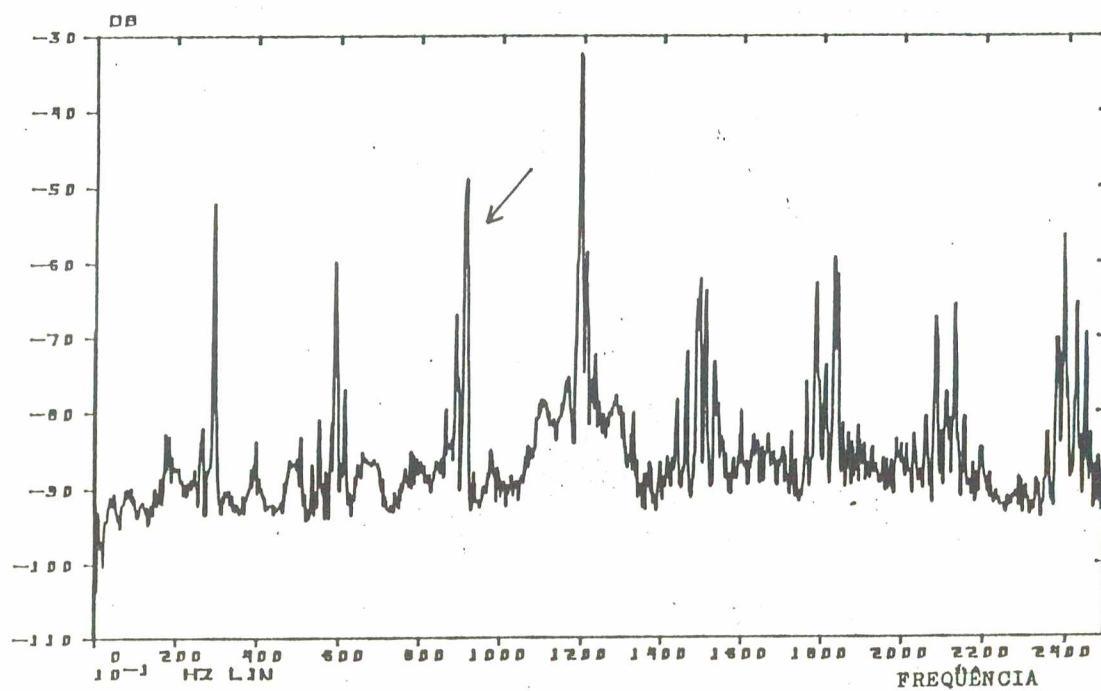


Figura 3.10 Espectro típico de um rolamento novo NSK nas baixas frequências - rol. NSK 15.

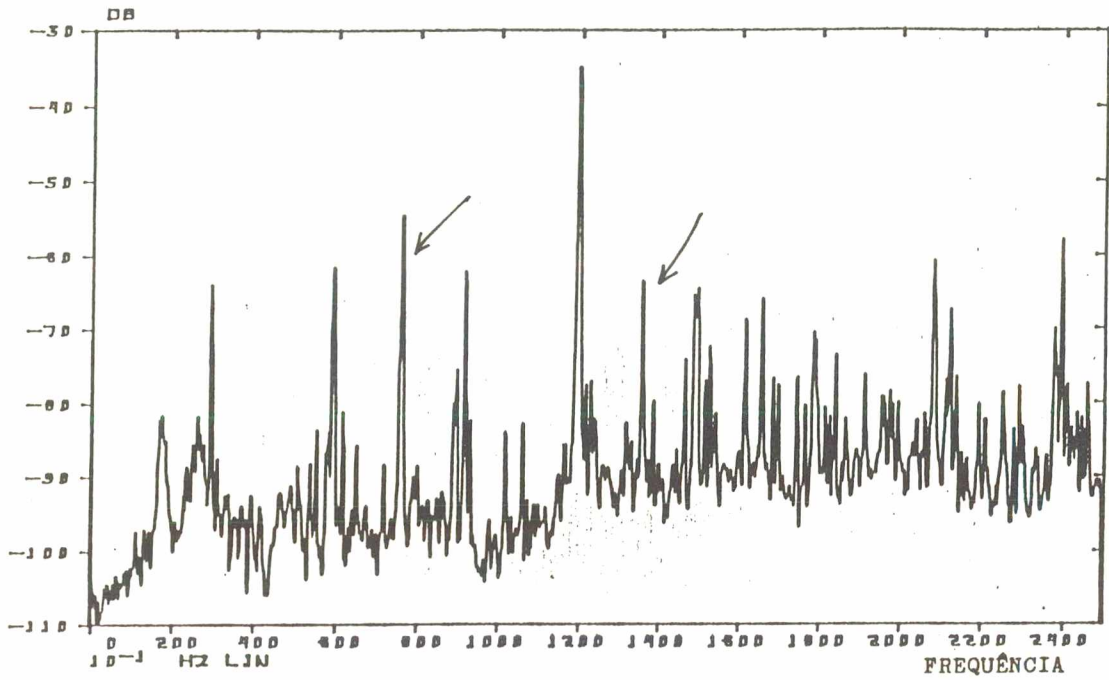


Figura 3.11 Espectro típico de um rolamento TR novo nas baixas frequências - rol TR 17.

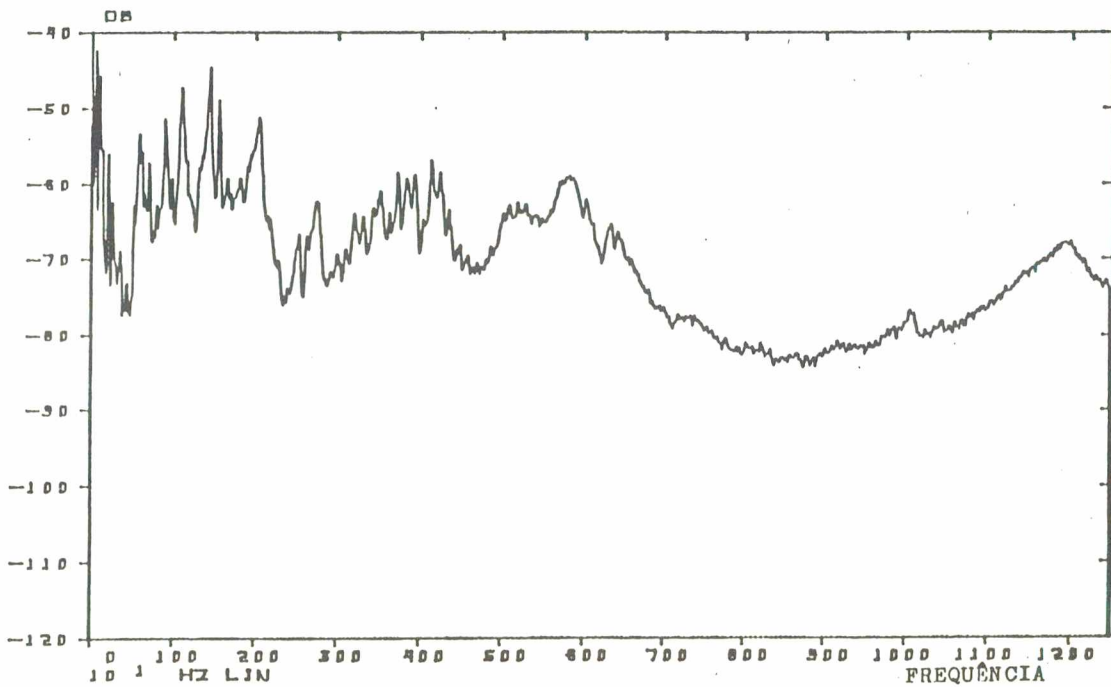


Figura 3.12 Espectro típico de um rolamento SKF novo nas altas frequências - rol SKF 04.

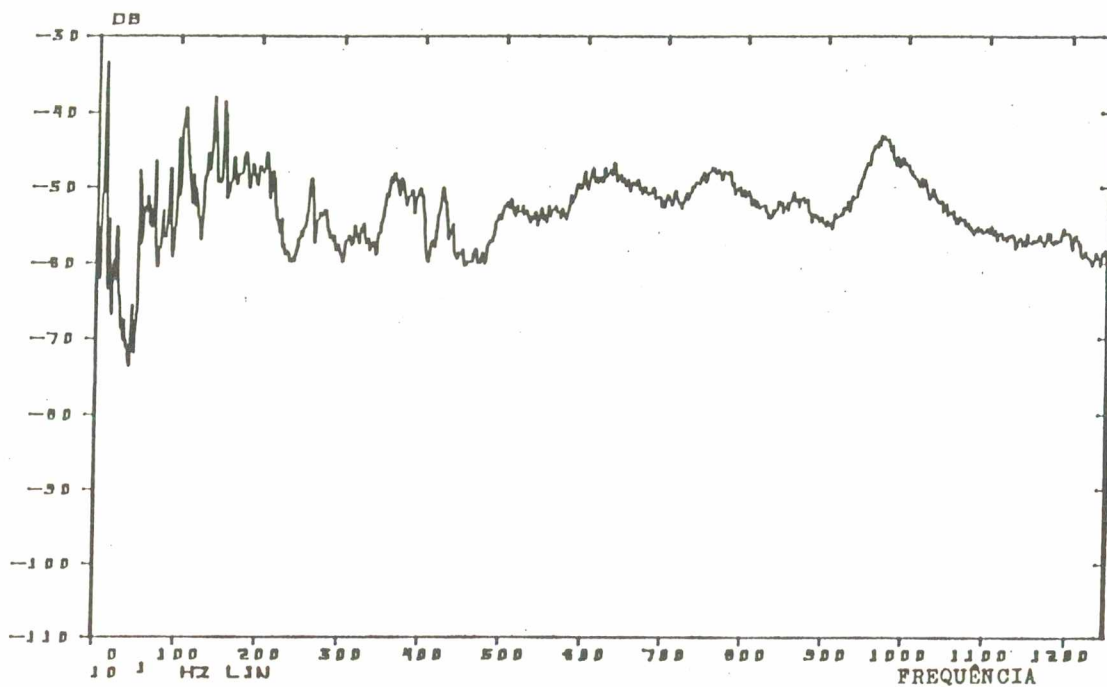


Figura 3.13 Espectro típico de um rolamento NSK novo nas altas frequências - rol. NSK 15.

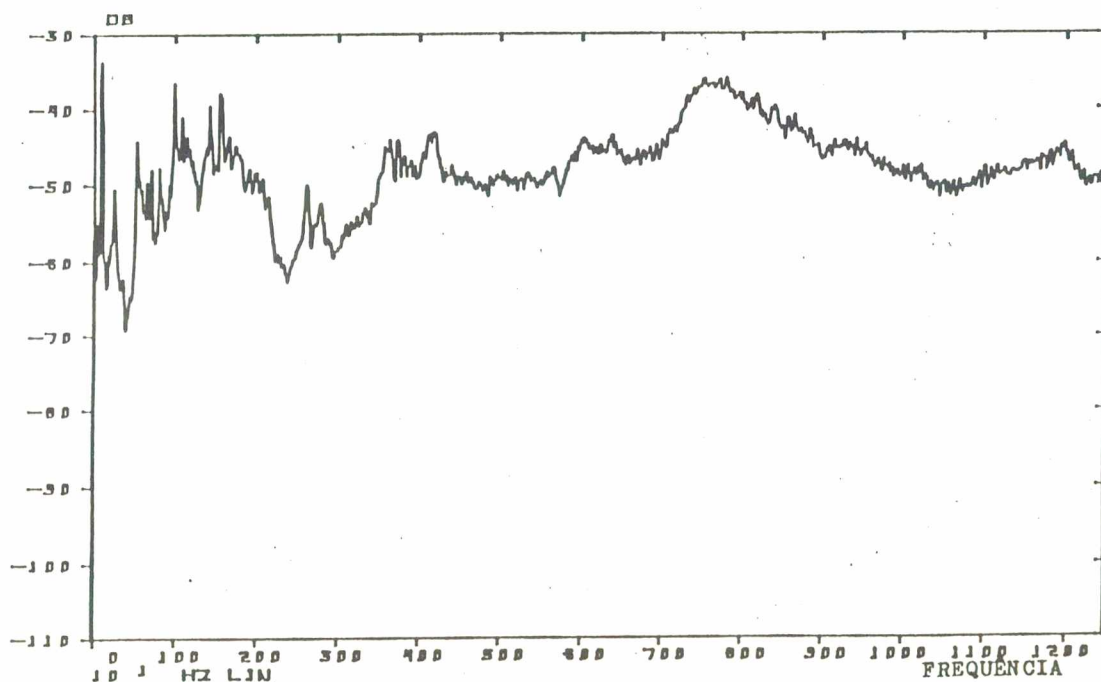


Figura 3.14 Espectro típico de um rolamento TR novo nas altas frequências - rol TR 17.

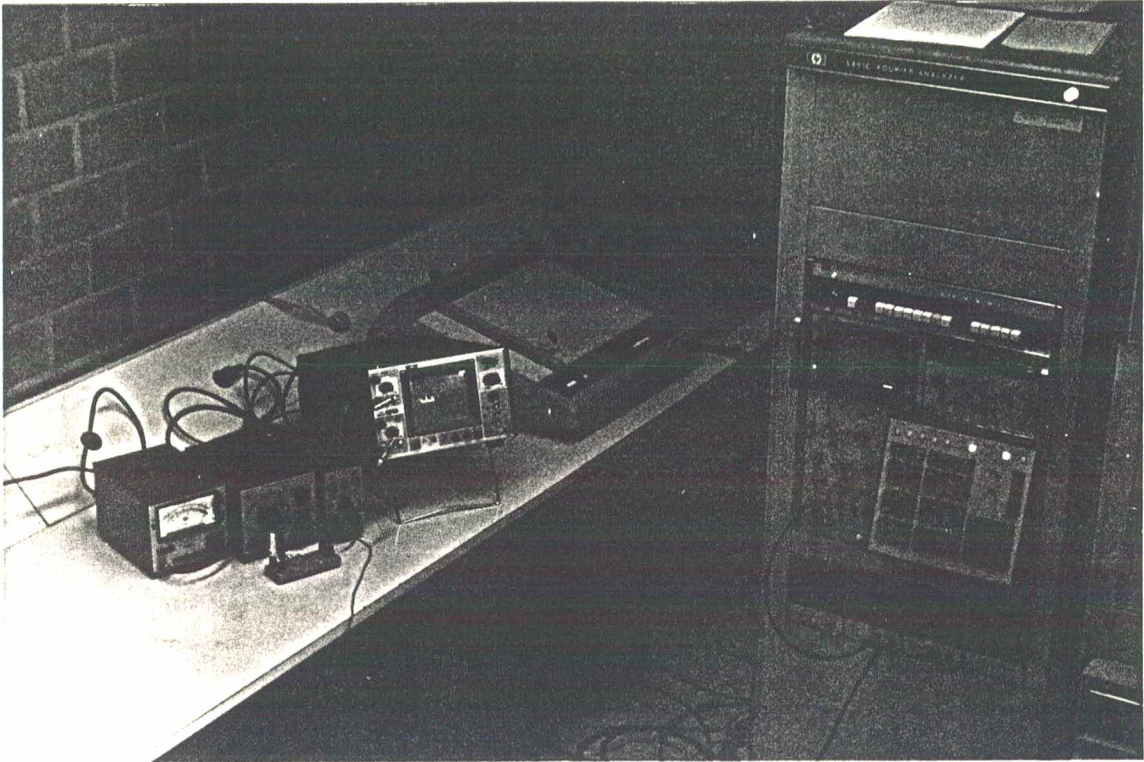


Figura 3.15 Cadeia de medição de vibração nos rolamentos novos.

3.6 CALIBRAÇÃO DO SISTEMA

Para se calibrar o sistema, foi gerado um sinal, que simula o sinal de aceleração de um mancal de rolamento.

Montou-se, então, um sinal que tivesse relação com uma baixa e uma alta frequência, juntamente com um decaimento simulando o amortecimento da estrutura. Todos os sinais abaixo discriminados foram gerados com o $f_{\max} = 25$ KHz. A cadeia de medição está mostrada na figura 3.16.

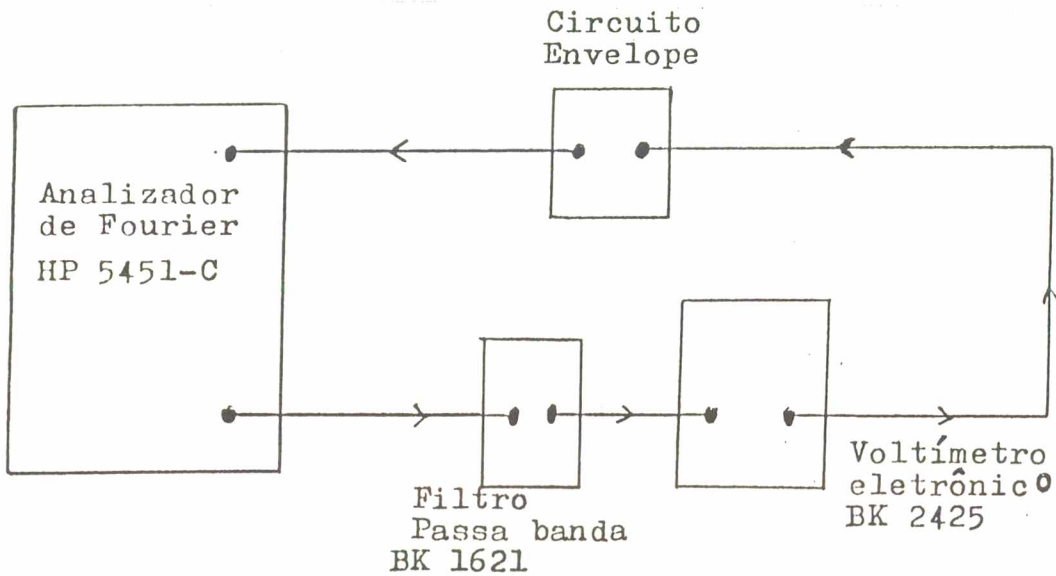


Figura 3.16 Sistema de medição para calibração

O sinal gerado é o seguinte:

- a) Uma cossenóide de frequência igual a 79,66 Hz, gerada digitalmente (figura 3.17);
- b) Um sinal de decaimento exponencial, que repetido daria uma frequência de 79,66 Hz, gerado digitalmente (figura 3.18), simulando o amortecimento da estrutura;
- c) Uma cossenóide de frequência igual a 6006 Hz, também gerada digitalmente (figura 3.19), simulando uma ressonância.

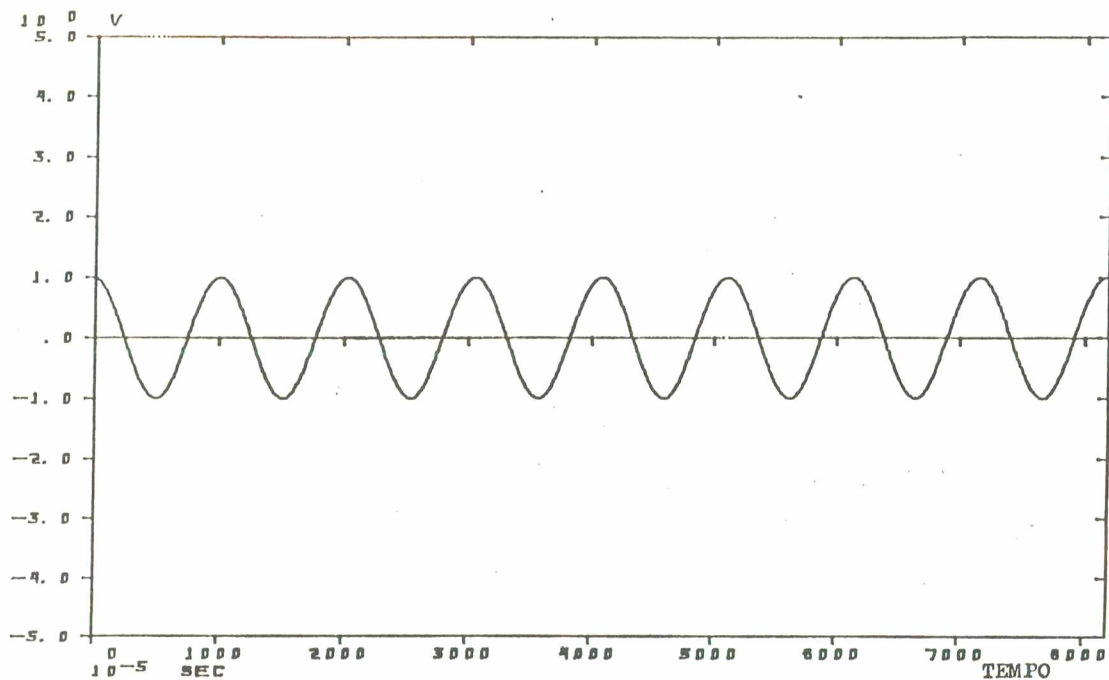


Figura 3.17 Sinal puro (cossenóide) de $f = 79,66$ Hz.

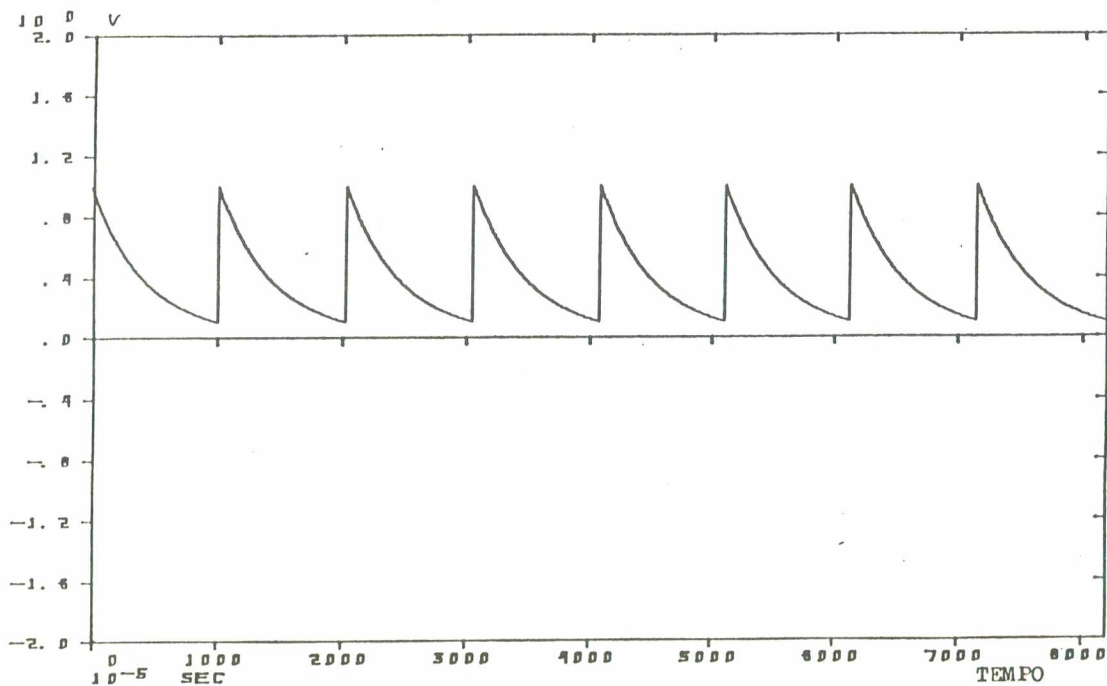


Figura 3.18 Decaimento exponencial com uma frequência

$$f = 79,66 \text{ Hz.}$$

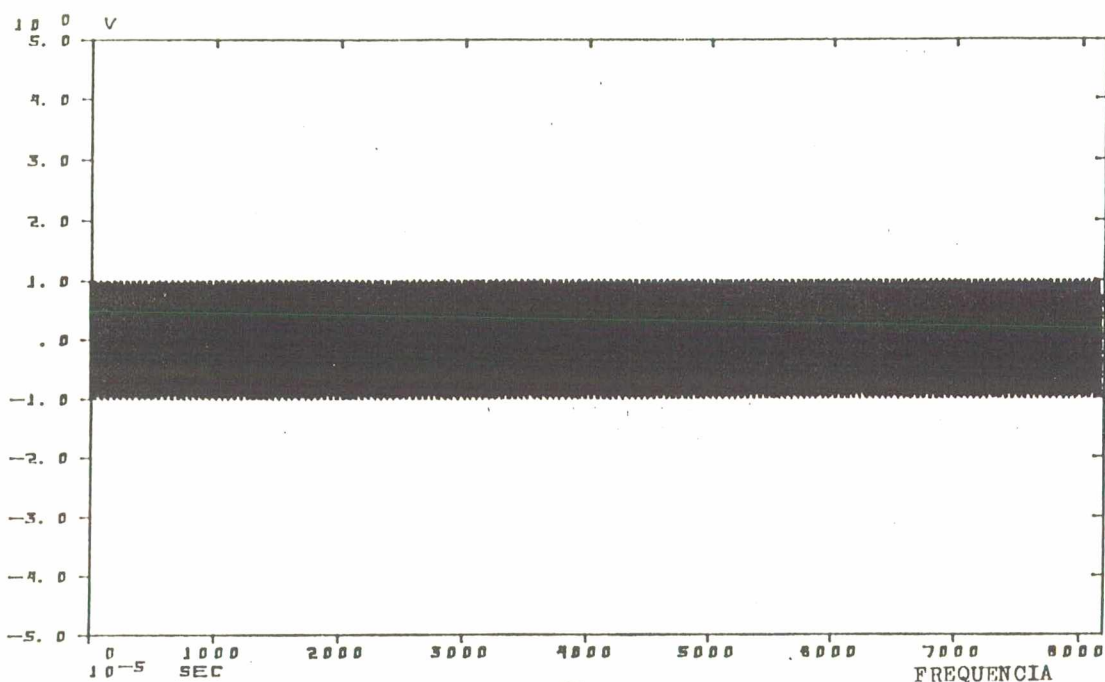


Figura 3.19 Sinal puro (cossenoide) de $f = 6006$ Hz.

O sinal do decaimento e a cossenoide de 6006 Hz foram multiplicados entre si, resultando no sinal da figura 3.20, e então somou-se a esse sinal, a cossenoide de 79,66 Hz, resultando o sinal mostrado na figura 3.21. O espectro deste sinal está mostrado na figura 3.22.

O sinal de calibração foi mandado para a saída analógica do HP 5451-C, e passando pelos seguintes equipamentos:

- I) Filtro B&K 1621 em 23%, centrado em 6006 Hz;
- II) Voltímetro eletrônico B&K 2425 monitorando e amplificando 10 vezes o sinal;
- III) Detector de envelope.

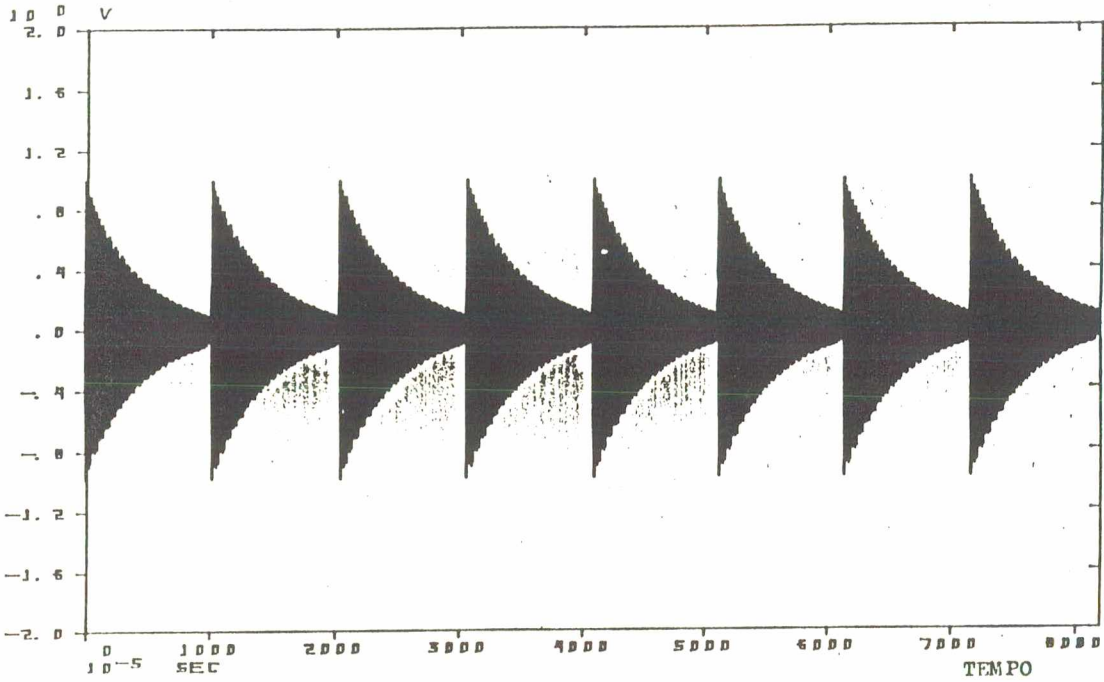


Figura 3.20 Sinal resultante da multiplicação entre a cossenóide de $f = 6006$ Hz e o decaimento.

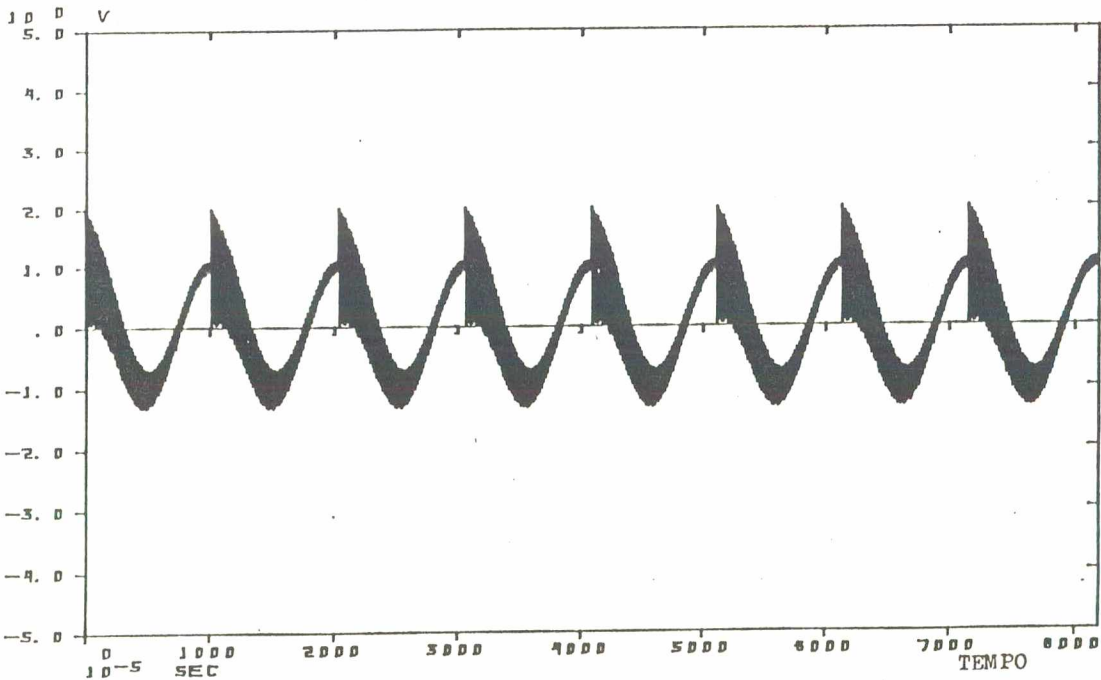


Figura 3.21 Sinal de calibração.

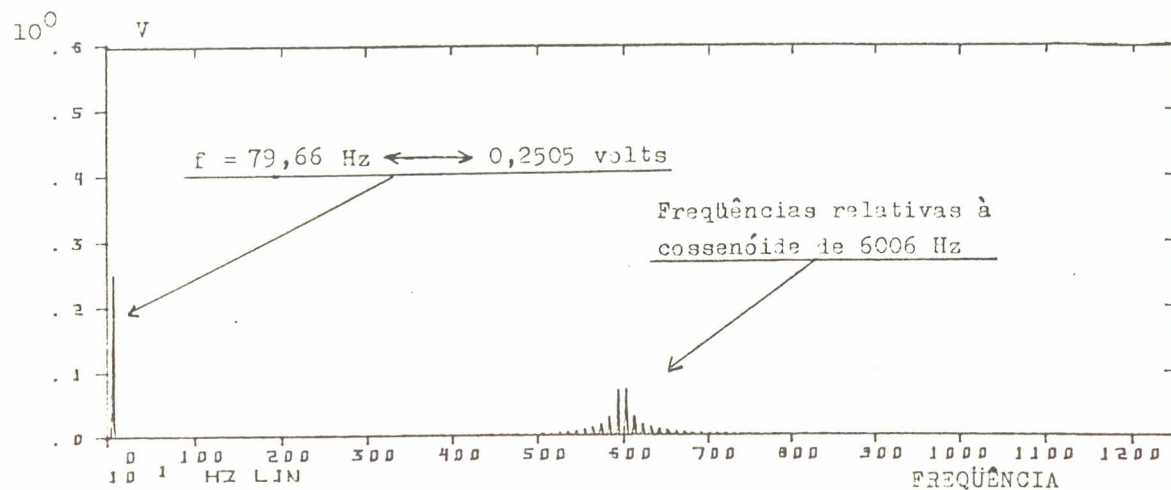


Figura 3.22 Espectro do sinal de calibração (fig 3.21).

Após o sinal passar por todos esses equipamentos, ele foi mandado à entrada analógica do mesmo HP 5451-C, passando ainda pelo filtro anti-aliasing na frequência de 250 Hz, e também usando-se a janela Hanning. O sinal está mostrado na figura 3.23.

O sinal de calibração, saindo do HP 5451-C, tinha a seguinte voltagem, na frequência de 79,66 Hz, usando-se a janela Hanning:

$$f_s = 79,66 \text{ Hz} \implies 0,2505 \text{ volts}$$

O sinal captado pela entrada analógica do HP tinha a seguinte voltagem, na frequência de 79,66 Hz, usando-se a janela Hanning, figura 3.24:

$$f_e = 79,66 \text{ Hz} \implies 0,1668 \text{ volts.}$$

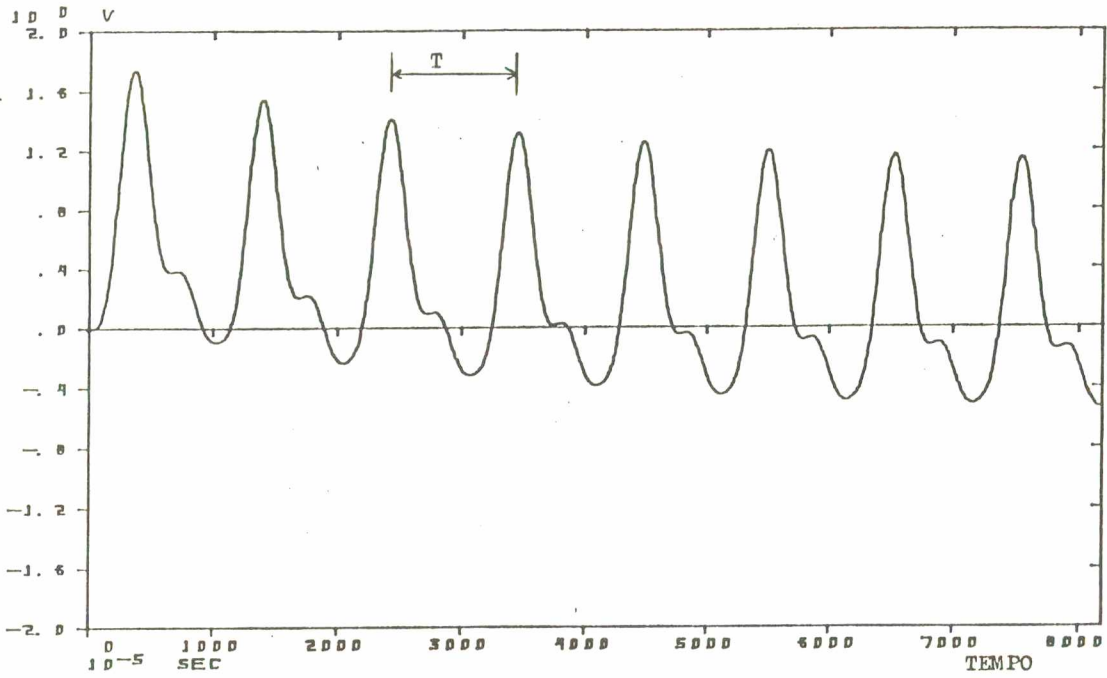


Figura 3.23 Sinal de calibração após passar pelo circuito envelope.

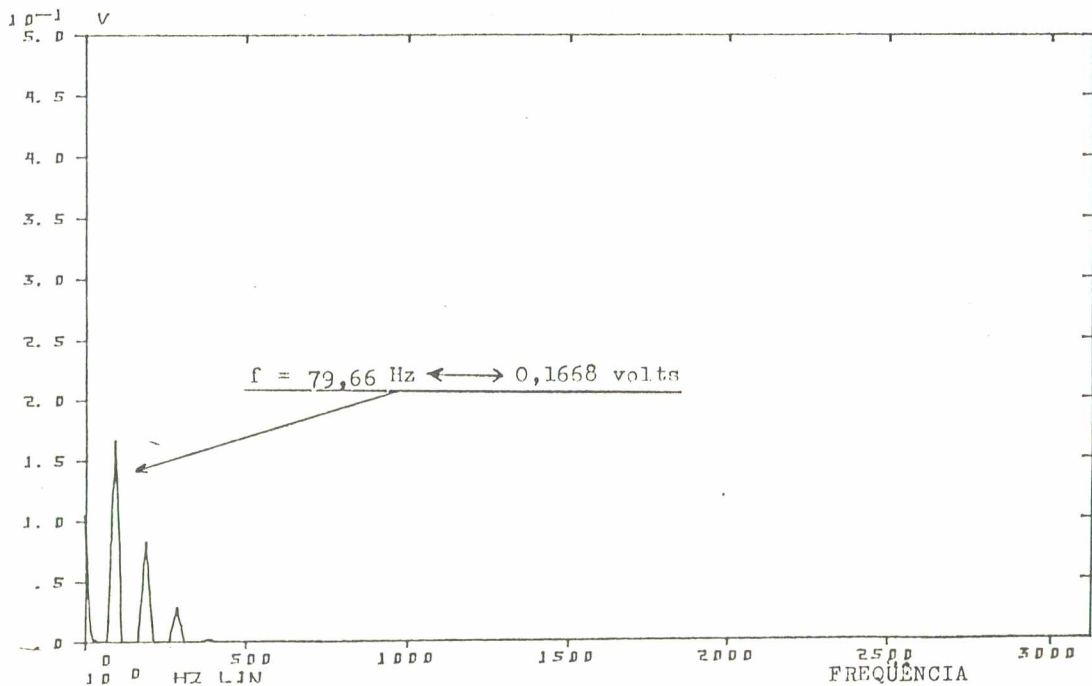


Figura 3.24 Espectro do sinal da figura 3.23.

A figura 3.25 mostra a resposta do circuito detector de envelope à uma excitação de ruído branco, de 2 Hz a 20 kHz.

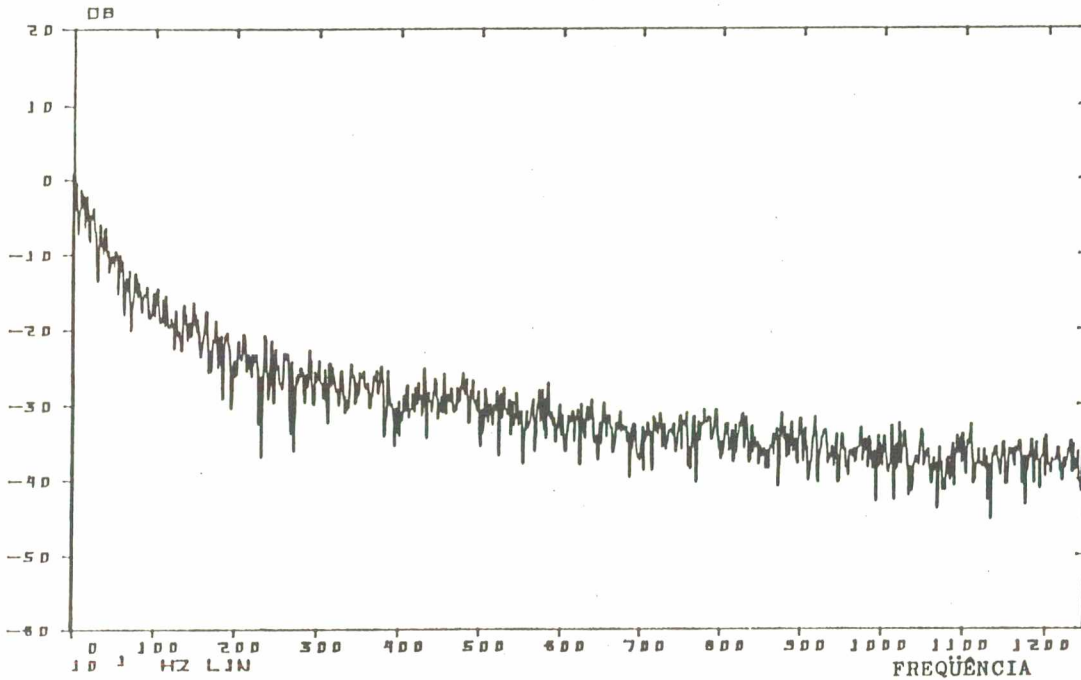


Figura 3.25 Resposta do circuito envelope à uma excitação de um ruído branco.

Para se conseguir uma relação com a aceleração do sistema, usou-se o calibrador de acelerômetro B&K 1691. O calibrador gera uma aceleração de 10 m/s^2 na frequência conhecida de 79,66 Hz. Montou-se uma cadeia de medição para se medir a voltagem no HP 5451-C correspondente a aceleração de 10 m/s^2 gerada pelo calibrador de acelerômetro. Essa cadeia de medição está mostrada na figura 3.26.

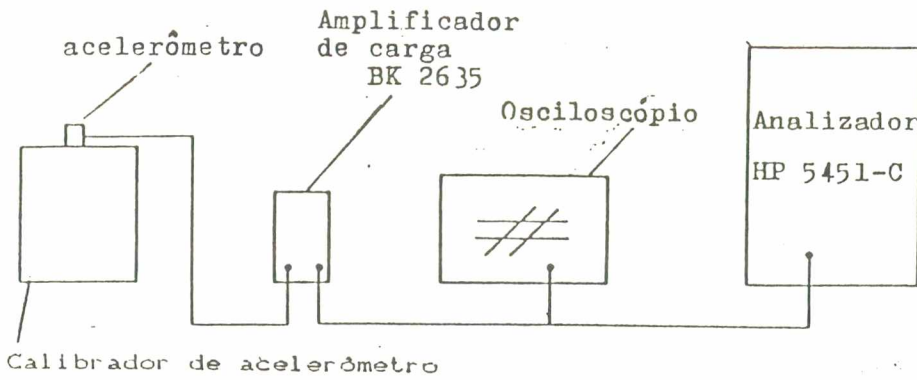


Figura 3.26 Calibração através do calibrador de acelerômetro.

O valor em voltagem para a aceleração de 10 m/s^2 , calculado pela cadeia de medição acima é:

$$f_{\alpha} = 79,66 \text{ Hz} \implies 75,6149 \cdot 10^{-3} \text{ volts.}$$

A figura 3.27 mostra o espectro do sinal de aceleração do calibrador de acelerômetro B&K 1691.

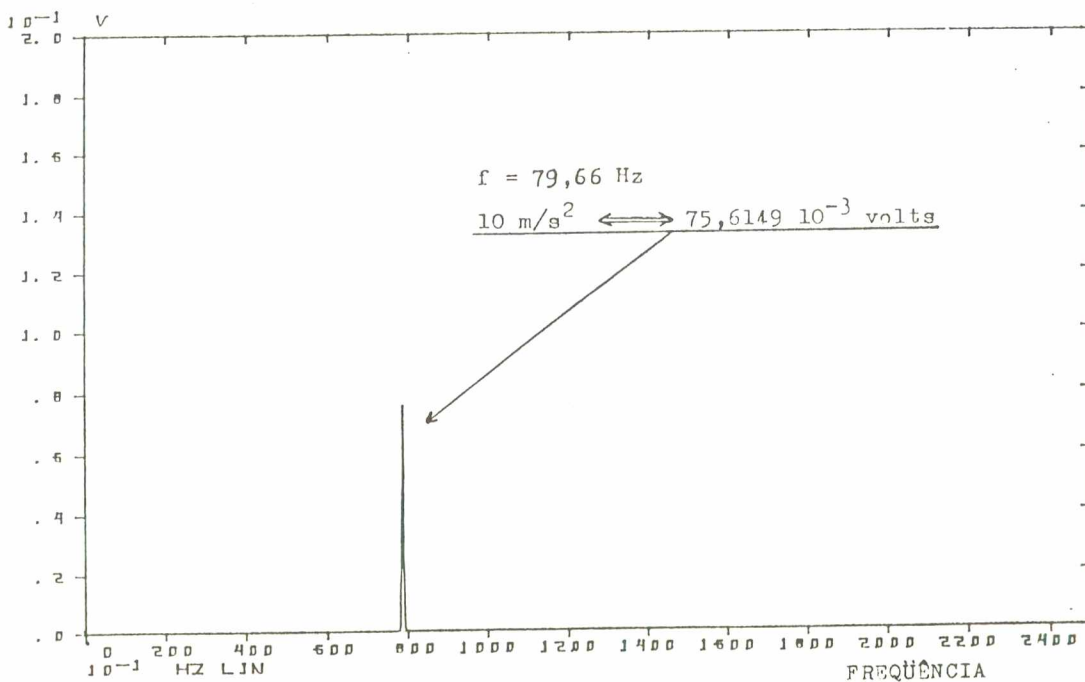


Figura 3.27 Espectro direto do sinal captado no calibrador de acelerômetro B&K 1691.

Fazendo-se as relações entre as voltagens e a aceleração conhecida chegou-se à seguinte conclusão:

$$1 \text{ m/s}^2 \iff 5,035 \cdot 10^{-3} \text{ volts}$$

Ou seja: para uma aceleração de 1 m/s^2 , a voltagem correspondente, depois de passar pelo amplificador de carga B&K 2635, pelo filtro passa banda B&K 1621, pelo voltímetro B&K 2425, pelo detector de envelope, pelo filtro anti aliasing e pela janela Hanning é de $5,035 \cdot 10^{-3}$ volts no domínio da frequência.

3.7 MEDIÇÃO USANDO A TÉCNICA DO ENVELOPE

Foram feitos, inicialmente, defeitos propositados em 3 rolamentos SKF novos.

No rolamento SKF 01 o defeito foi feito na pista externa, ou seja, na pista estacionária. Esse defeito foi obtido através de uma caneta elétrica, e nesse caso sua dimensão se reduziu à um pequeno ponto de escavação.

A figura 3.28 mostra como foi feito o defeito em cada rolamento.

Um defeito na pista estacionária, conforme a equação (1) do capítulo 2, gera a seguinte frequência, no rolamento 6305-Z SKF:

$$f_e \text{ [Hz]} = \frac{n}{2} f_r \left[1 - \frac{d}{D} \cos \beta \right]$$

o rolamento SKF 6305 - Z tem as seguintes características:

$n = 7$ (número de esferas);

$d = 11,5$ mm (diâmetro da esfera);

$D = 43,5$ mm (diâmetro entre centro de esferas);

$\beta = 0$ (ângulo de contato).

$f_r = 29,76$ Hz (frequência de rotação do eixo).

Logo, o defeito na pista externa é igual a:

$$f_e = 76,62 \text{ HZ}$$

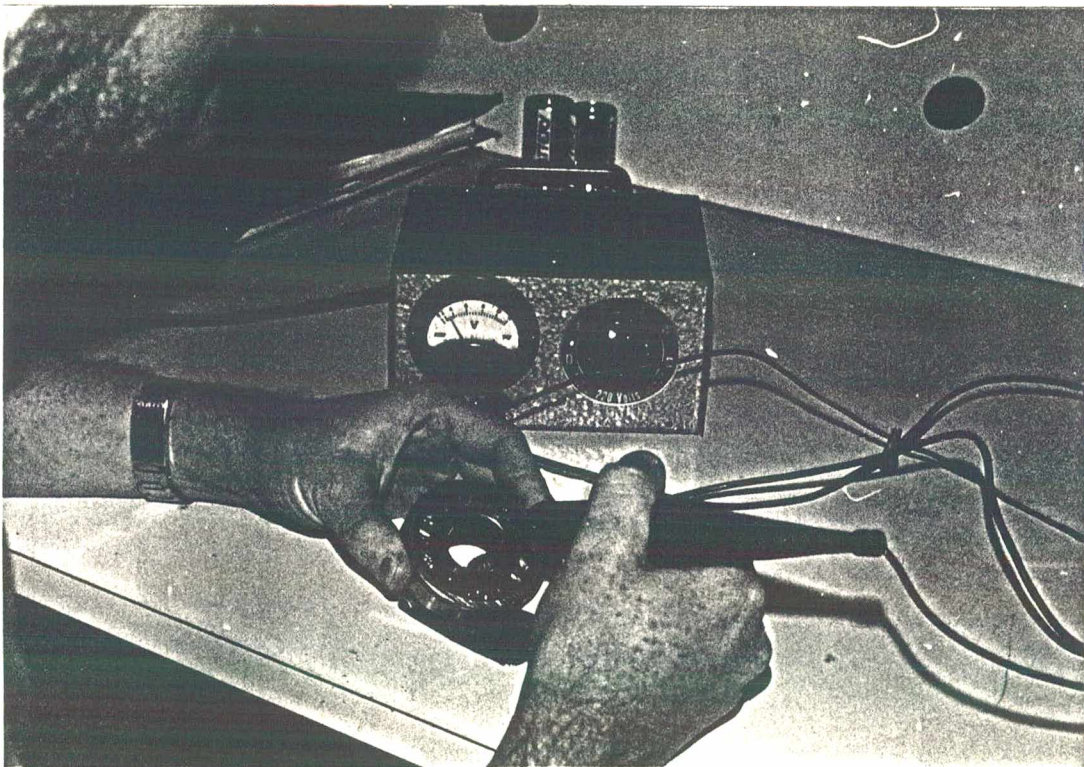


Figura 3.28 Simulação de defeitos nos rolamentos.

No rolamento SKF 02 o defeito localizou-se na pista interna, ou pista rodante. Esse defeito também foi de pequena dimensão conseguido através da caneta elétrica. A frequência característica gerada por esse defeito pode ser calculada através da fórmula (02) do capítulo 2,

$$f_i \text{ [Hz]} = \frac{n}{2} f_r \left[1 + \frac{d}{D} \cos \beta \right]$$

resultando então que

$$f_i = 131,69 \text{ Hz.}$$

No rolamento SKF 03, o defeito se localizou na esfera. Esse defeito também foi pontual devido à dificuldade de se fazer um defeito de maior dimensão na mesma. A fórmula (03) do capítulo 2 indica qual a frequência característica de um defeito na esfera.

$$f_b \text{ [Hz]} = \frac{D}{d} f_r \left[1 - \left(\frac{d}{D} \cos \beta \right)^2 \right]$$

Logo, a frequência característica do defeito na esfera é

$$f_b = 104,70 \text{ Hz}$$

Foram tirados seis (6) tipos de sinais:

1) O sinal original, isto é, o sinal de aceleração obtido na

superfície do mancal em estudo, através do acelerômetro e do amplificador de carga;

II) O sinal filtrado do sinal original com filtro 23% em torno da frequência de ressonância, neste caso 6400 Hz;

III) O envelope do sinal filtrado, isto é, após o sinal original ser filtrado, ele passa pelo detector de envelope;

IV) O espectro direto do rolamento com falha, isto é, o sinal é medido diretamente do amplificador de carga B&K 2635;

V) O espectro envelope do rolamento ainda sem a falha, ou seja, antes de se fazer a falha no rolamento, tira-se o espectro do mesmo passando pelo amplificador de carga, filtro passa banda e circuito envelope;

VI) O espectro do envelope do sinal filtrado, isto é, o espectro que determinará a frequência relativa ao defeito no rolamento.

O objetivo de se tirar esses seis tipos de sinais em cada rolamento é para se fazer uma comparação entre os mesmos.

Primeiramente irá se comparar os sinais obtidos no rolamento com falha na pista estacionária.

Como já foi visto no capítulo 2, falhas na pista estacionária geram impactos de mesma amplitude, por isso esse tipo de defeito é o mais fácil de se detectar.

A figura 3.29 mostra o sinal no tempo do rolamento SKF 01 com uma falha proposital na pista externa (estacionária). O sinal filtrado 23% em torno da ressonância ($f_{\text{central}} = 6400 \text{ Hz}$) está mostrado na figura 3.30. O envelope deste sinal está na figura 3.31 e mostra a fração de espaço de tempo igual à 131.10^{-4} seg entre as modulações. Essa fração de tempo resulta numa frequência de aproximadamente 76,33 Hz. O espectro direto, figura 3.32, mostra

a frequência relacionada ao defeito em questão, e a primeira e segunda harmônica. Juntamente com essa frequência (76,40 Hz), aparece a frequência de 60 Hz, que é a frequência da rede, aproximadamente no mesmo nível de amplitude e também a frequência de 120 Hz que é o dobro da frequência da rede. Nota-se ainda, que diversas outras frequências espúrias aparecem nesse espectro direto, atrapalhando a análise do sinal. A figura 3.33 é o espectro do envelope do rolamento ainda sem o defeito na pista externa. Nota-se que não existe nenhuma frequência predominando o espectro, demonstrando que o rolamento está em boas condições. A figura 3.34 é o espectro do envelope do mesmo rolamento já com o defeito. A frequência predominante é igual a 76,33 Hz com suas harmônicas de 152,66 Hz e 228,99 Hz. Esse espectro é de fácil análise, pois vê-se que só uma frequência o domina, não havendo nenhuma outra que o contamina. O valor da frequência calculada pela equação 01 do capítulo 2 é igual à 76,40 Hz que é muitíssimo próximo do valor da frequência achada através do espectro envelope, lembrando ainda que a resolução na frequência $\Delta_f = 0,2442$ Hz.

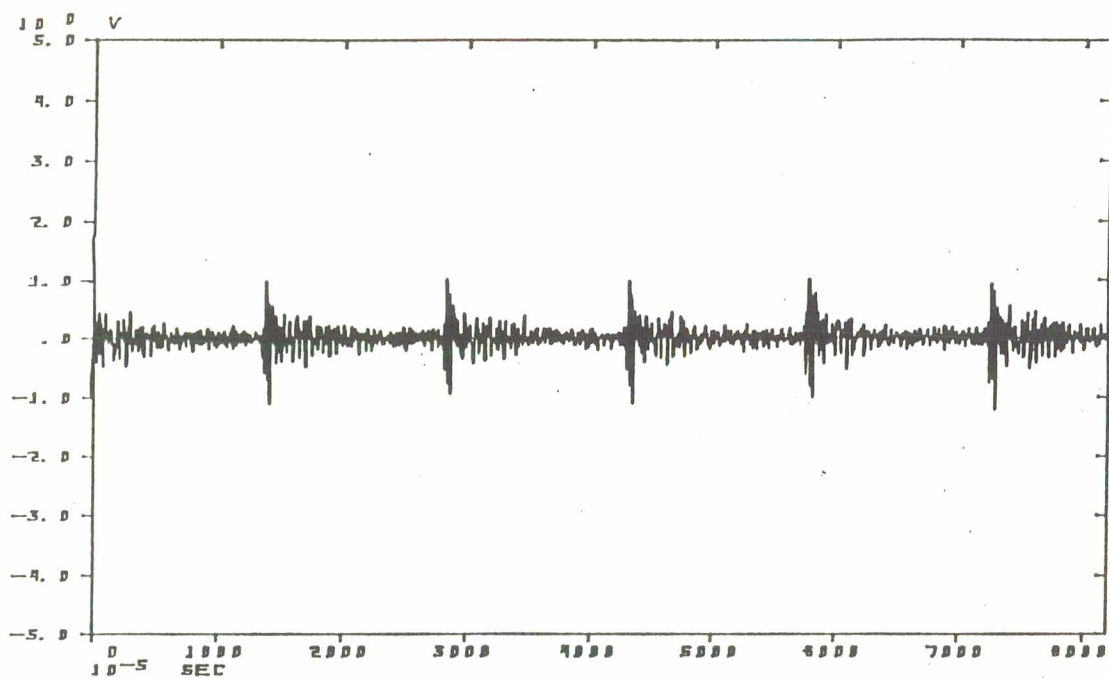


Figura 3.29 Sinal no tempo - rolamento SKF 01 com defeito na pista estacionária.

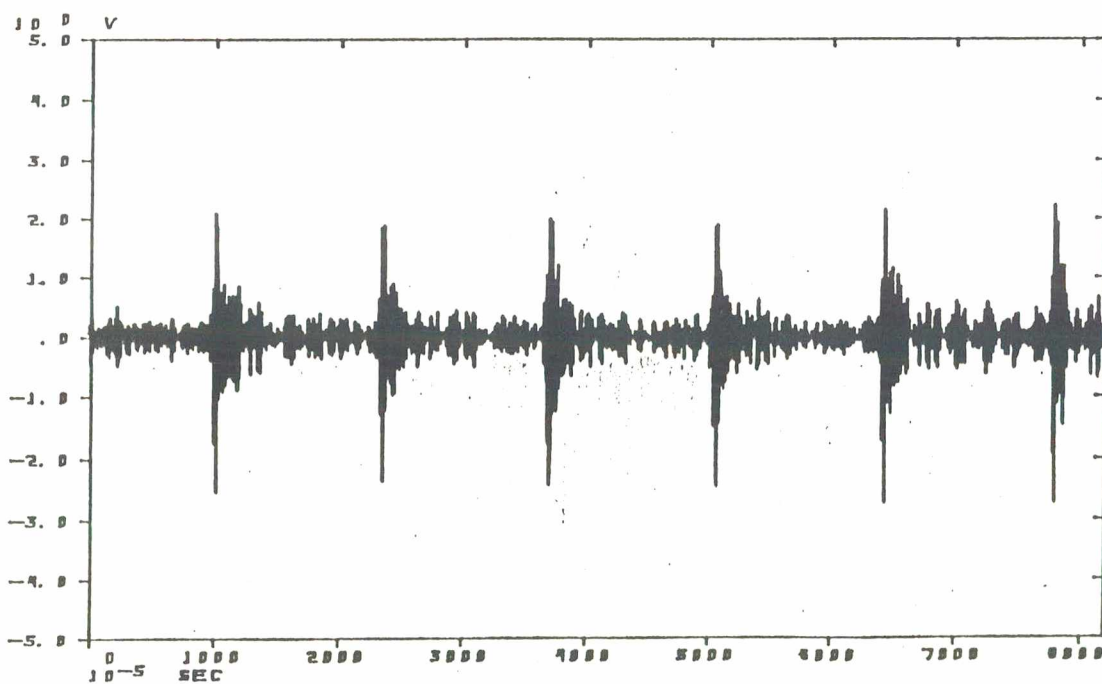


Figura 3.30 Sinal da fig.3.29 filtrado 23% em torno de 6400 Hz.

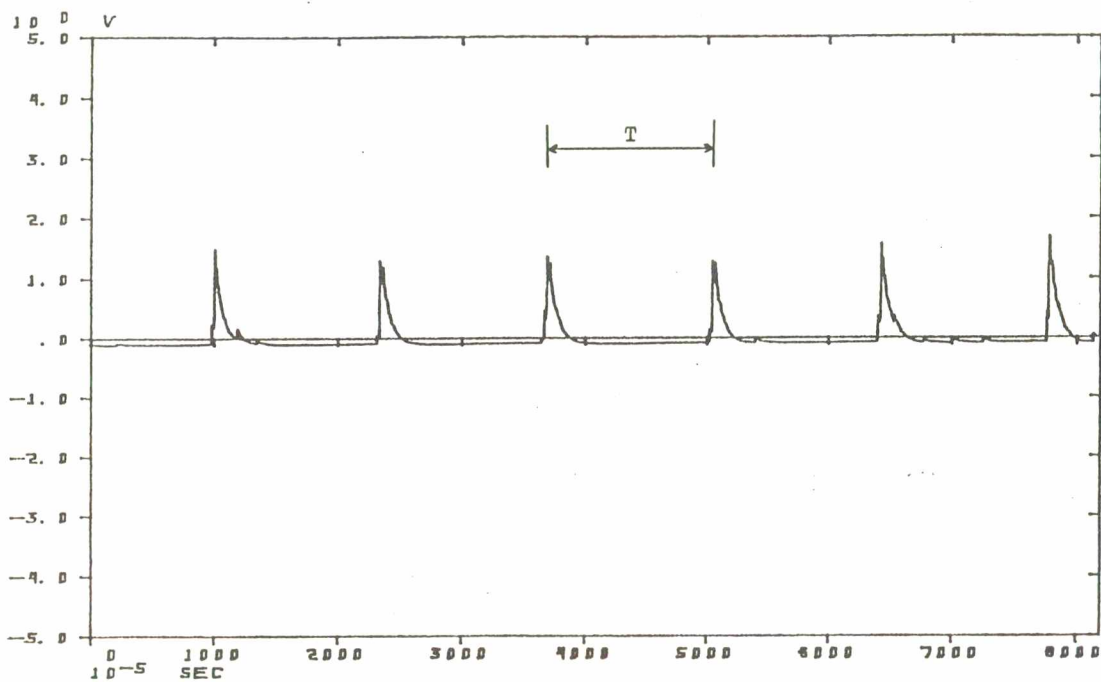


Figura 3.31 Envelope do sinal da figura 3.30.

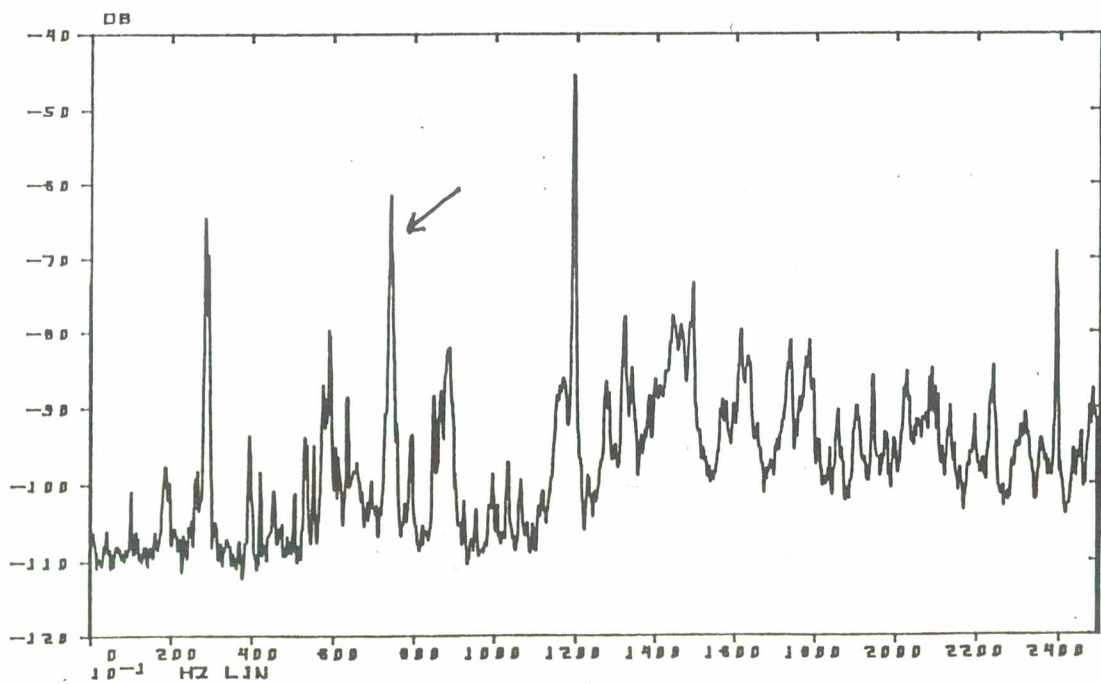


Figura 3.32 Espectro direto - rolamento SKF 01 - defeito na pista estacionária.

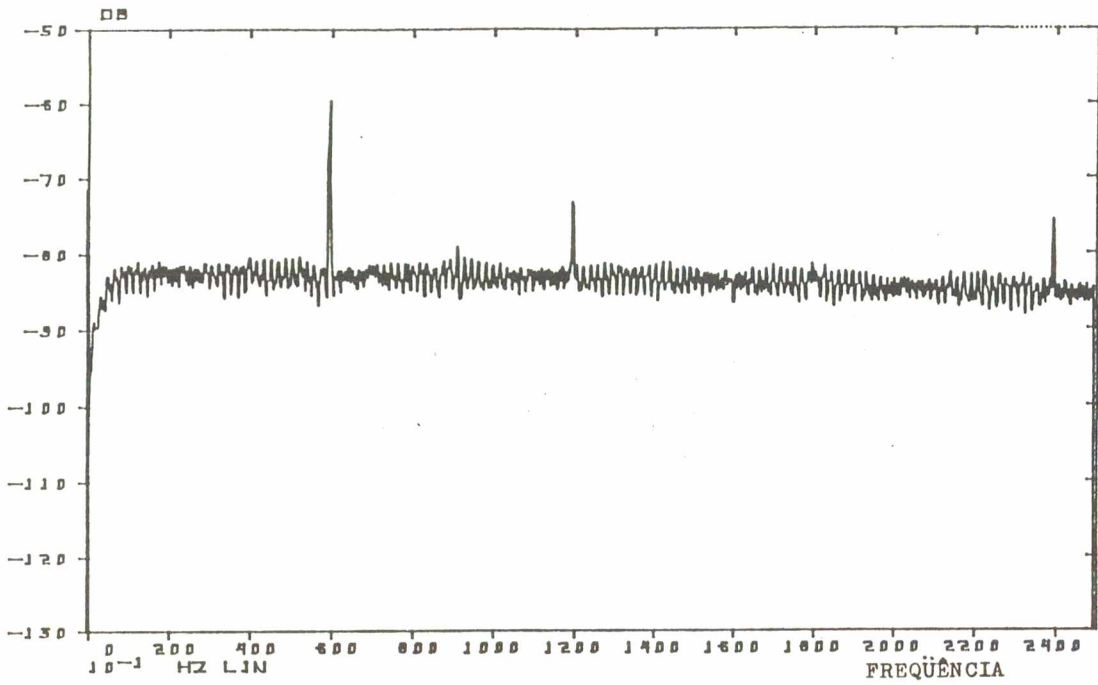


Figura 3.33 Espectro do envelope - rol. SKF 01 sem defeito.

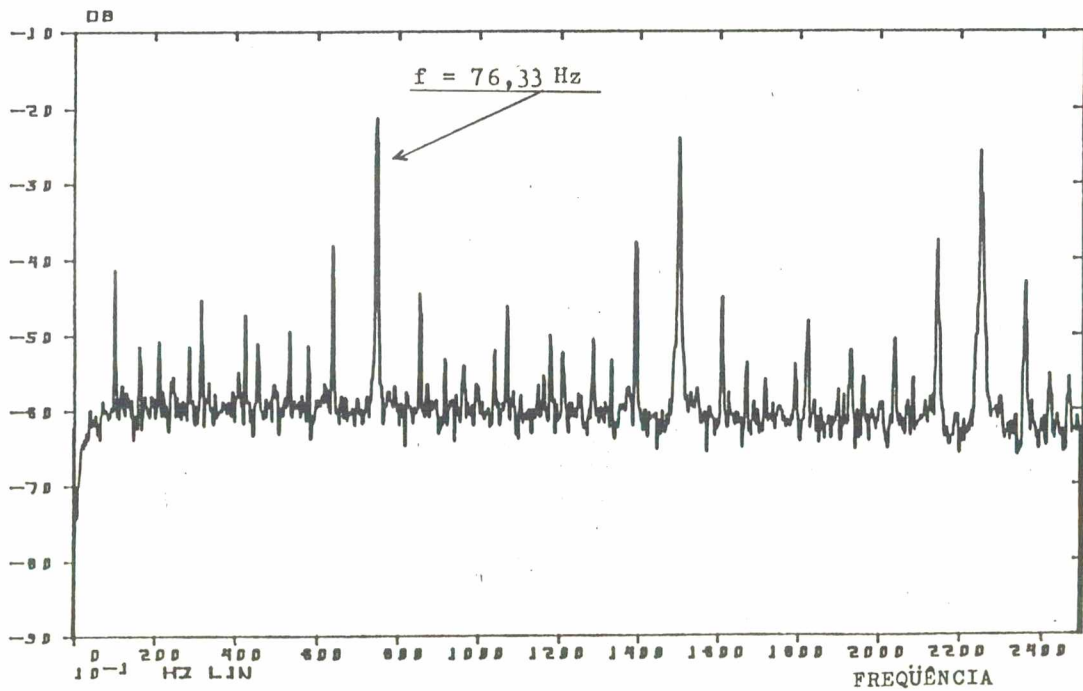


Figura 3.34 Espectro do envelope - rol. SKF 01 com defeito na pista estacionária.

Chega-se a conclusão que o defeito na pista externa (estacionária) pôde ser detectado com facilidade pela técnica do envelope.

Comparando as figuras 3.32 a 3.34, pode-se notar que a técnica do envelope "limpa" todas as outras freqüências que contaminavam o espectro direto, mostrando somente a freqüência relativa ao defeito na pista externa do rolamento.

Um outro tipo de defeito foi analisado. Trata-se de um rolamento com um defeito proposital na pista rodante, ou pista interna. O sinal de vibração neste caso tem uma modulação na amplitude e torna-se mais difícil a detecção no espectro direto. A figura 3.35 mostra o sinal no tempo e a figura 3.36 mostra o sinal já filtrado. Pode-se ver a modulação de amplitude do sinal e também o espaçamento no tempo igual a $7,727 \cdot 10^{-3}$ seg. O envelope do sinal filtrado, figura 3.37, mostra o mesmo espaçamento ainda com maior resolução. A fig. 3.38 é o espectro direto e, como pode-se ver, a freqüência relativa ao defeito (131,69 Hz) não aparece nitidamente mostrando que através desse sinal, não se consegue visualizar se o rolamento apresenta ou não defeito. O espectro do envelope ainda com o rolamento sem falha, fig. 3.39 mostra, claramente, que o rolamento novo estava em boas condições de uso. Por último, a fig. 3.40 mostra o espectro do envelope do sinal filtrado onde se vê, claramente a freqüência relativa ao defeito. O valor dessa freqüência, calculado pela equação (03) do capítulo 2, é igual a 131,69 Hz. O valor mostrado pela figura é igual à 129,40 Hz, o que representa uma diferença desprezível, considerando-se a resolução da análise. Esse espectro não está mais tão "claro" como o da fig. 3.34 (defeito na pista externa). Isso já era esperado porque o sinal sendo modulado por causa da variação da posição da falha em

relação à carga, se torna mais difícil para a detecção dessa frequência. As outras frequências do sinal, mesmo assim, estão pelo menos 20 dB abaixo da frequência relacionada ao defeito.

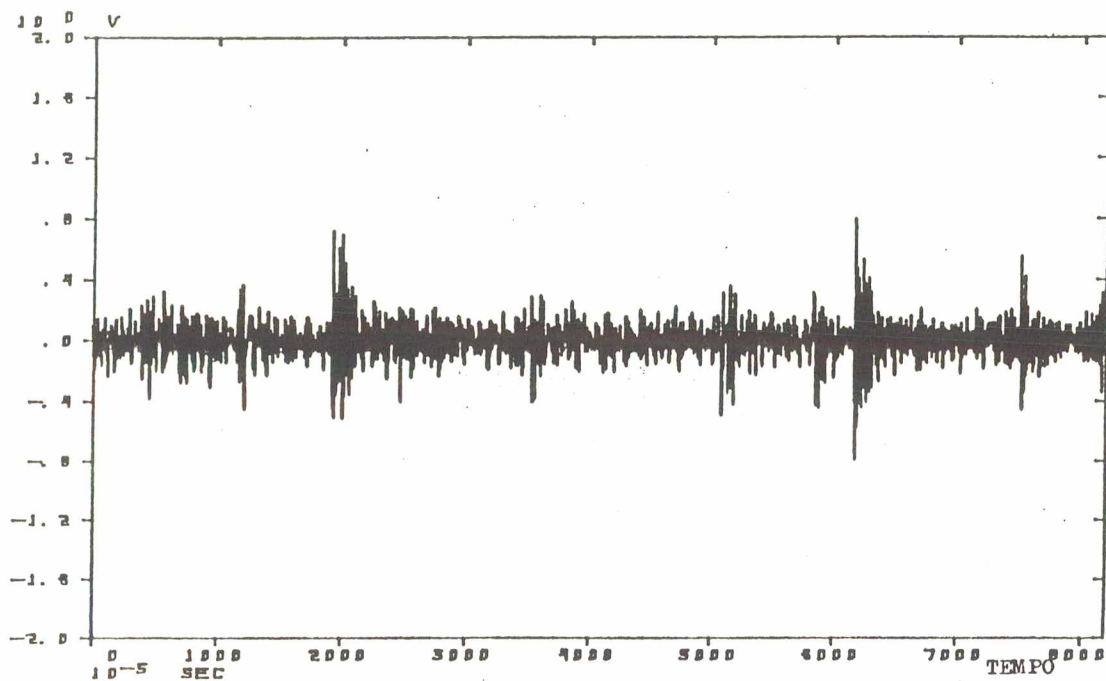


Figura 3.35 Sinal no tempo - rolamento SKF 02 com defeito na pista rodante.

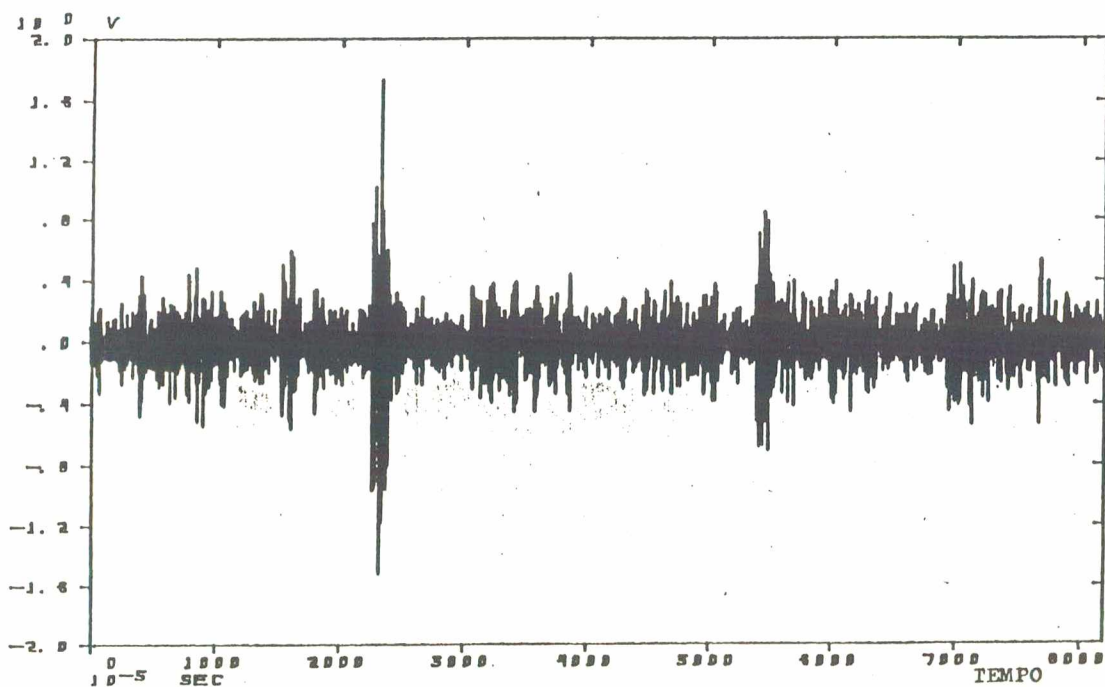


Figura 3.36 Sinal da figura 3.35 filtrado 23% em torno da frequência de 6400 Hz.

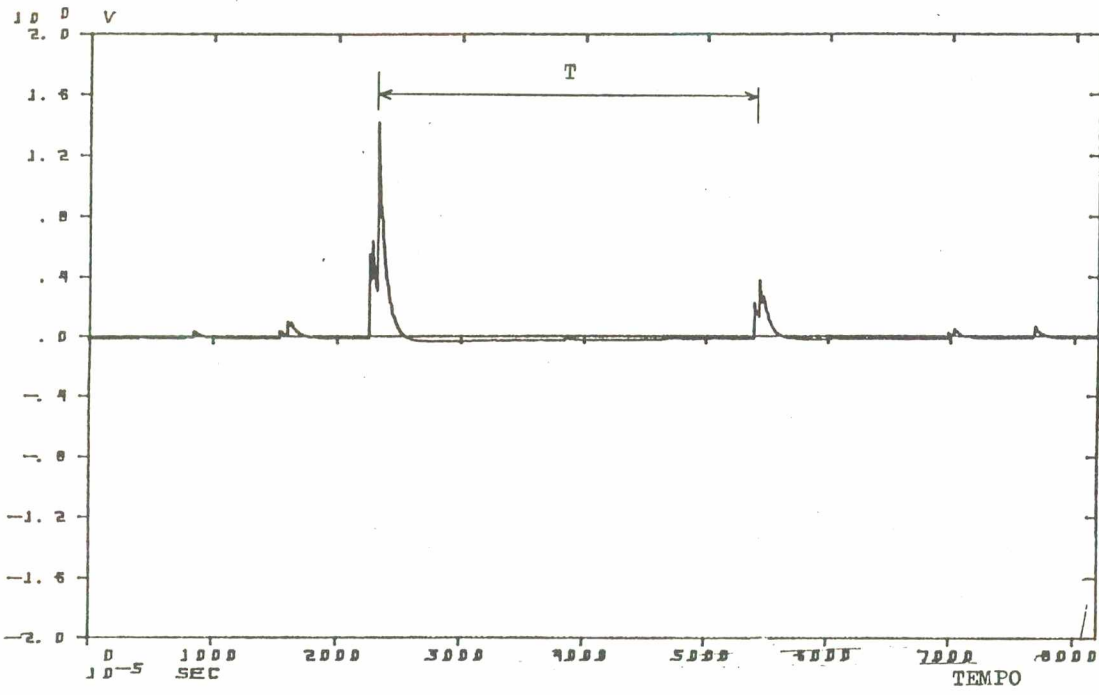


Figura 3.37 Envelope do sinal da figura 3.36.

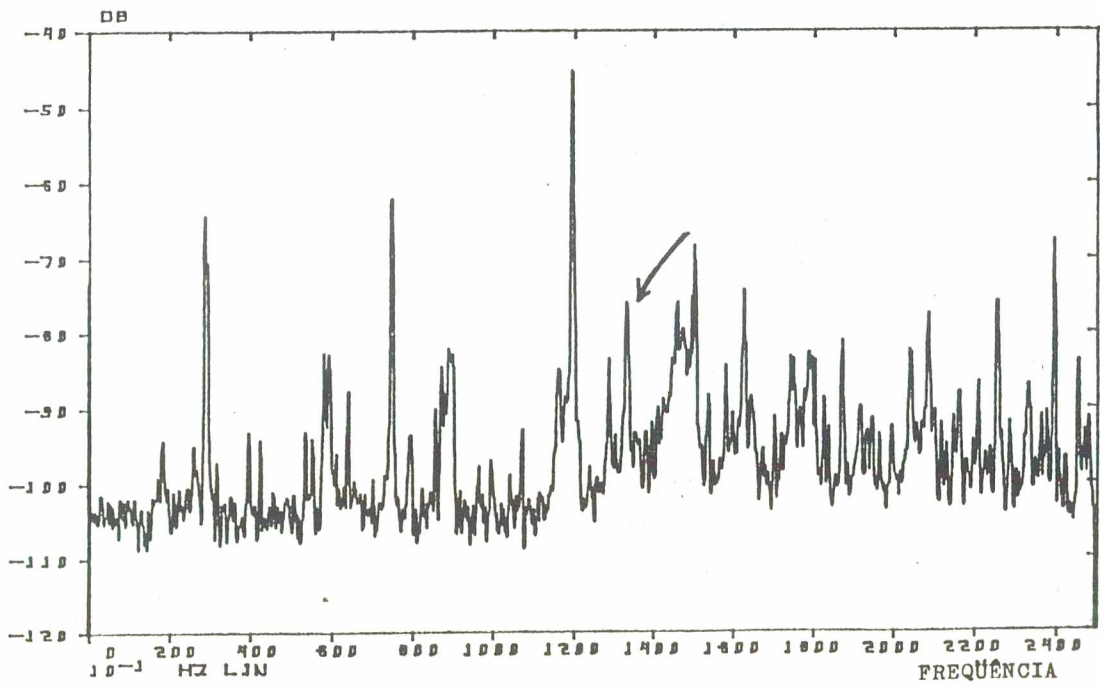


Figura 3.38 Espectro direto - rol. SKF 02 com defeito na pista rodante.

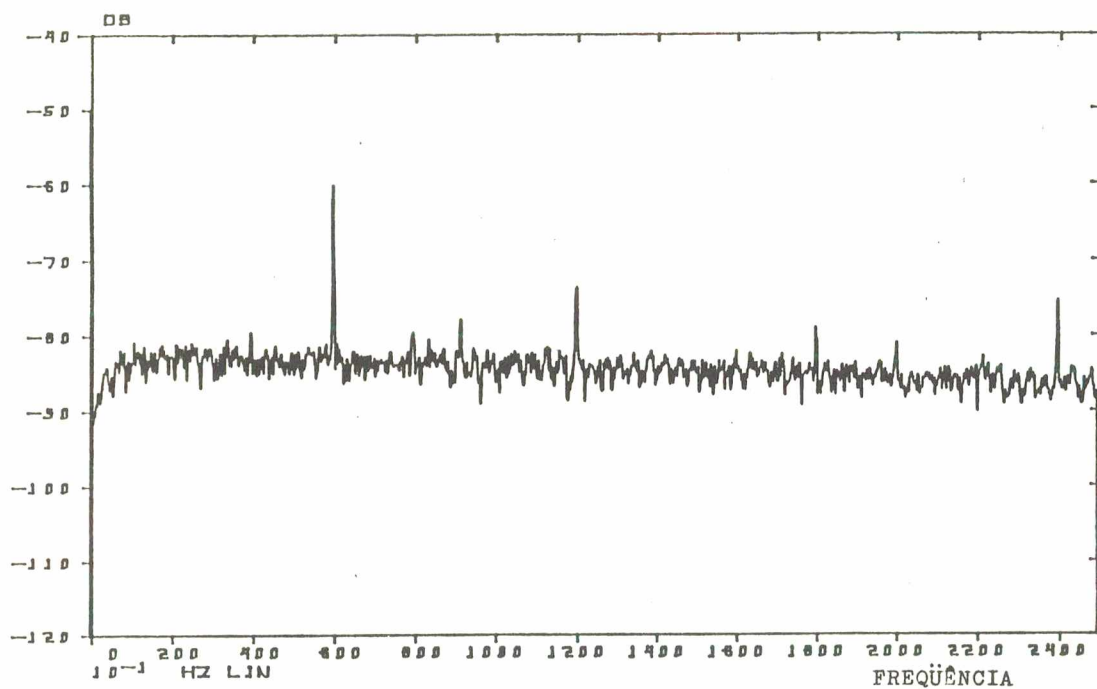


Figura 3.39 Espectro do envelope - rol. SKF 02 novo.

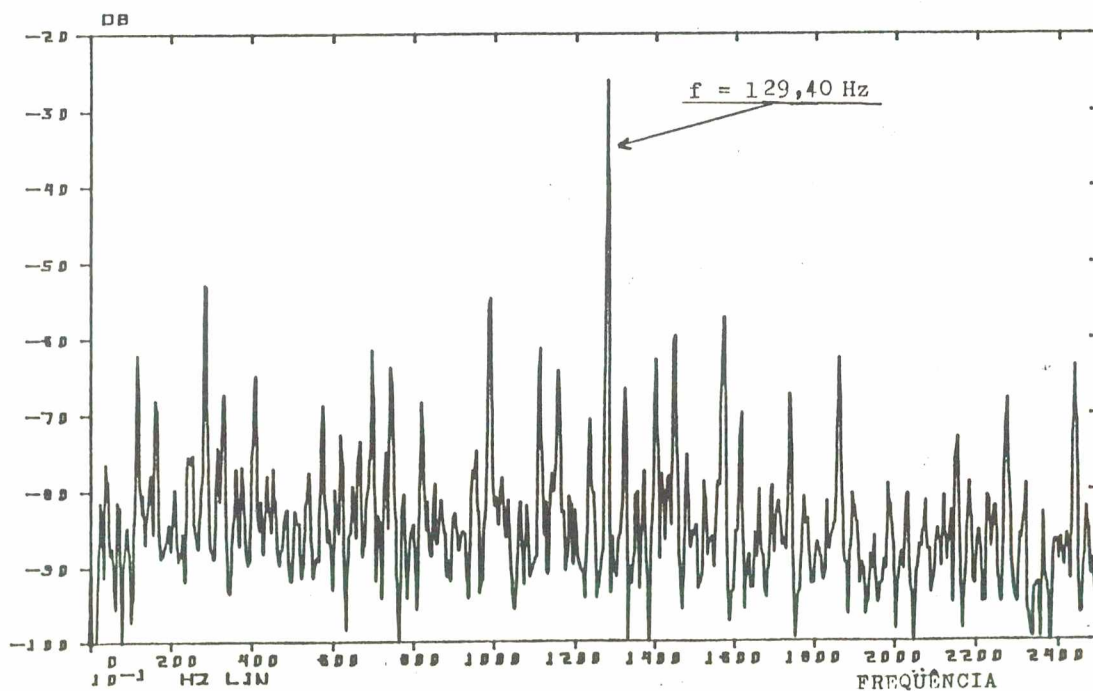


Figura 3.40 Espectro do envelope - rolamento SKF 02 com defeito na pista rodante.

O terceiro tipo de defeito propositado, rolamento número 3, foi feito numa esfera. Esse defeito foi conseguido através de uma caneta elétrica, causando uma pequena erosão na superfície de umas das sete esferas. Esse defeito foi pontual por causa da dificuldade de se manusear a caneta no interior do rolamento.

A frequência relativa ao defeito em uma das esferas, calculada pela equação 03 do capítulo 2 é igual à 104,70 Hz.

A figura 3.41 mostra o sinal no tempo do rolamento número 03 com um defeito em uma das esferas. A figura 3.42 mostra esse mesmo sinal filtrado em 23%, aonde se pode notar que existe um espaçamento de tempo repetido igual à $9,64 \cdot 10^{-9}$ seg resultando numa frequência de 103,73Hz, aproximadamente. A figura 3.43 já mostra o envelope do sinal filtrado, também com um espaçamento de mesmo valor. O espectro direto, figura 3.44 não mostra a frequência de 104,70 Hz, relativa ao defeito na esfera. Vê-se que através do espectro direto dificilmente se consegue saber se o rolamento está ou não em boas condições de uso. A figura 3.45 é o sinal relativo ao espectro do envelope do rolamento número 03 ainda sem o defeito. Esse espectro está brando, sem nenhuma frequência o dominando, demonstrando, também, que o rolamento estava em boas condições de uso. O espectro do envelope do rolamento com o defeito na esfera está mostrado na figura 3.46. O espectro não tem um pico muito claro mas, a frequência relativa ao defeito (103,73 Hz) o está dominando, com pelo menos 10 dB de diferença. Quando o rolamento apresenta um defeito na esfera, dificilmente se consegue achar a frequência através de outro método de análise se não o método do envelope [9].

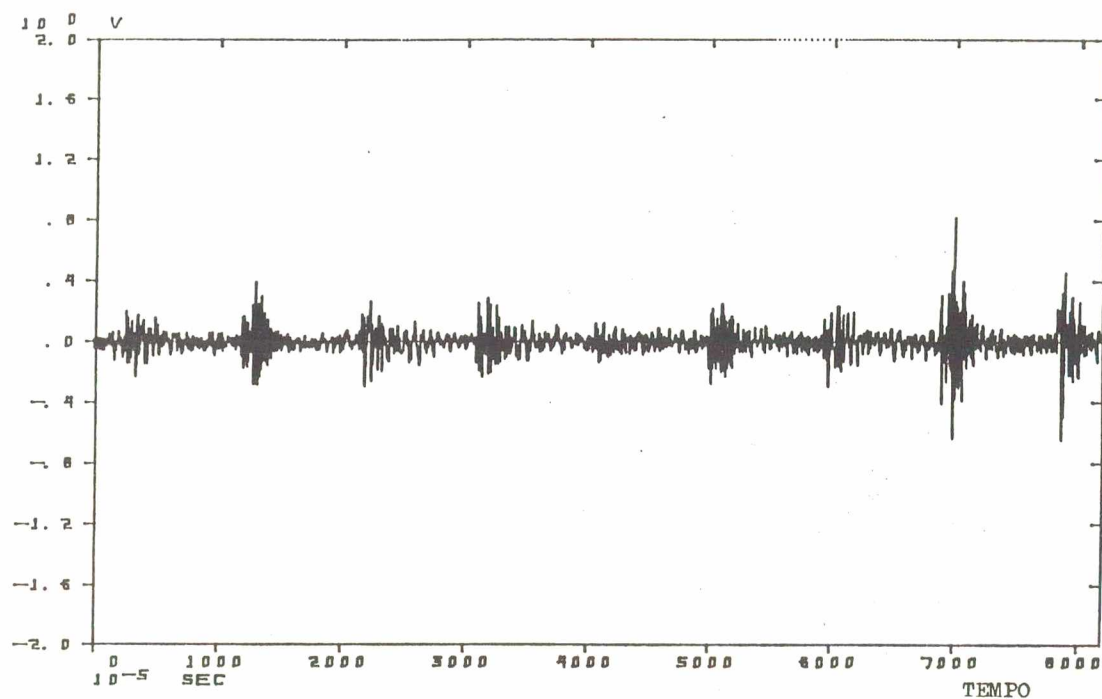


Figura 3.41 Sinal no tempo - rolamento SKF 03 com defeito na esfera.

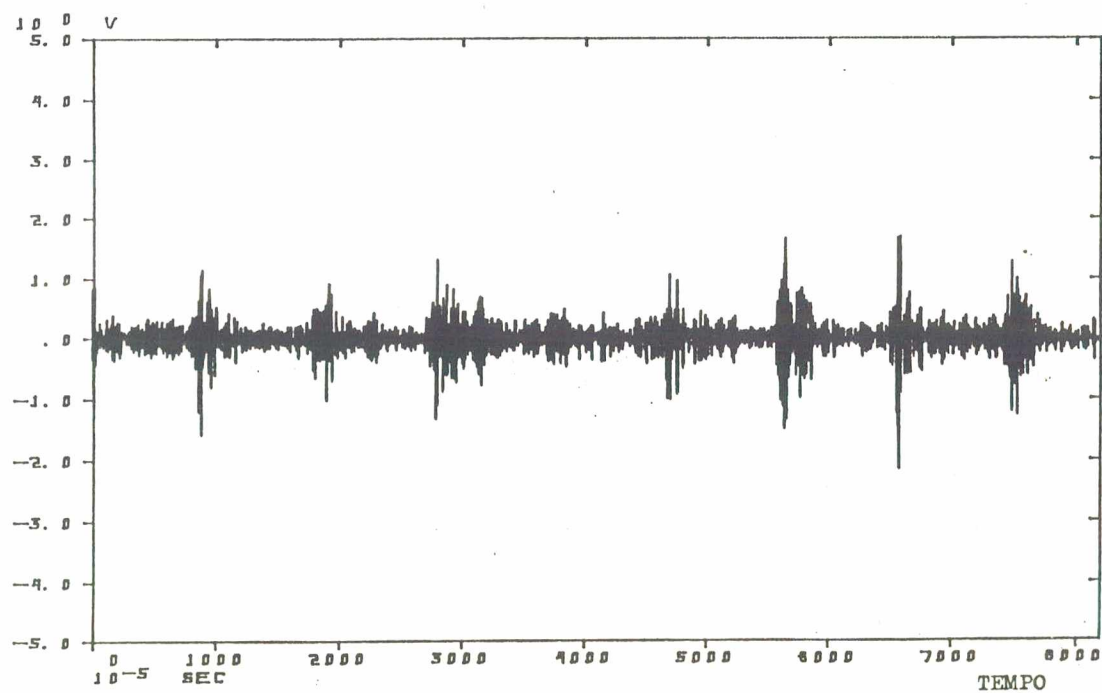


Figura 3.42 Sinal da figura 3.41 filtrado 23% centrado na frequência de 8400 Hz.

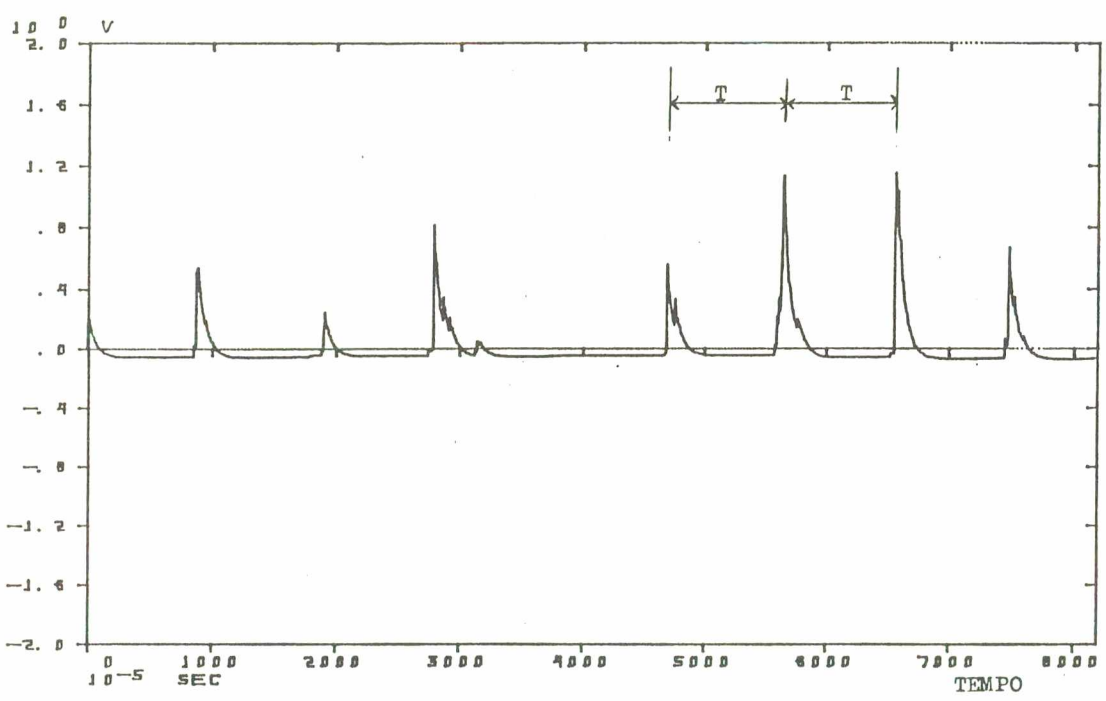


Figura 3.43 Envelope do sinal da figura 3.42.

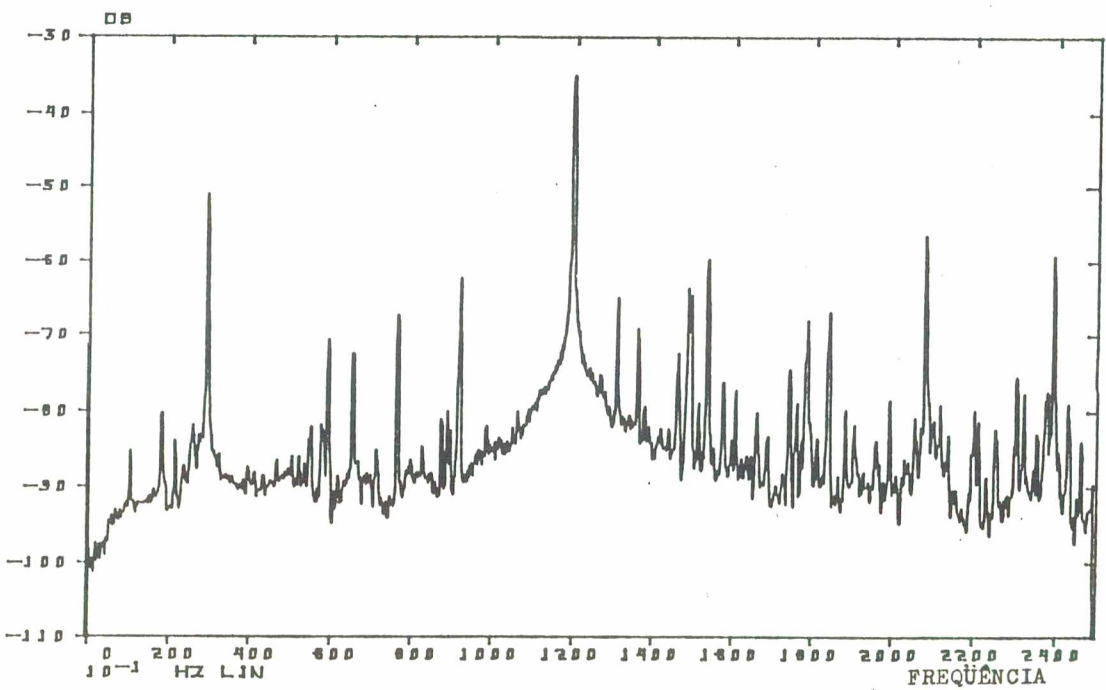


Figura 3.44 Espectro direto - rolamento SKF 03 com defeito na esfera.

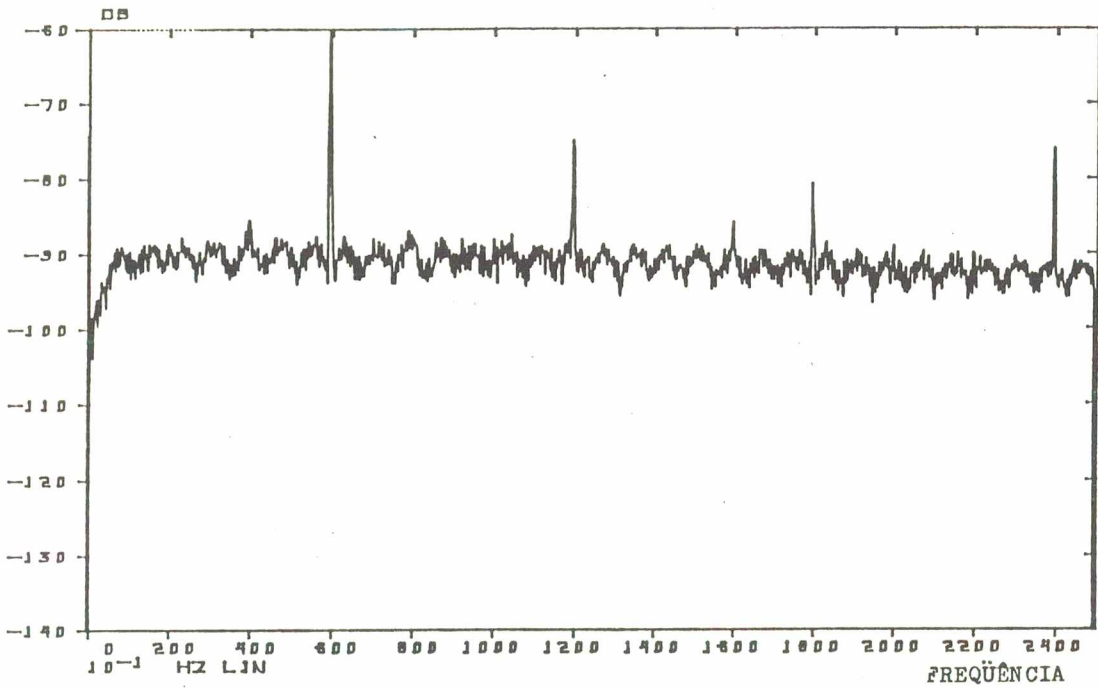


Figura 3.45 Espectro do envelope - rolamento SKF 03 novo.

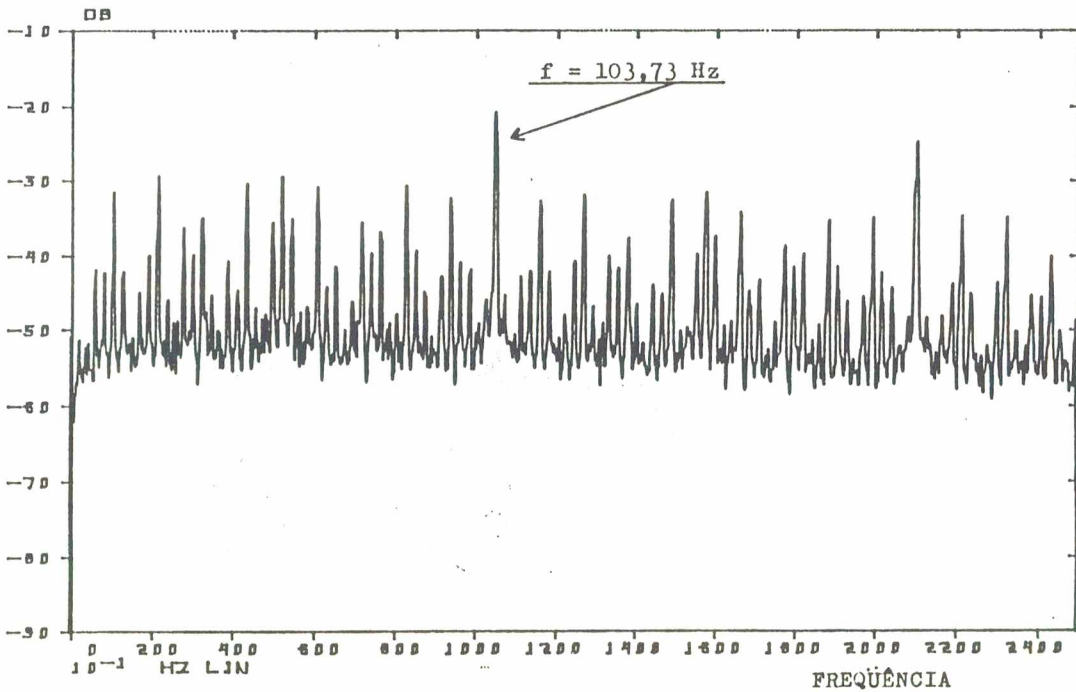


Figura 3.46 Espectro do envelope - rolamento SKF 03 com defeito na esfera.

CAPÍTULO 4 - MEDIÇÃO EM DIVERSOS TIPOS DE ROLAMENTOS
COM FALHAS DISTINTAS

4.1 - MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, será estudado o comportamento da Técnica do Envelope de Vibrações em rolamentos mediante diversos tipos de defeitos simulados em rolamentos distintos. Usou-se para esse fim 15 rolamentos novos tipo 6305, discriminados do seguinte modo:

- a) Quatro (04) rolamentos marca SKF;
- b) Nove (09) rolamentos marca NSK;
- c) Dois (02) rolamentos marca TR.

Os rolamentos tipo 6305 de marca SKF tem as seguintes especificações:

- 1) número de esferas -----> sete (07);
- 2) diâmetro das esferas -----> 11,50 mm
- 3) diâmetro entre centro de esferas -----> 43,50 mm
- 4) ângulo de contato -----> 0°.

Os rolamentos tipo 6305 de marca NSK tem as seguintes especificações:

- 1) número de esferas -----> oito (08);
- 2) diâmetro das esferas -----> 10,30 mm

- 3) diâmetro entre centro de esferas -----> 39,35 mm
 4) ângulo de contato -----> 0°

Os rolamentos tipo 6305 de marca TR tem as seguintes especificações:

- 1) número de esferas -----> sete (07);
 2) diâmetro das esferas -----> 11,45 mm
 3) diâmetro entre centro de esferas - -----> 43,30 mm
 4) ângulo de contato -----> 0°

O sistema de medição foi o mesmo usado no Capítulo 3, mostrado na figura 3.1.

Foram feitos propositadamente cinco (05) tipos de defeitos que são mais comuns em rolamentos. Esses defeitos foram localizados na pista externa (estacionária), na pista interna (rodante) e também nas esferas.

Na pista externa os seguintes tipos:

- a) defeitos pontuais em profundidade;
 b) defeitos tipo riscos;
 c) defeitos tipo área;
 d) defeitos tipo desgaste causado pela entrada de areia no interior do rolamento.

Na pista interna os seguintes tipos:

- a) defeitos tipo risco.

Nas esferas o seguinte tipo:

a) defeitos tipo pontual.

Esses defeitos foram escolhidos para simular defeitos reais. O pontual representa o defeito que ocorre quando um rolamento fica muito tempo parado numa mesma posição suportando uma carga elevada, além de vibrações na base da máquina, isto é, vibrações geradas por outras máquinas vizinhas em funcionamento, figura 4.1. O defeito tipo risco pode representar uma colocação inadequada do rolamento no eixo (batidas com um martelo em uma das pistas ou esferas - figura 4.2), ocasionando endentações nas superfícies de contato. Os defeitos tipo área podem representar o que acontece no rolamento quando água ou algum agente corrosivo penetra em seu interior, ocasionando corrosão nas superfícies de contato, como também o descascamento que ocorre normalmente por causa da fadiga, figuras 4.3 e 4.4. E por último será também simulado o defeito ocasionado por entrada de areia no rolamento, figura 4.5 [16].

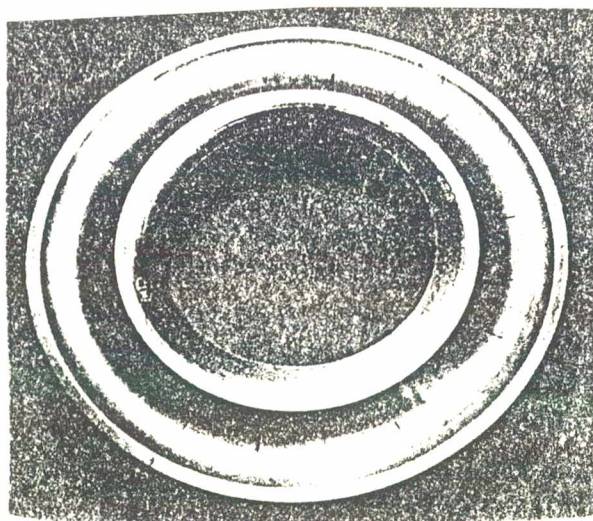


Figura 4.1 Rolamento que sofreu excesso de carga quando parado

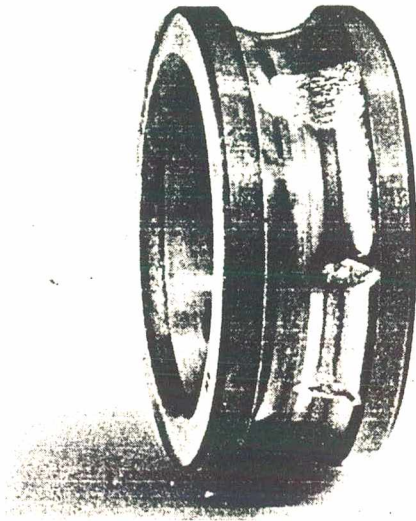


Figura 4.2 Rolamento montado inadequadamente levando pancadas em uma de suas bordas.

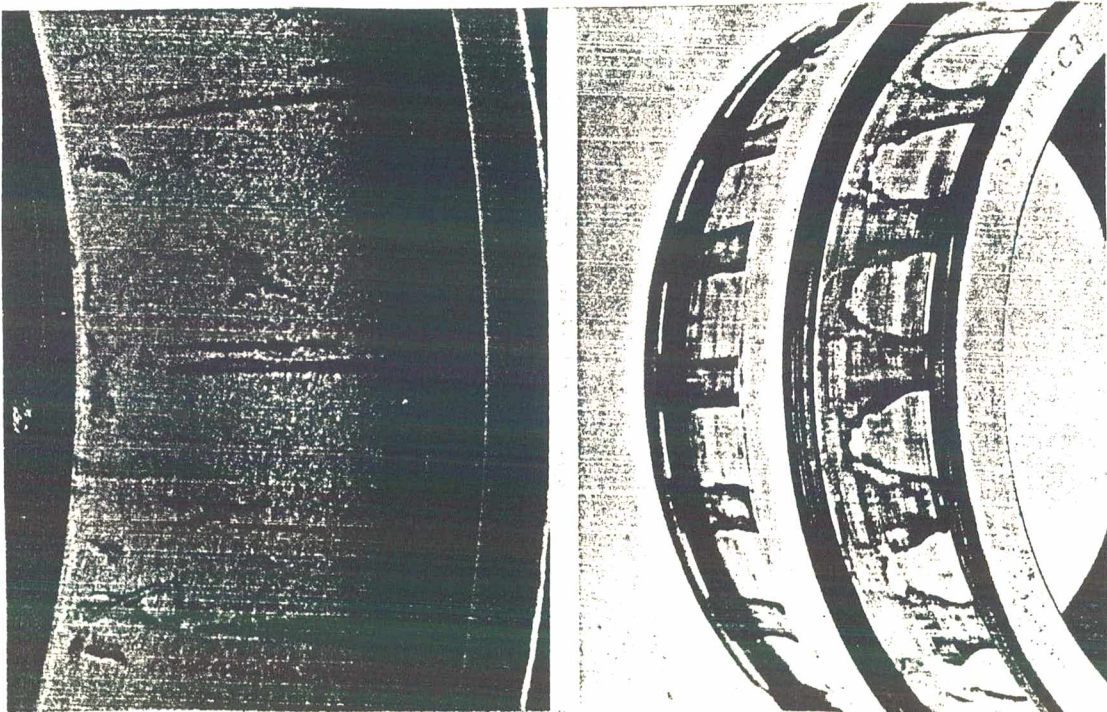


Figura 4.3 Rolamento com corrosão causada por entrada de água ou líquido corrosivo em seu interior.

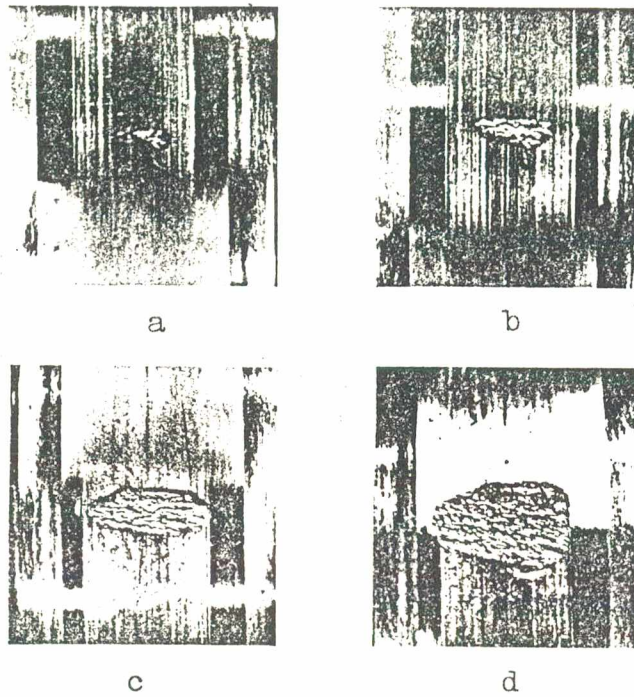


Figura 4.4 Rolamento com descascamento ocasionado por fadiga.

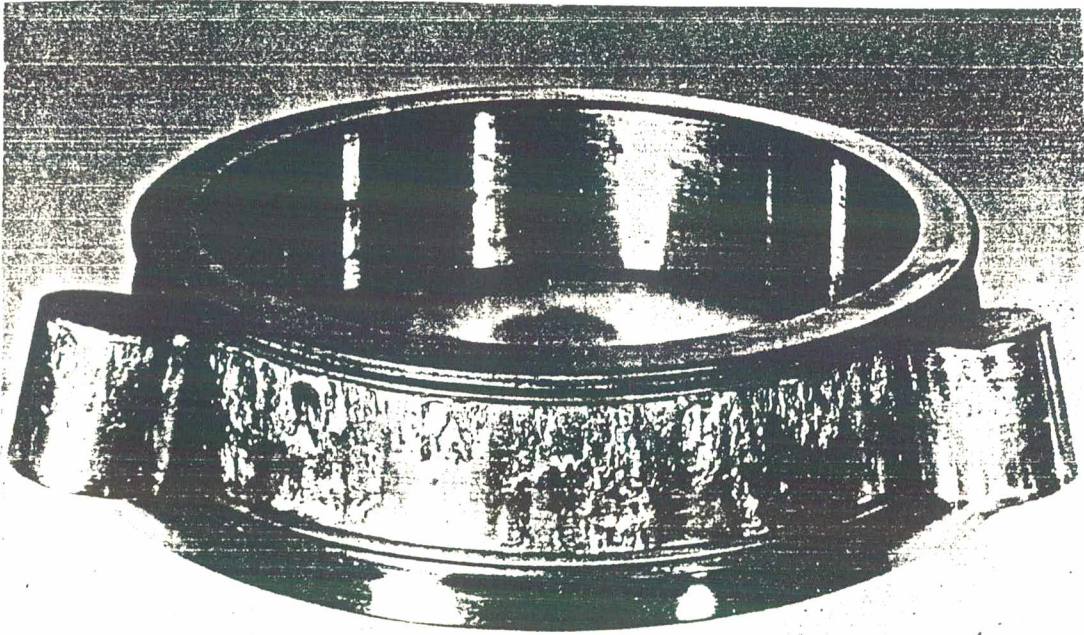


Figura 4.5 Rolamento avariado por entrada de areia em seu interior.

4.2 FREQUÊNCIAS RELACIONADAS AOS DEFEITOS E TIPOS DE ROLAMENTOS

4.2.1 Rolamento tipo SKF

O capítulo 3 já tratou desse tipo de rolamento e mostra que as frequências relativas aos defeitos nas duas pistas e nas esferas são:

- a) pista externa (estacionária) -----> 76,62 Hz;
- b) pista interna (rodante) -----> 131,69 Hz
- c) esferas -----> 104,70 Hz

4.2.2 Rolamento tipo NSK

Usando-se as equações (01), (02) e (03) do capítulo 2 e as informações dadas no item 4.1, pode-se calcular as frequências relacionadas aos defeitos nas duas pistas de rolamento e nas esferas, em um rolamento NSK tipo 6305. Essas frequências são:

- a) pista externa (estacionária) -----> 88,60 Hz
- b) pista interna (rodante) -----> 151,40 Hz
- c) esferas -----> 106,80 Hz

4.2.3 Rolamento tipo TR

Fazendo um mesmo processo análogo ao 4.2.2 chega-se à conclusão que as frequências relativas aos defeitos são:

- a) pista externa (estacionária) -----> 76,61 Hz
- b) pista interna (rodante) -----> 131,70 Hz
- c) esferas -----> 104,67 Hz.

Em todas as medições nesses rolamentos, itens 4.3, 4.4, e 4.5, a técnica do envelope de vibrações mostrou sempre o valor correto da frequência relativa ao defeito em questão seja ele na pista externa, na pista interna ou, ainda, nas esferas, razão pela qual optou-se por medir, também, a diferença do nível de vibração em relação à um defeito em particular.

4.3 DEFEITOS NAS PISTAS ESTACIONÁRIAS

4.3.1 Defeito pontual

Foram usados dois (02) rolamentos SKF e dois (02) rolamentos NSK no qual se fez em cada um, um ponto de escavação pontual, conseguido através de uma caneta elétrica. As figuras 4.6,

4.7, 4.8 e 4.9 mostram os espectros do envelope típicos de um rolamento SKF e outro NSK, mostrando o valor da aceleração, desse defeito, em cada um deles.

A tabela da figura 4.10 e a curva da figura 4.11 mostram, em termos de profundidade do defeito, relativo a cada rolamento, à aceleração do mancal.

Pode-se notar que existe um aumento gradativo em relação ao aumento da profundidade. Esses resultados foram tomados diversas vezes para se verificar a repetibilidade.

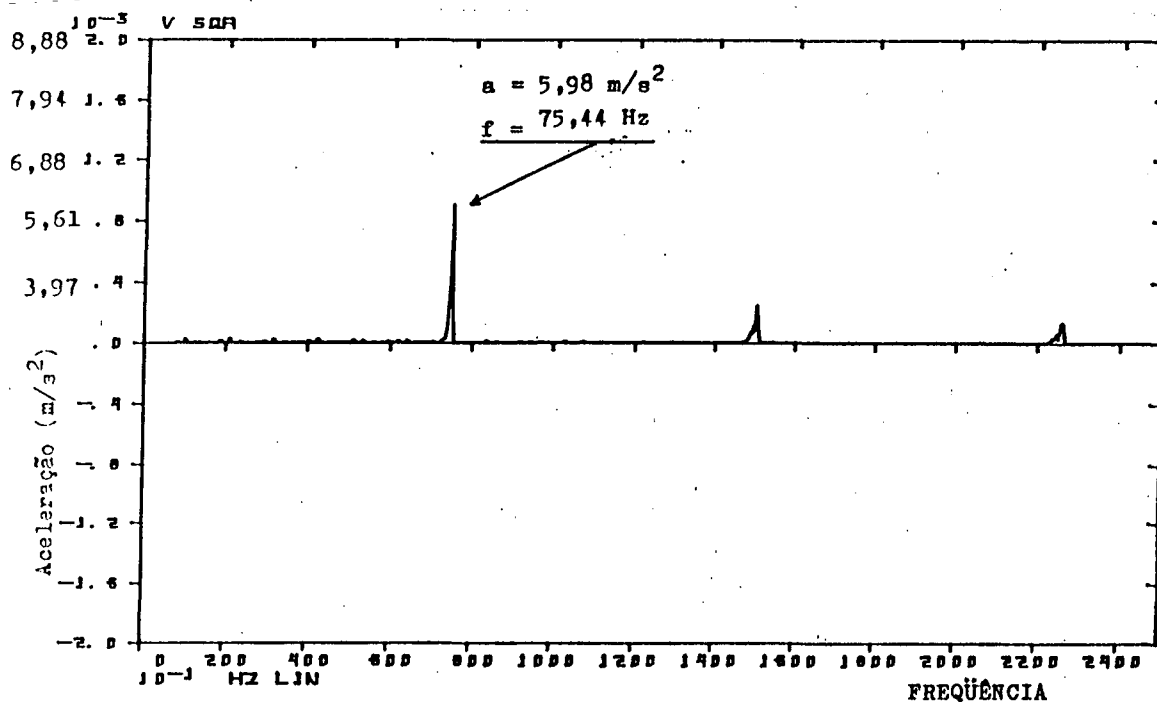


Figura 4.6 Espectro do envelope - forma polar - defeito tipo profundidade - pista estacionária - rol. SKF 04

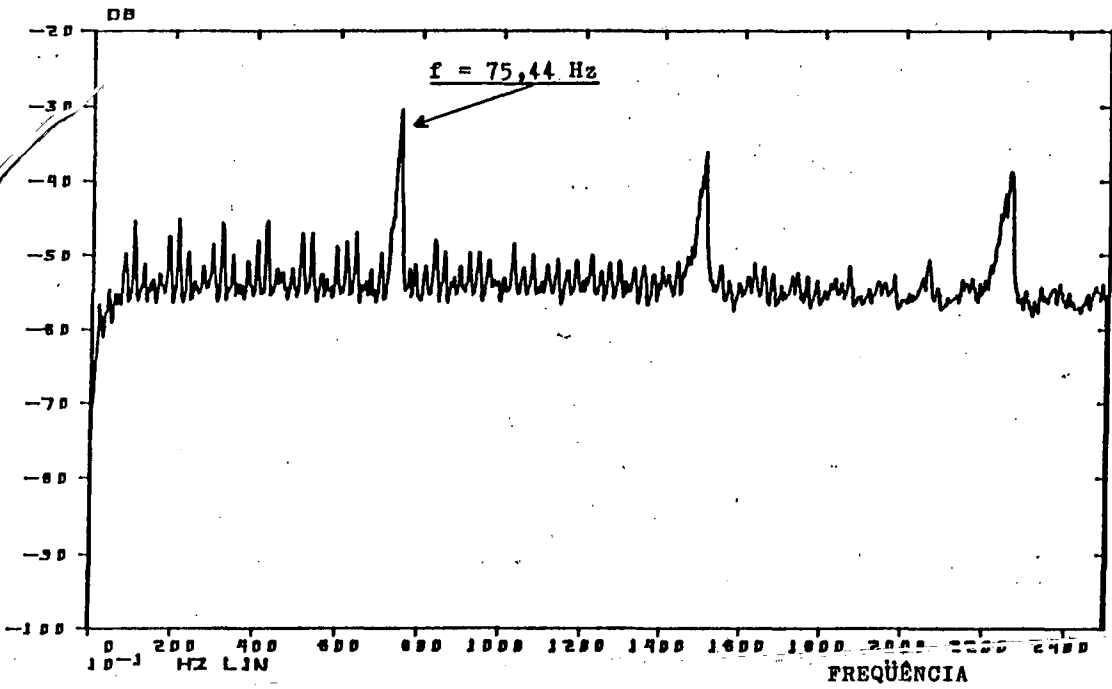


Figura 4.7 Espectro de envelope - logaritmo da figura 4.6.

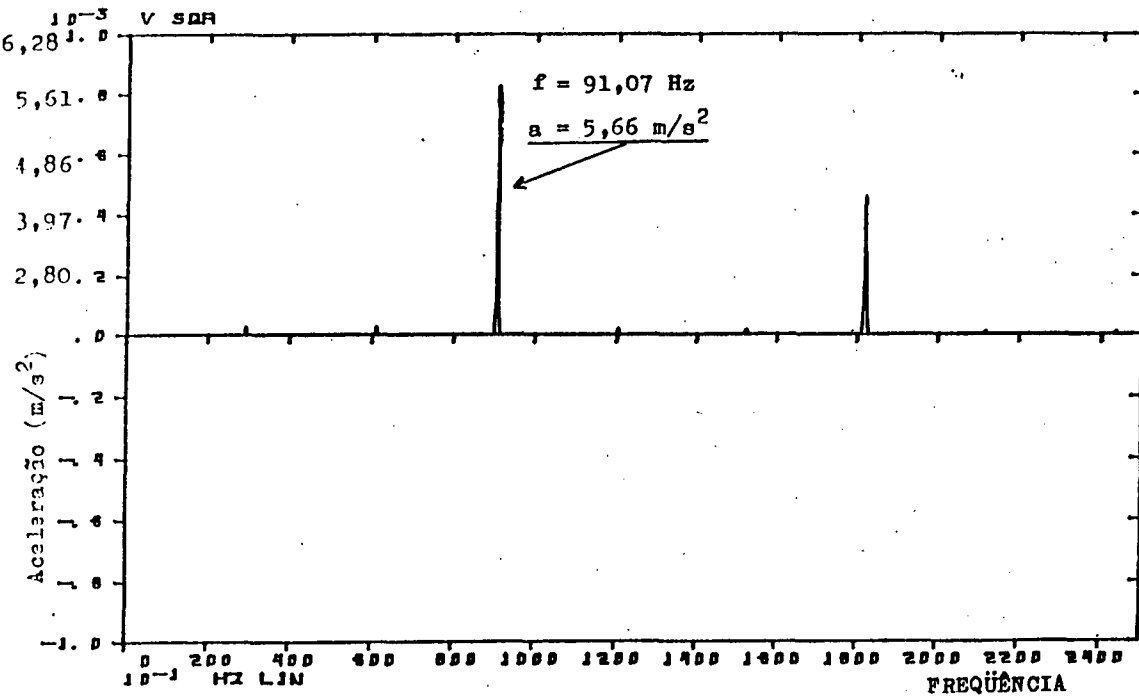


Figura 4.8. Espectro do envelope - forma polar - defeito tipo profundidade - pista estacionária - rol. NSK 09

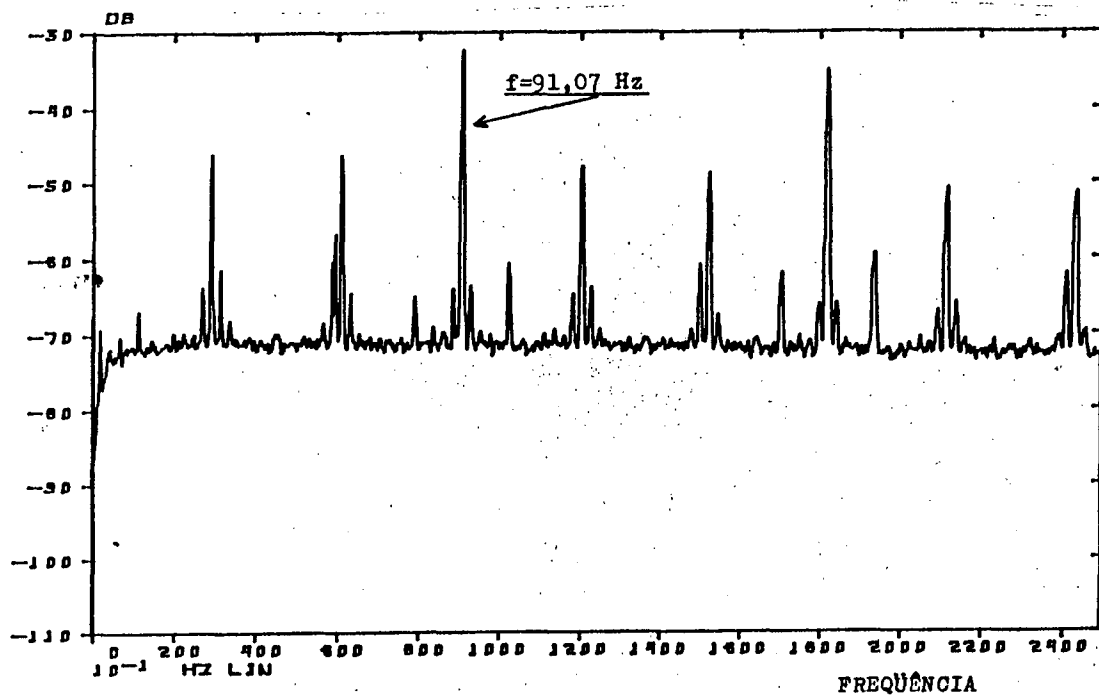


Figura 4.9 Espectro do envelope - logarítmo da figura 4.8.

Rolamento	Aceleração (m/s^2)
01	3,96
02	5,66
03	5,98
04	6,27

Figura 4.10 Tabela de valores de aceleração medidos em quatro rolamentos com defeito tipo profundidade na pista estacionária.

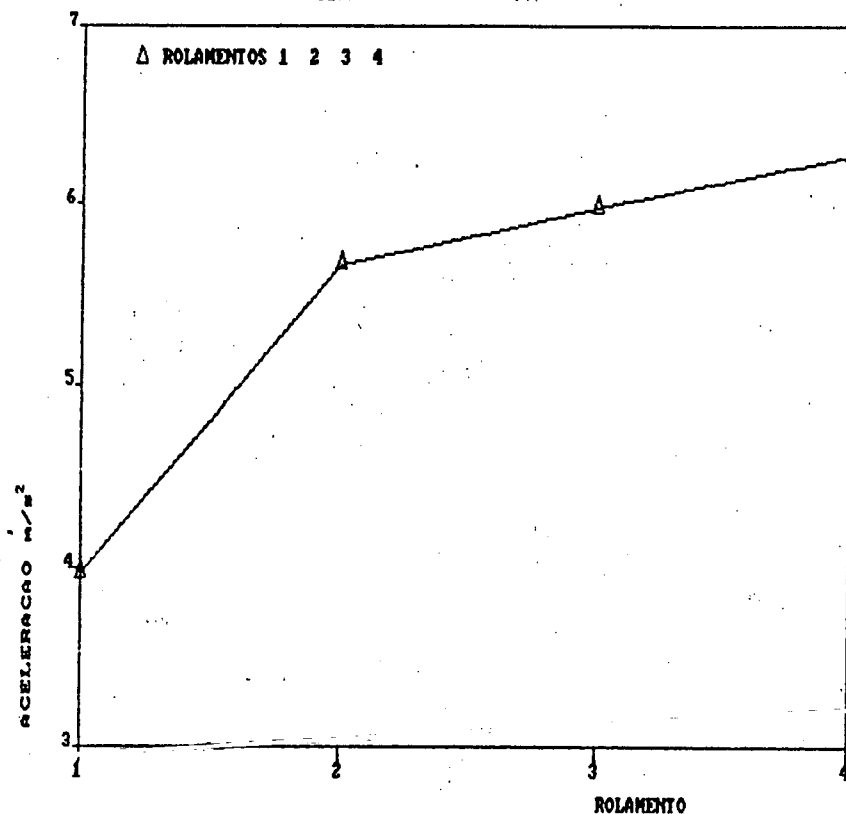


Figura 4.11 Curva referente a tabela da figura 4.10.

Cada rolamento sofreu uma escavação maior do que o outro, e conseqüentemente o valor da aceleração do mancal referente a cada rolamento testado, crescia com o aumento do defeito. A relação não é linear, como já era esperado, porque os defeitos não tinham uma relação linear, mas, o crescimento é significativo, mostrando que a técnica de análise usada é confiável. O valor da frequência relativa a cada tipo de rolamento usado nesta simulação, foi sempre o mesmo, mostrando uma grande repetibilidade.

4.3.2 Defeito tipo risco

Foi usado um (01) rolamento NSK e dois (02) rolamentos SKF neste tipo de defeito simulado. O defeito era feito da seguinte maneira: fez-se, primeiramente um risco transversal à pista de rolamento e tirou-se o espectro e consecutivamente, fez-se mais oito riscos, tendo-se tirado o espectro correspondente a cada um deles. Os riscos ficaram equidistantes entre si, em todos os três rolamentos e conseqüentemente no NSK os riscos seguiram o mesmo espaçamento das esferas. As figuras 4.12, 4.13, 4.14 e 4.15 mostram o espectro do envelope da vibração gerada por esses riscos em cada tipo de rolamento, podendo-se ver a amplitude da aceleração referente a esse tipo de defeito.

A tabela da figura 4.16 mostra a variação de amplitude da aceleração dos três rolamentos em relação a cada risco feito na pista estacionária e a figura 4.17 mostra a curva correspondente.

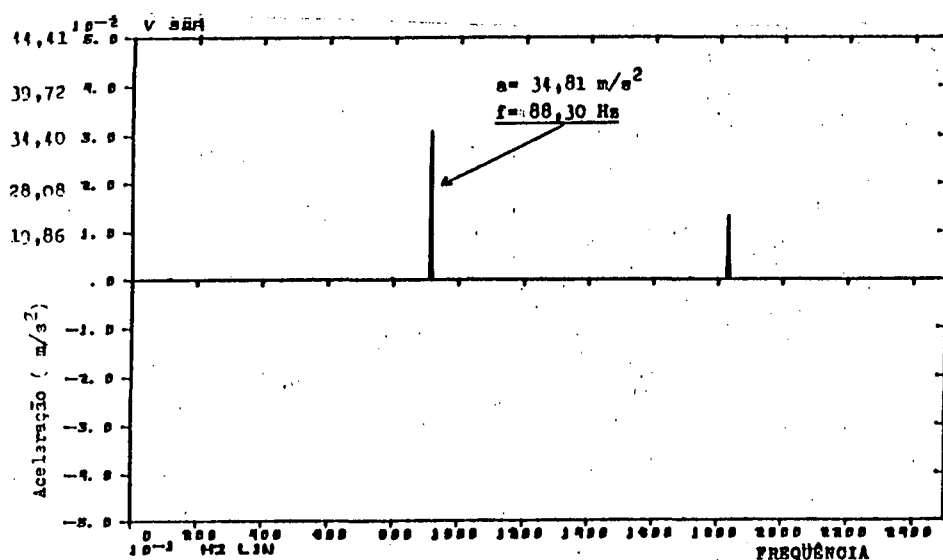


Figura 4.12 Espectro do envelope-forma polar - defeito tipo risco pista estacionária - rol. NSK 10 - 08 riscos.

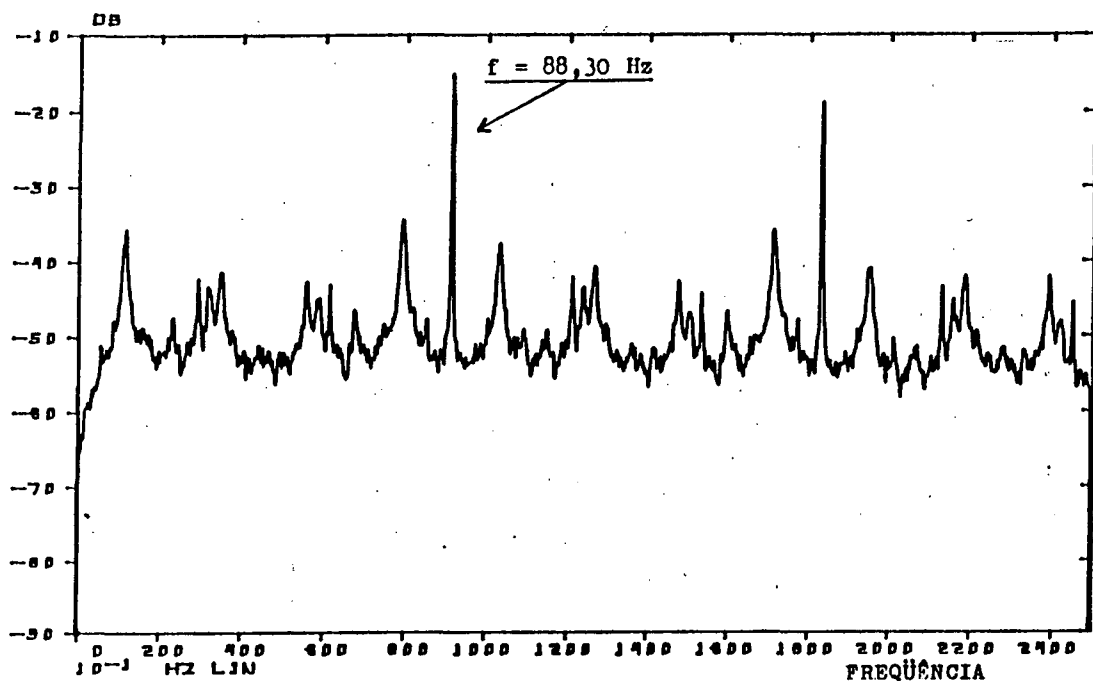


Figura 4.13 Espectro do envelope - log mag da figura 4.12.

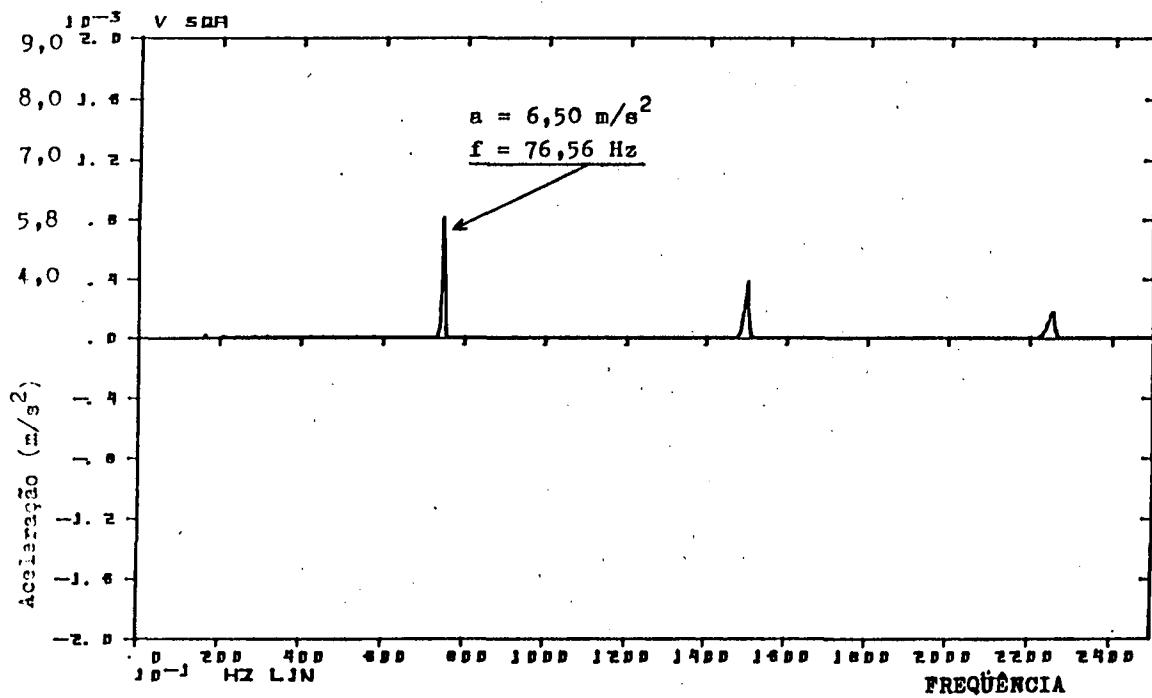


Figura 4.14 Espectro do envelope - forma polar - defeito tipo risco - pista estacionária - rol. SKF 06-01 risco.

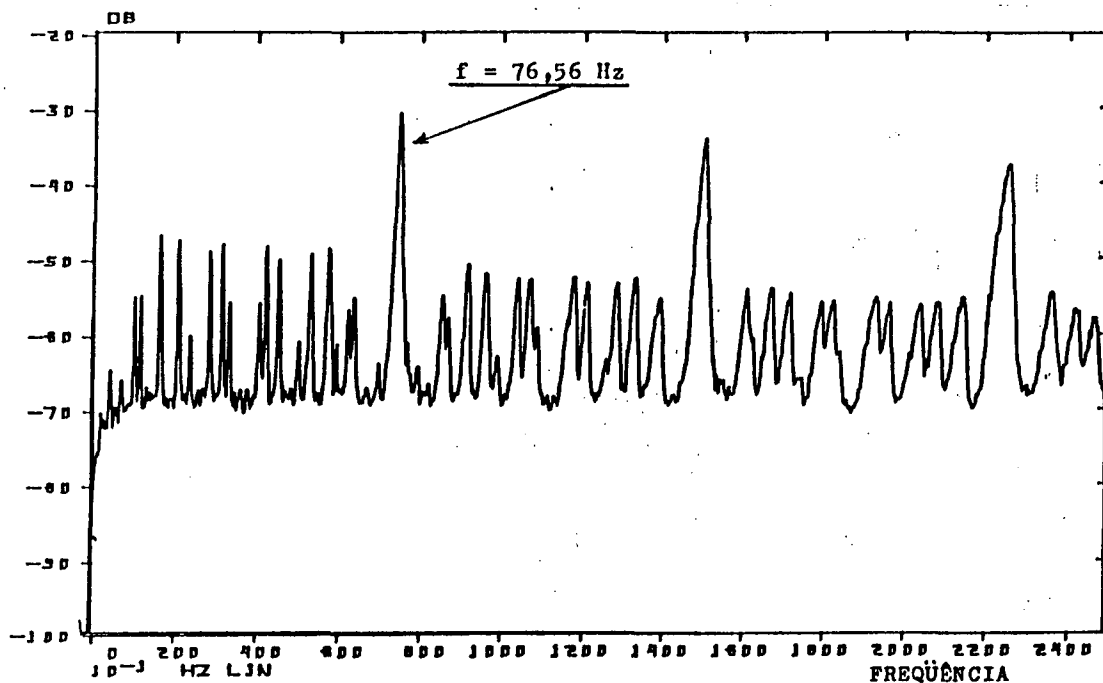


Figura 4.15 Espectro do envelope - logaritmo da figura 4.14.

Falha	Rolamento	Aceleração (m/s^2)	Falha	Rolamento	Aceleração (m/s^2)
01	SKF	6,5	05	SKF	20,10
	SKF	6,73		SKF	27,28
	NSK	4,80		NSK	31,80
02	SKF	13,78	06	SKF	27,28
	SKF	10,11		SKF	29,53
	NSK	10,65		NSK	32,20
03	SKF	18,49	07	SKF	33,27
	SKF	15,32		SKF	36,15
	NSK	12,32		NSK	34,22
04	SKF	18,98	08	SKF	29,53
	SKF	19,10		SKF	40,86
	NSK	31,50		NSK	34,81

Figura 4.16 Tabela de valores de aceleração medidos em tres rolamentos com defeito tipo risco na pista externa

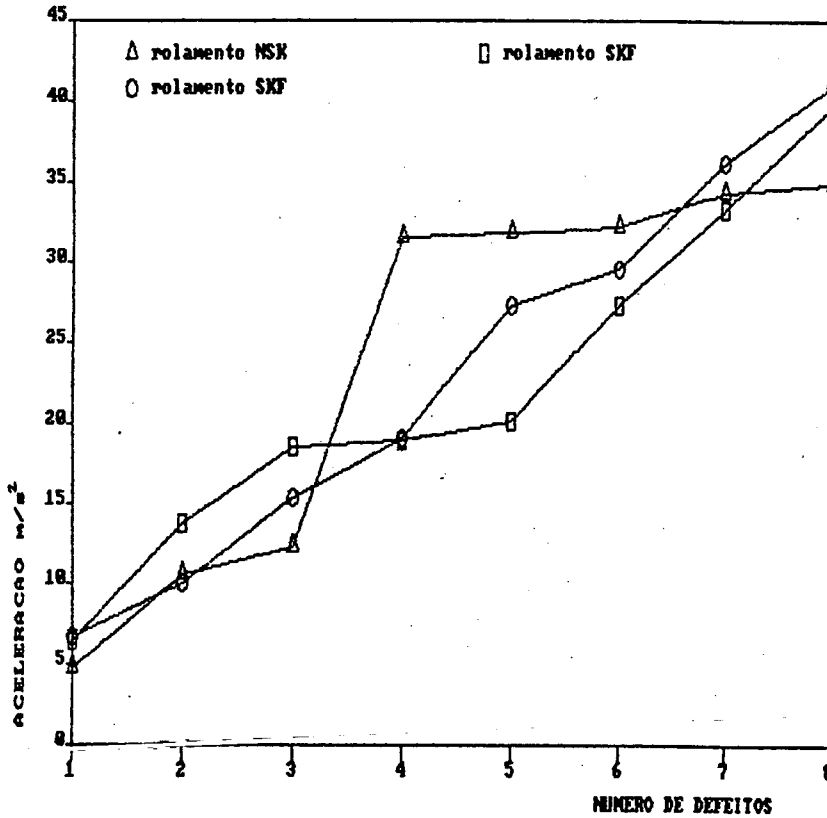


Figura 4.17 Curva referente a tabela da figura 4.16.

As curvas da figura 4.17 mostram que quanto maior o defeito no rolamento, aqui representado pelo número de riscos na pista estacionária, maior o valor da aceleração no mancal em estudo. O valor da frequência do defeito sempre foi o mesmo em cada rolamento testado, independente do número de riscos em seu interior.

4.3.3 Defeito tipo área

Neste tipo de defeito foram usados dois rolamentos NSK. As áreas dos defeitos não tinham uma forma constante, mas cada uma delas era um múltiplo da primeira, ou seja, as quatro áreas tinham entre si uma aproximada relação de proporcionalidade. A segunda falha era duas vezes a primeira, a terceira falha era tres vezes a primeira e a quarta falha era quatro vezes a primeira.

As figuras 4.18 e 4.19 mostram o espectro do envelope de uma área, em um dos rolamentos. A tabela da figura 4.20 e a curva da figura 4.21 mostram a variação da aceleração referente à variação da área de escavação.

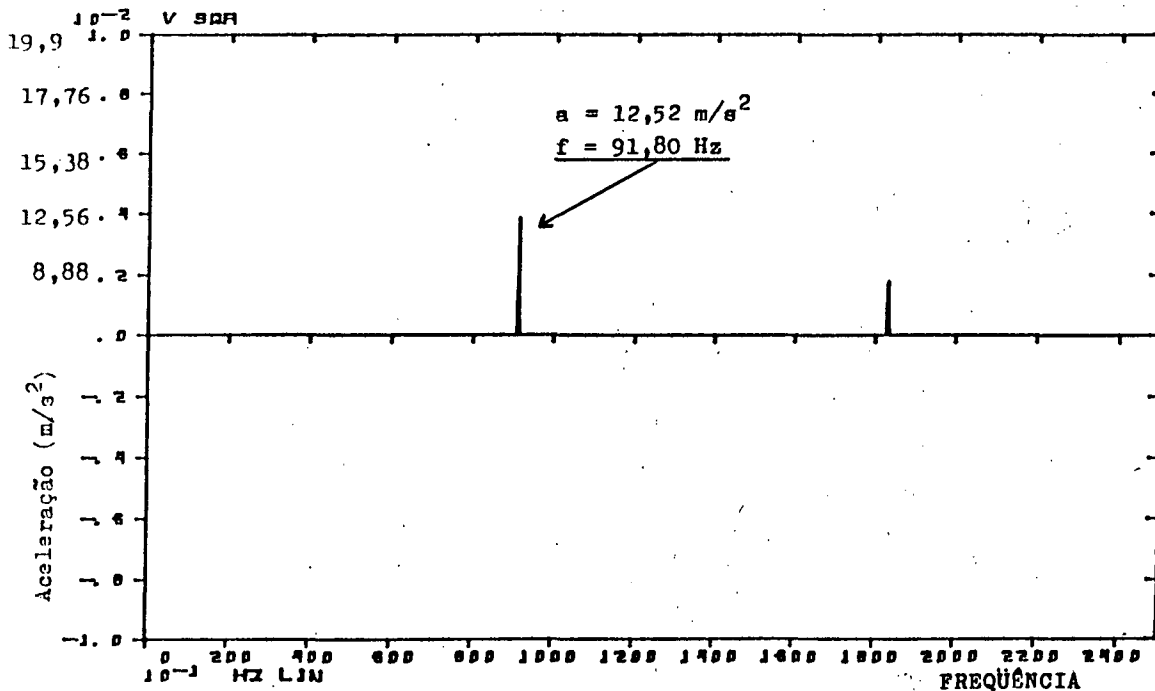


Figura 4.18 Espectro do envelope - forma polar - defeito tipo área
pista estacionária - rolamento NSK 11 - área 02

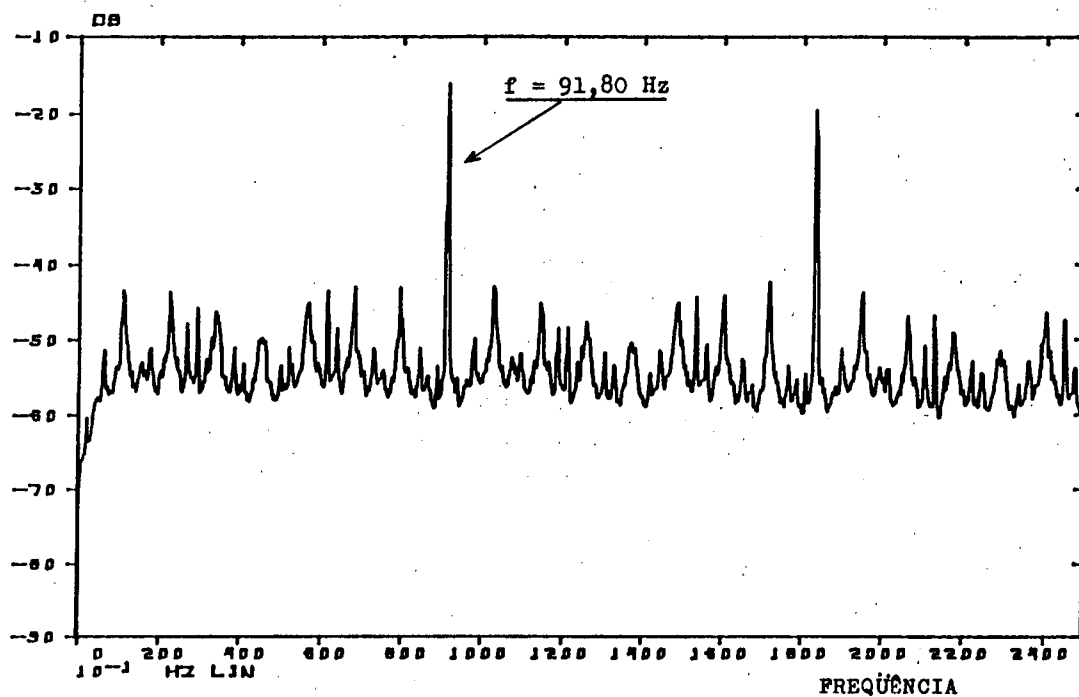


Figura 4.19 Espectro do envelope - logaritmo da figura 4.18.

Falha	Rolamento	Aceleração (m/s^2)
01	NSK	7,83
	NSK	8,94
02	NSK	9,54
	NSK	12,52
03	NSK	12,23
	NSK	14,71
04	NSK	13,37
	NSK	15,23

Figura 4.20 Tabela de valores de aceleração - defeito tipo área - pista estacionária - rolamento NSK.

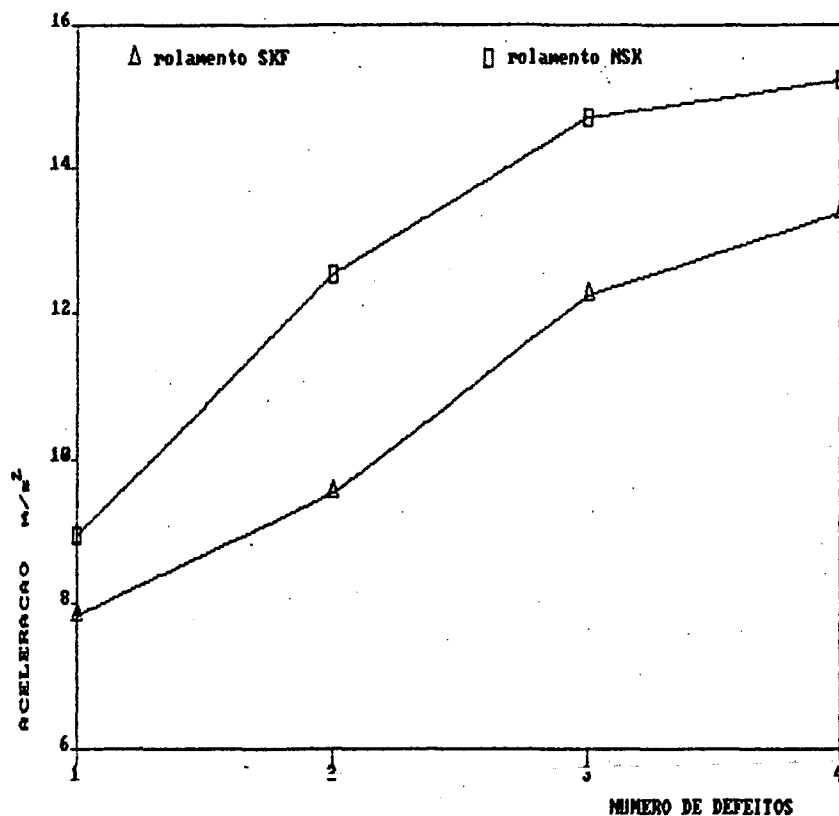


Figura 4.21 Curva correspondente a tabela da figura 4.20.

Nesta simulação, a medição foi feita inúmeras vezes, mostrando repetibilidade pois o resultado mostrava valores iguais em todos os testes, indicando mais uma vez que o método é seguro. A variação da aceleração é crescente nos dois rolamentos, como mostram as figuras 4.20 e 4.21. O valor da frequência também não se alterou em nenhum teste.

4.3.4 Defeitos causados por entrada de areia no interior do rolamento.

Danos causados por entrada de poeira, areia ou outro material sólido no interior de rolamentos, acontece quando a manipulação do mesmo em épocas de manutenção corretiva ou preventiva no equipamento onde o dito rolamento está localizado, não é feita de maneira adequada. O rolamento é depositado diretamente no chão, sem nenhuma proteção ou ainda o local onde é retirado o rolamento apresenta um nível muito alto de poluição granulométrica no ar, dando a oportunidade de entrada de poeira no interior do rolamento.

Esse defeito foi simulado através da inserção de grãos de areia diretamente no rolamento. As figuras 4.22 e 4.23 mostram os espectros correspondentes ao desgaste ocasionado no rolamento depois de 10 horas de rotação ininterrupta do eixo. Usou-se um (01) rolamento TR e um (01) rolamento NSK neste defeito simulado. A tabela da figura 4.24 e a curva da figura 4.25 mostram a variação da aceleração em relação ao tempo de rotação do eixo.

Esse tipo de defeito simulado tem uma característica muito especial. A primeira medição foi feita logo após a inserção da areia no interior do rolamento, e a amplitude da aceleração na frequência relativa ao defeito (tanto no rolamento NSK quanto no TR) era praticamente do mesmo nível que a frequência da rede (60 Hz), ou seja, a falha era incipiente. No espectro direto não se conseguia detectar essa frequência mas, no espectro do envelope pôde-se detectar facilmente. Após 10 horas de rotação ininterrupta, o defeito aumentou consideravelmente, assim como

também após 20 horas de trabalho sem interrupção, como mostra a tabela da figura 4.24. Mostrou-se então que a inclusão de partículas sólidas no interior de rolamentos geram defeitos que com o passar do tempo aumentam ocasionando, também, o aumento do ruído e podendo chegar até a quebra do rolamento.

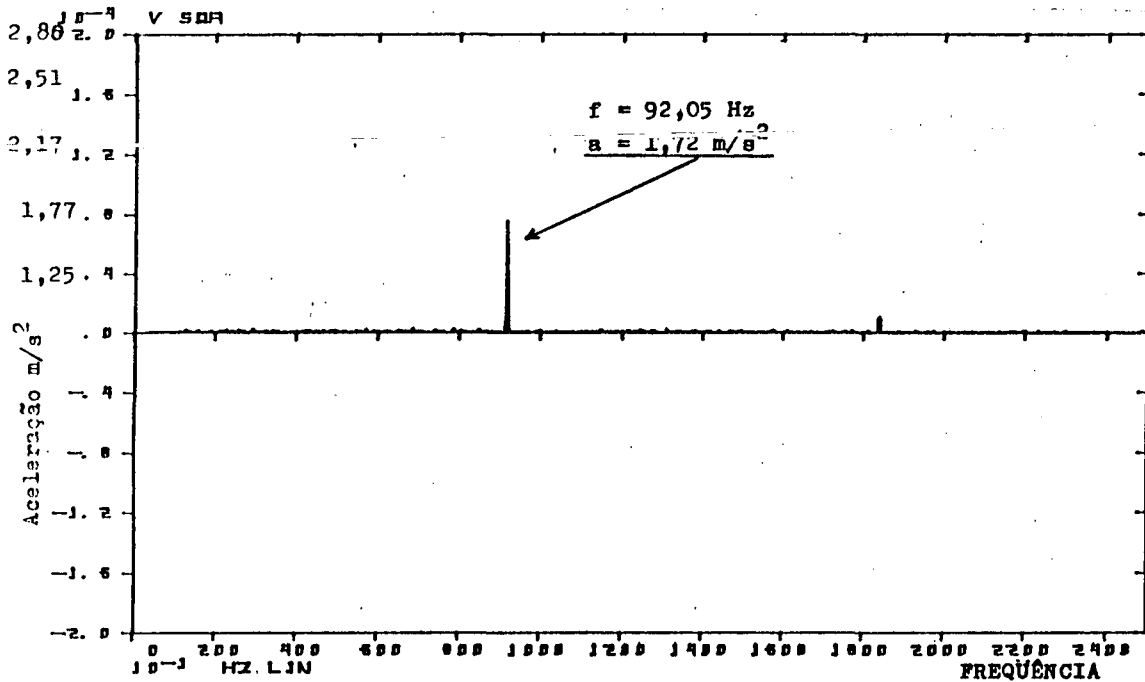


Figura 4.22 Espectro do envelope - forma polar - defeito tipo entrada de areia - pista estacionária - rol.NSK 14.

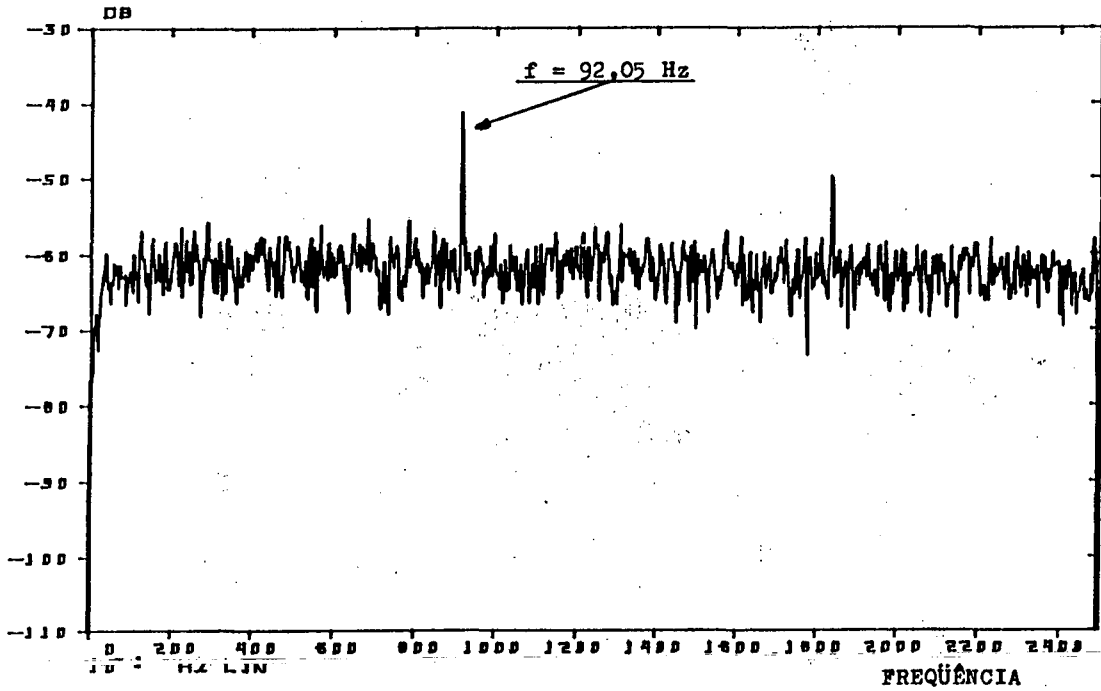


Figura 4.23 Espectro do envelope - logaritmo da figura 4.22.

Tempo	Rolamento	Aceleração (m/s^2)
0 h	NSK	0,89
	TR	1,12
10 h	NSK	1,24
	TR	1,37
20 h	NSK	1,72
	TR	1,92

Figura 4.24 Tabela de valores de aceleração - defeito tipo entrada de areia - rolamentos TR e NSK.

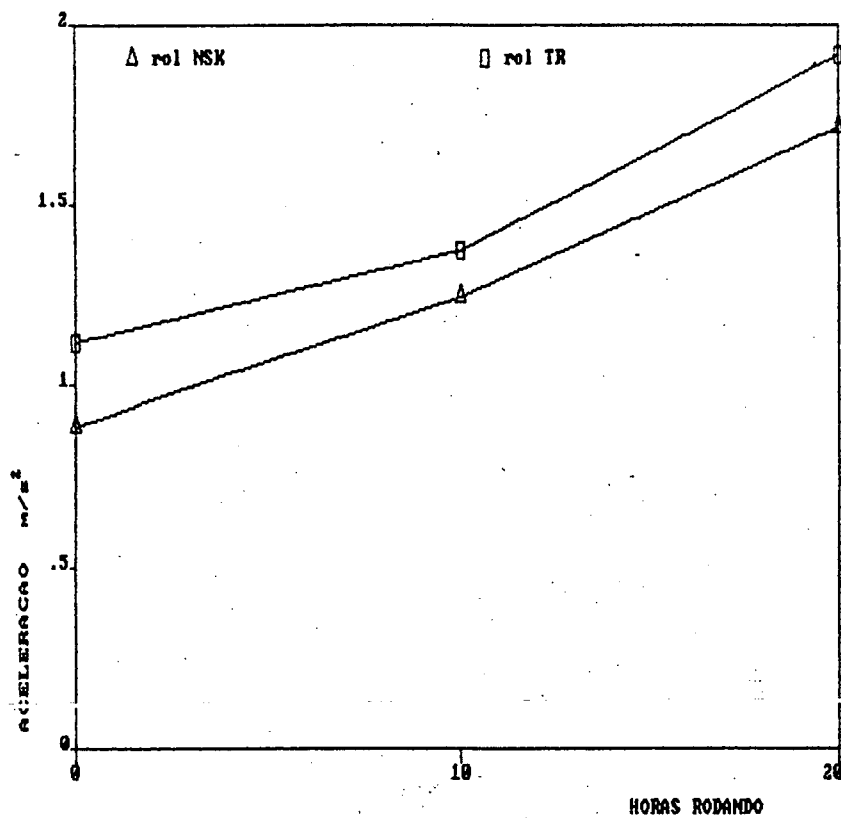


Figura 4.25 Curva referente a tabela da figura 4.24.

4.4 Defeitos nas pistas rodantes.

O defeito simulado nas pistas rodantes foi o tipo risco. Foram usados dois rolamentos NSK neste tipo de defeito. Os riscos foram feitos sequencialmente, seguindo a mesma separação das esferas entre si. Esses riscos, também, foram feitos transversalmente à pista de rolamento. O espectro do envelope da vibração causada em um dos rolamentos por um risco está mostrado nas figuras 4.26 e 4.27. As figuras 4.28 e 4.29 mostram, respectivamente, a tabela da variação da amplitude de vibração em relação ao número de riscos e a curva correspondente.

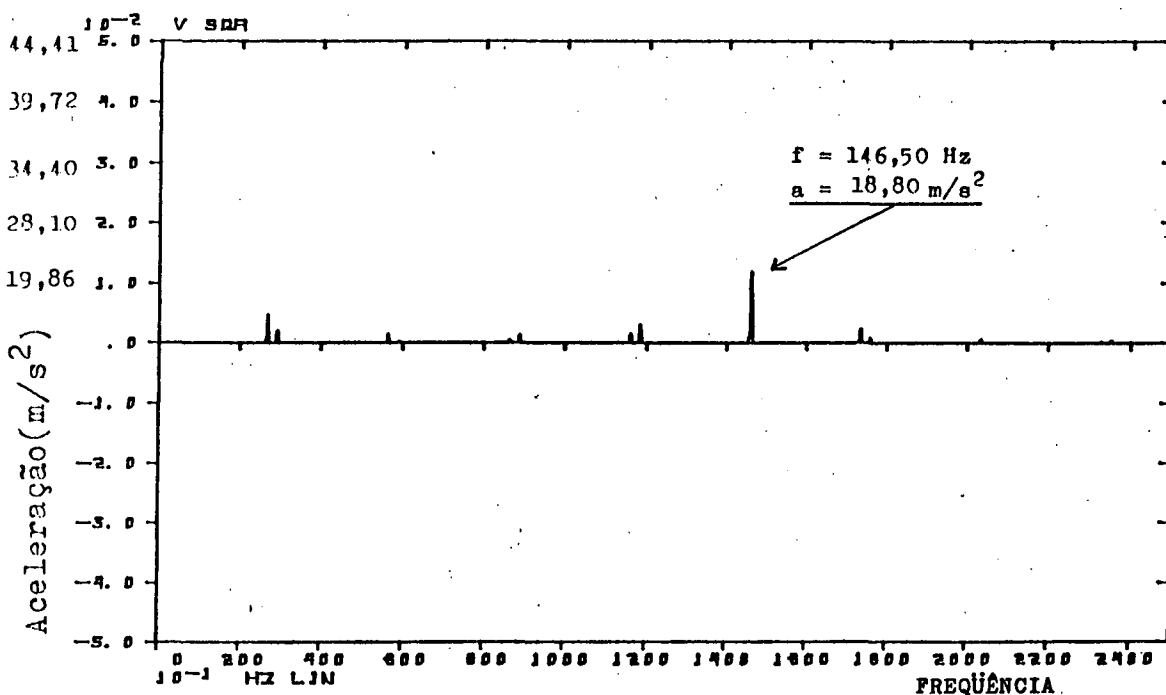


Figura 4.26 Espectro do envelope-forma polar - defeito tipo risco pista rodante - rolamento NSK 14 - 01 risco.

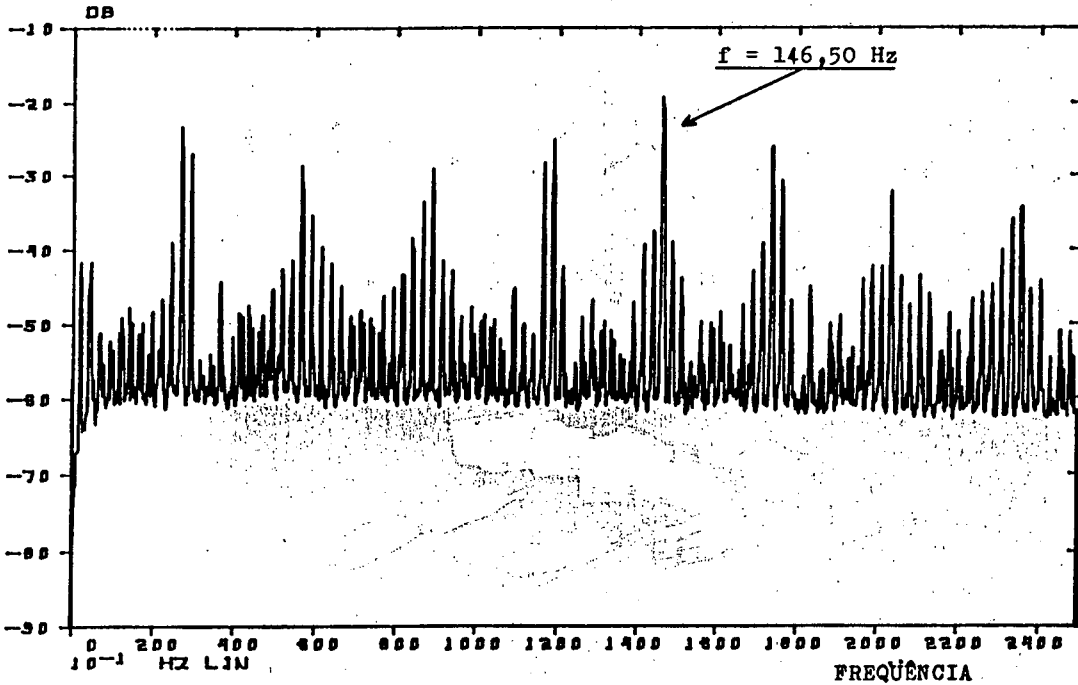


Figura 4.27 Espectro do envelope - logarítmo da figura 4.26.

Falha	Rolamento	Aceleração (m/s^2)	Falha	Rolamento	Aceleração (m/s^2)
01	NSK	18,80	05	NSK	32,02
	NSK	37,49		NSK	38,47
02	NSK	31,93	06	NSK	29,08
	NSK	36,60		NSK	42,89
03	NSK	33,16	07	NSK	33,50
	NSK	46,60		NSK	43,32
04	NSK	28,30	08	NSK	35,70
	NSK	42,17		NSK	45,12

Figura 4.28 Tabela da variação de amplitude de aceleração defeito tipo risco - pista rodante - rolamento NSK.

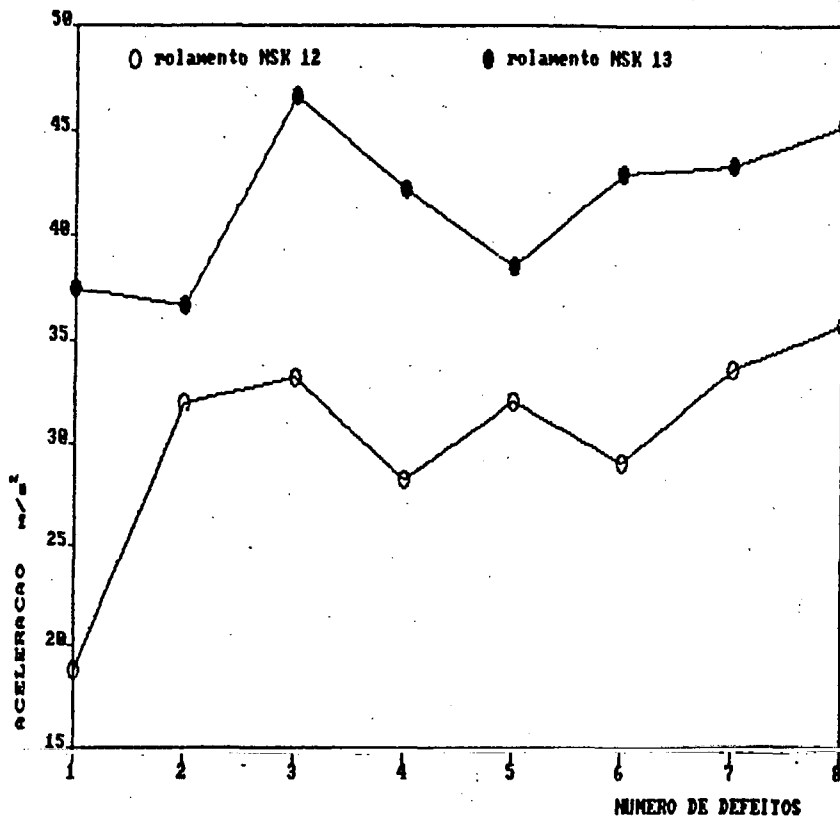


Figura 4.29 Curva referente a tabela da figura 4.28.

Esse tipo de defeito simulado só pôde ser diagnosticado através da técnica do envelope. No espectro direto não se consegue detectar a frequência relacionada ao defeito. Os valores das acelerações correspondentes aos oito (08) riscos, mostram que nem sempre a aceleração aumentava quando a quantidade de riscos aumentava. Isto acontece porque o sinal resultante desse tipo de defeito é modulado em amplitude, como já foi explicado no capítulo 3. O valor da frequência relativa ao defeito simulado não se alterou em todas as medições, mostrando boa repetibilidade.

4.5 Defeitos nas esferas

O tipo de defeito feito nas esferas foi o pontual. Nessa simulação, usou-se um rolamento TR e outro NSK. Os defeitos eram feitos um de cada vez em cada esfera para se poder medir a variação da amplitude de vibração do rolamento em relação a cada defeito feito em uma esfera. As figuras 4.30 e 4.31 mostram o espectro do envelope da vibração gerada pelo rolamento NSK com uma esfera defeituosa. Esse defeito era pontual. As figuras 4.32 e 4.33 mostram, respectivamente, a tabela de variação da amplitude em relação ao número de defeitos e a curva correspondente. O valor das frequências medidas em cada teste conservou-se constante, com o valor mostrado na figura 4.30.

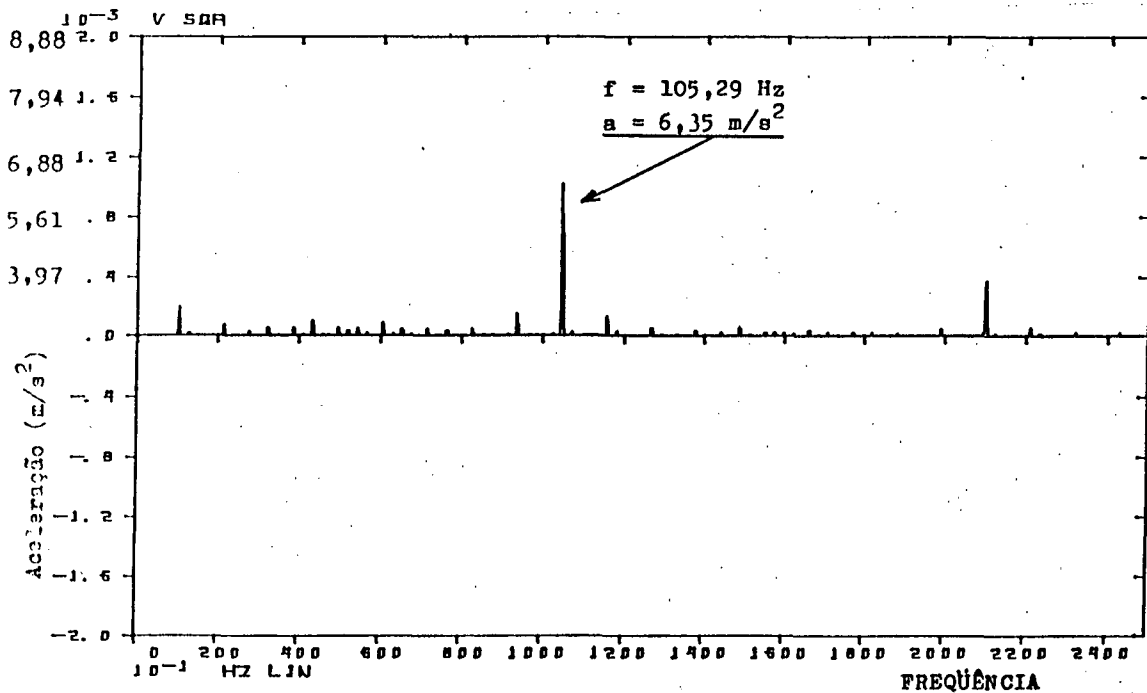


Figura 4.30 Espectro do envelope - forma polar - defeito tipo pontual - rol. NSK 16 - 01 esfera defeituosa.

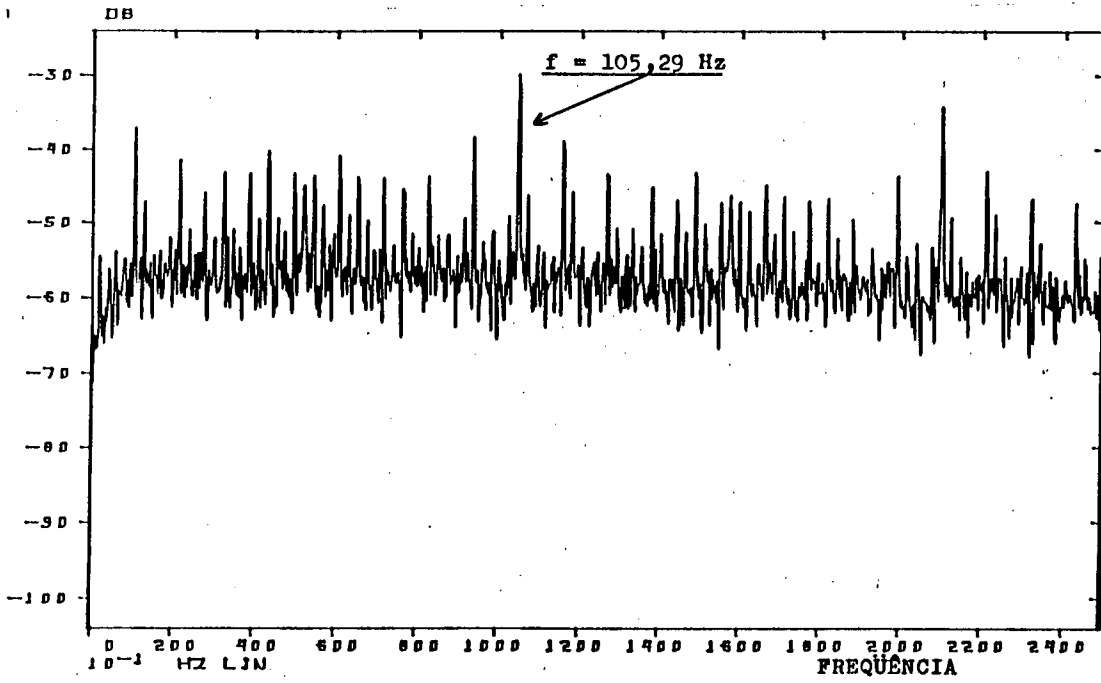


Figura 4.31 Espectro do envelope - log mag da figura 4.30.

Falha	Rolamento	Aceleração (m/s^2)	Falha	Rolamento	Aceleração (m/s^2)
01	TR	7,82	05	TR	14,52
	SKF	6,35		SKF	10,49
02	TR	10,44	06	TR	23,03
	SKF	8,50		SKF	15,36
03	TR	14,36	07	TR	17,35
	SKF	10,13		SKF	11,77
04	TR	10,94			
	SKF	9,21			

Figura 4.32 Tabela da variação da amplitude de aceleração - defeito tipo pontual - esferas - rol. TR e NSK.

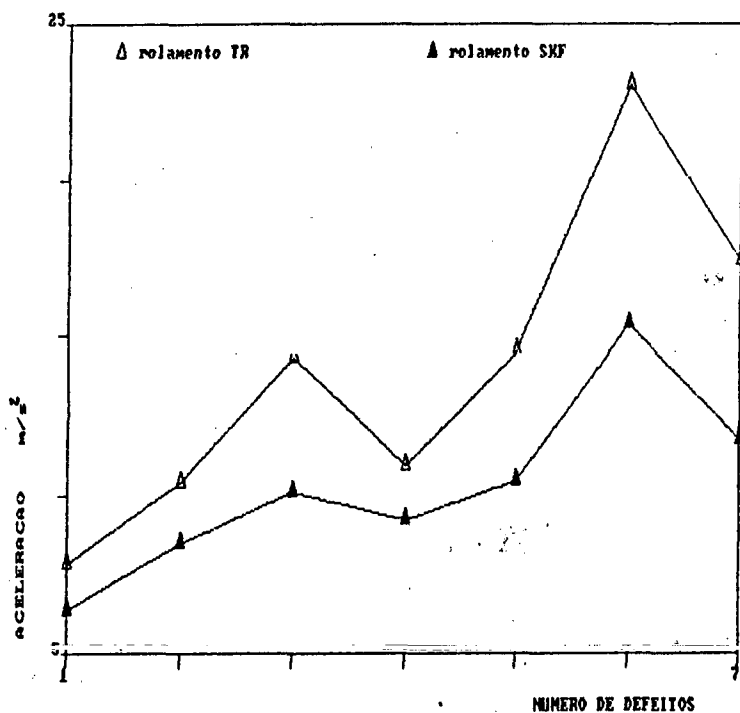


Figura 4.33 Curva referente a tabela da figura 4.32

Essa simulação mostra que a variação da aceleração do mancal com o aumento do número de defeitos nas esferas, nem sempre apresenta um aumento. Os defeitos em esferas são de difícil diagnóstico, mas, a técnica do envelope é sensível também nesses casos.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES

Neste capítulo serão apresentadas as principais conclusões pertinentes a este trabalho.

A técnica do envelope de vibrações para detecção e diagnose de falhas em rolamentos revelou-se muito poderosa, segura e de muita valia pois, mesmo sendo estudados os tipos de defeitos que normalmente nem sempre se consegue diagnosticar em rolamentos com outras técnicas como por exemplo defeitos nas pistas rodantes ou mesmo nas esferas, esses mesmos defeitos foram detectados com muita facilidade e nitidez e com um grau de aproximação muito grande (erro mínimo de 0,5% e erro máximo de 2%), podendo-se desprezar a diferença entre os valores de frequência calculados pelas fórmulas do capítulo 2 e os valores medidos.

As observações mais importantes sobre o uso dessa técnica são:

- 1) Esta é uma técnica de comparação por isso deve-se saber com antecedência como o sistema mancal/rolamento novo se comporta (que serve como dado de referência), ou seja, o método exige que se saiba as condições do rolamento, como por exemplo, qual o tipo do rolamento, suas dimensões, etc, para que se possa calcular, através das fórmulas do capítulo 2 as frequências relativas aos defeitos em questão e com isso, através desses dados e dos dados coletados pelas medições, fazer-se uma análise a fim de se checar se o rolamento está ou não com

defeito.

- 2) A inspeção ou medição no mancal deverá ser periódica para poder-se anotar as diferenças de nível de aceleração em relação ao nível inicial quando o rolamento era novo.
- 3) Quando os defeitos estão no começo ou seja quando o rolamento começa a apresentar algum defeito precoce, o uso da técnica mostra claramente onde o defeito está localizado e qual o nível de vibração que esse defeito está causando no mancal.
- 4) No caso de se analisar um rolamento muito avariado, ou seja, um rolamento em que o defeito está bastante desenvolvido, a técnica do envelope pode não conseguir detectar onde se localiza o defeito em si mas, como o nível de vibração aumenta muito, sabe-se que a avaria do rolamento já está num estado bastante avançado. Por exemplo, comparando os espectros das figuras 3.45 e 3.46, chega-se à conclusão que o aumento do pico da frequência relativa ao defeito no rolamento foi da ordem de 3000 vezes maior do que o rolamento ainda sem o defeito, a técnica é muito sensível a qualquer diferença de nível de vibração no sistema de medição.
- 5) Associações de defeitos como por exemplo: defeitos nas duas pistas ao mesmo tempo, defeito conjunto em uma das pistas de rolamento e nas esferas ou ainda nas esferas juntamente com a gaiola, etc, correm o risco de não se conseguir diagnosticar todos os defeitos do rolamento, porque o que gera maior impacto irá dominar o espectro de frequência fazendo com que se torne

um pouco mais difícil a detecção do outro defeito no rolamento em questão. Mas do ponto de vista prático, o defeito dominante é quem limitará a vida útil do rolamento.

6) O tipo de defeito mais fácil de se detectar é o que se localiza na pista estacionária. Esse tipo de defeito não é modulado em sua amplitude porque como a ranhura fica parada e somente as esferas ou roletes é que ficam passando por cima num mesmo espaço de tempo, a carga sobre o defeito é sempre a mesma. Com isso a sua amplitude é constante e o envelope desse tipo de sinal é mais claro. Isto acontece também porque a trajetória do ponto de medição até o ponto onde se localiza o defeito, é somente a espessura da pista externa mais a parte do mancal até o ponto de medição.

7) Defeitos em pistas rodantes sofrem modulação de amplitude porque a carga não é constante sobre o defeito em questão fazendo com que o envelope do sinal seja modulado ocasionando alguma dificuldade na obtenção do espectro.

8) Defeitos nas esferas são, ainda, mais difíceis de se diagnosticar porque as esferas não só rolam como também deslizam sobre as pistas, com movimentos não uniformes fazendo com que, de vez em quando, o defeito na esfera não toque nem na pista estacionária nem na pista rodante, o que implica dizer que o impacto do defeito em uma das pistas não acontece, tornando-se mais difícil a detecção desse tipo de defeito.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Stewart, R. M., Application of Signal Processing Techniques to Machinery Health Monitoring, Chapter 23 in Noise & Vibration (ed. R.G.White & J.G.Walker), Ellis Horwood Ltd., dist. Wiley, 1981.
- [2] Langley, R. S., On Various Definitions of the Envelope of a Randon Processes, Journal of Sound and Vibration (1986) 105(3), 503 - 512.
- [3] Courrech, J. and Gaudet, M., Envelope Analysis - the Key to Rolling-Element Bearing Diagnosis, Bruel and Kjaer Application Notes BO 0187-11.
- [4] Engia, H. and Lippe, J., Vibration Analysis used for Detection of Roller Bearing Failures, Norwegian Maritima Research, No.3, 1977, p.23 - 33.
- [5] Bruel & Kjaer, Detecting Faulty Rolling-Element Bearings, Application Notes (BO 0210-11).
- [6] Randall, R. B., Computer Aided Vibration Spectrum Trend Analysis for Condition Monitoring, Maintenance Management International, 5 (1985) , p.161 - 167.
- [7] Martins, L. G. and Gerges, Samir, N, Y., Comparison between Signal Analysis for Detecting Incipient Bearing Damage,

International Conference on Condition Monitoring, University College of Swamsea, England, 1984.

- [8] Randall, R. B., Machine Health Monitoring by Analysis Of Accelerometer-Derived Signals, Fase 84.
- [9] Martin, A., Vibration Monitoring of Machines, Bruel & Kjaer, Technical Review, No. 1, 1987.
- [10] Rice, S. O., Mathematical Analysis of Randon Noise, Selected Papers on Noise and Stochastic Processes (Editor N. Wax) New York. Dover, 1954.
- [11] Papoulis, A., Probability, Randon Variables, and Stochastic Processes, McGraw-Hill, Inc, 1965.
- [12] Crandall, S. H. and Mark, W. D., Randon Vibration in Mechanical Systems, Academic Press, New York, 1963.
- [13] Dugundgi, J., Envelopes and Pre-Envelopes of Real Wave Forms, Transactions on Information Theory IT-4, IRE, 1958.
- [14] Yang, J. N., Nonstationary Envelope Processes and First Excursion Probability, Journal of Structural Mechanics 1, 1972, p. 231-248.
- [15] Krenk, S., Madsen, H. O. and Madsen, P. H., Stationary and Transient Response Envelopes, Journal of Engineering Mechanics, 109, p.263-278.

- [16] SKF., Falhas de Rolamentos e suas Causas, Folheto Comercial, SKF , 1984.
- [17] Martins, L, G. Detecção de Falhas em Rolamentos pela Técnica da Curtose, Dissertação de Mestrado, 1985, UFSC.
- [18] Nepomuceno, L, X. Manutenção Preditiva em Instalações Industriais - Procedimentos Técnicos, Edgard Blücher Ltda, 1985.