



Pontifícia Universidade Católica do Paraná

**PAULO CEZAR BÜCHNER**

**ANÁLISE DE MANCAIS DE ROLAMENTOS ATRAVÉS  
DOS SINAIS DE VIBRAÇÕES, USANDO MÉTODO  
DA CURTOSE E DO ENVELOPE**

**MESTRADO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA  
PUCPR**

**PUCPR**

**CURITIBA  
2001**



PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**ANÁLISE DE MANCAIS DE ROLAMENTOS  
ATRAVÉS DOS SINAIS DE VIBRAÇÕES,  
USANDO MÉTODO DA CURTOSE E DO ENVELOPE**

**PAULO CEZAR BÜCHNER**

**CURITIBA  
2001**

**PAULO CEZAR BÜCHNER**

**ANÁLISE DE MANCAIS DE ROLAMENTOS  
ATRAVÉS DOS SINAIS DE VIBRAÇÕES,  
USANDO O MÉTODO DA CURTOSE E DO ENVELOPE**

**Dissertação apresentada como requisito à  
obtenção do grau de Mestre em Engenharia  
Mecânica, do Curso de pós-graduação em  
Engenharia Mecânica do Departamento de  
Engenharia Mecânica da PUC/PR.**

**Orientador: Prof. Dr. Nilson Barbieri.**

**CURITIBA  
2001**

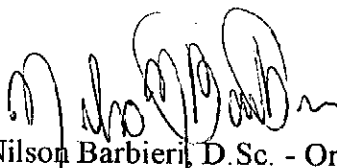
**TERMO DE APROVAÇÃO**

**PAULO CEZAR BÜCHNER**

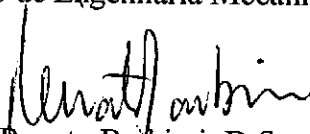
**ANÁLISE DE MANCAIS ROLAMENTOS  
ATRAVÉS DOS SINAIS DE VIBRAÇÕES,  
USANDO MÉTODO DA CURTOSE E DO ENVELOPE**

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, do Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

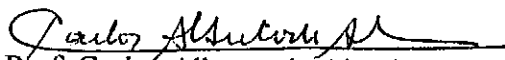
Presidente:



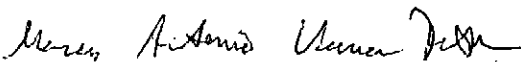
Prof. Nilson Barbieri, D.Sc. - Orientador  
Curso de Engenharia Mecânica, PUC/PR



Prof. Renato Barbieri, D.Sc. - Co-orientador  
Curso de Engenharia Mecânica, PUC/PR



Prof. Carlos Alberto de Almeida, PhD.  
Departamento de Engenharia Mecânica, PUC/RJ



Prof. Marcus Antônio Viana Duarte, D.Sc.  
Departamento de Engenharia Mecânica, UFU/MG

Curitiba, 28 de Junho de 2001

ATA DA SESSÃO PÚBLICA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO  
DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
DA PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ

DEFESA DE DISSERTAÇÃO Nº 02

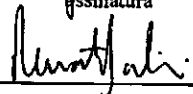
Aos 28 dias do mês de junho de 2001 realizou-se a sessão pública de defesa da dissertação “Análise de Mancais de Rolamentos através dos Sinais de Vibrações, usando método da Curtose e do Envelope”, apresentada por Paulo Cezar Büchner, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, perante uma Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Nilson Barbieri  
PUCPR (Presidente)

  
Assinatura

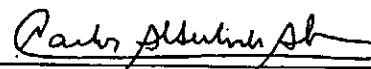
Aprovado  
parecer

Prof. Dr. Renato Barbieri  
PUCPR

  
Assinatura

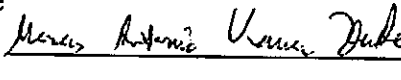
aprovado

Prof. Dr. Carlos Alberto de Almeida  
PUC- RJ

  
Assinatura

aprovado

Prof. Dr. Marcus Antonio Viana Duarte  
UFU - Uberlândia

  
Assinatura

aprovado

Conforme as normas regimentais do PPGE M e da PUCPR, o trabalho apresentado foi considerado Aprovado sem restrições (aprovado sem restrições, aprovado com exigências ou reprovado), segundo a avaliação da maioria dos membros da Banca Examinadora acima indicada.

Observações, exigências e/ou restrições da Banca Examinadora, quando houver:

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

continuar no verso, se necessário

  
Prof. João Elias Abdalla Filho  
Diretor  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica  
Pontifícia Universidade Católica do Paraná



## **AGRADECIMENTOS**

A todas as pessoas que direta ou indiretamente ajudaram na realização deste trabalho. Em especial ao professores Dr. Nilson Barbieri e Dr. Renato Barbieri, pelo essencial apoio, não só como orientadores mas como amigos. Ao professor Dr. João Elias Abdalla Filho, pelo apoio. As amigas Denise e Maristela, bibliotecárias, e a Jane, secretária do mestrado. Aos amigos do mestrado. A todos estes os meu sincero,

muito obrigado!

# DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente a Deus, por tudo que representa. A meus pais e irmãos. A Ana Cristine. A meu irmão Jorge Luiz Büchner, que sempre teve uma imensa paixão pela engenharia mecânica.

# SUMÁRIO

<b>Resumo</b> .....	<b>i</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>ii</b>
<b>Lista de Símbolos</b> .....	<b>iii</b>
<b>Lista de Figura</b> .....	<b>v</b>
<b>Lista de Tabelas</b> .....	<b>ix</b>

## **CAPÍTULO 1 - Introdução**

<b>Introdução</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Revisão Bibliográfica</b> .....	<b>5</b>
<b>1.2 Objetivos</b> .....	<b>18</b>
<b>1.3 Descrição do Trabalho</b> .....	<b>18</b>

## **CAPÍTULO 2 - Conceitos Básicos**

<b>Conceitos Básicos</b> .....	<b>21</b>
<b>2.1 Ciclo de Vida da Máquina</b> .....	<b>21</b>
<b>2.2 Freqüências Internas</b> .....	<b>23</b>
<b>2.3 Amortecimento</b> .....	<b>24</b>
<b>2.4 Impedância Mecânica</b> .....	<b>24</b>
<b>2.5 Isolamento</b> .....	<b>24</b>
<b>2.6 Velocidades</b> .....	<b>25</b>
<b>2.7 Rolamentos</b> .....	<b>25</b>
2.7.1 Movimentos Internos.....	26
2.7.2 Freqüências .....	31

<b>2.8 Análise de Vibrações.....</b>	<b>37</b>
2.8.1 Avaliação dos Níveis de Vibrações.....	37
2.8.2 Assinatura de um Rolamento.....	38
2.8.3 Modelo Matemático.....	38
2.8.4 Técnica do Envelope.....	41
2.8.5 Aliasing.....	45
<b>2.9 Método da Curtose.....</b>	<b>46</b>
<b>2.10 Outros Métodos de Avaliação.....</b>	<b>52</b>
2.10.1 Fator de Crista.....	52
2.10.2 Curva de Tendência.....	54
2.10.3 Cepstrum.....	55
2.10.4 Amostragem Síncrona no Tempo (AST).....	55
2.10.5 Análise Espectral de Corrente.....	55
2.10.6 Spike Energy, HFD e Shock Pulse (SPM).....	56
<b>2.11 Instrumentos de medição.....</b>	<b>56</b>
<b>2.12 Análise Automatizada.....</b>	<b>58</b>

## **CAPÍTULO 3 - Preparação da Bancada Experimental**

<b>3.1 Materiais.....</b>	<b>61</b>
<b>3.2 Métodos.....</b>	<b>62</b>
<b>3.3 Preparação do Experimento.....</b>	<b>65</b>
<b>3.4 Calibração do Sistema.....</b>	<b>66</b>

## **CAPÍTULO 4 - Resultados e Discussões**

<b>4.1 Análise do Espectro do Envelope.....</b>	<b>72</b>
---	-----------

<i>4.2 Investigação do Comportamento da Curtose.....</i>	<b>82</b>
<b>CAPÍTULO 5 - Conclusão</b>	
<i>5.1 Considerações finais.....</i>	<b>89</b>
<i>5.2 Proposição para novos trabalhos .....</i>	<b>90</b>
<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>91</b>
<b>ANEXO I.....</b>	<b>99</b>
<b>ANEXO II.....</b>	<b>103</b>

## RESUMO

A análise de vibrações é uma das ferramentas essenciais para a manutenção preditiva. Com o objetivo de evitar falhas catastróficas várias técnicas tem sido desenvolvidas, parte destas se concentram no monitoramento de sinais de vibração de rolamentos. Dentre estas técnicas e métodos destacam-se a Técnica do Envelope e o Método da Curtose. Para tratamento dos sinais são usados conceitos básicos sobre modulação, demodulação e estatística. Desenvolveu-se uma bancada experimental utilizando-se rolamentos autocompensadores. Nestes rolamentos foram inseridos artificialmente defeitos para simular uma condição de deterioração. Foram propostos novos índices baseados no coeficiente da curtose e no valor rms para acompanhamento do desenvolvimento dos defeitos. Os resultados mostram que a curtose do sinal filtrado e do envelope são os melhores índices de acompanhamento de falhas. Os parâmetros propostos se mostraram potencialmente interessantes pela sua sensibilidade sob as condições de variação de rotação e agravamento do defeito

# **ABSTRACT**

The analysis of vibration is an essential tool for predictive maintenance. Several techniques have been developed to avoid catastrophic failure. Some of them are based on vibration rolling element bearing signals vibration monitoring. The envelope technique and kurtosis method are the tools mostly employed tools for performing this task. For signals treatment, the basics concepts of demodulation, modulation and statistics have been used. A bench test has been built utilizing a spherical self aligning rolling element bearing. Artificial defects were applied to simulate a failure condition. The proposed parameters showed to be effective for being able to capture the physical phenomena under the condition of rotation variation and evolution of defects.

# LISTA DE SÍMBOLOS

$v$	velocidade tangencial [m/s];
$\omega$	velocidade angular [rad/s]
$d_p$	diâmetro primitivo[mm];
$\alpha$	ângulo de contato [°], ou fator de amortecimento, quando indicado;
$n$	rotação do eixo [rpm] ou n-ésimo incremento;
$\gamma$	variável auxiliar;
$i$	quando índice, refere-se a pista interna ou i-ésimo incremento;
$o$	quando índice, refere-se a pista externa;
$m$	quando índice, refere-se a média ou m-ésimo incremento;
$d$	diâmetro da esfera [mm] ou diâmetro interno do rolamento;
$e$	excentricidade, distância entre centros [mm];
$D_e$	diâmetro da esfera [mm];
BPMI	freqüência de passagem da pista interna [Hz];
BPFO	freqüência de passagem da pista externa [Hz];
BSF	freqüência de passagem da esfera [Hz];
FTF	freqüência fundamental da gaiola [Hz];
RPM	rotação do eixo em rpm [Hz];
$N_e$	número de esferas;
$t$	variável temporal;
$T$	período [s];
$U$	função representativa do degrau unitário;
$h$	função de resposta impulsiva do trajeto fonte de excitação ao sensor;
$f$	freqüência [Hz];
$A$	amplitude do sinal
$g$	sinal do comportamento estrutural quando cessado uma excitação;

$x$	função no domínio do tempo de um defeito no rolamento;
$y$	assinatura de um defeito em um rolamento;
$\mathfrak{F}$	operador da transformada de Fourier;
$\delta$	função degrau unitário ou delta de Dirac;
$\tau$	variável temporal;
$\bar{x}$	valor médio de uma função no tempo;
$P$	função probabilidade;
$E$	esperança matemática de uma amostra;
$\mu^4$	quarto momento de tendência central, curtose;
$\sigma$	desvio padrão;
$K$	coeficiente da curtose;
$p$	função distribuição;
$e$	constante;
$K_0$	curtose da assinatura;
$V$	variança;
$K_{rms}$	coeficiente da curtose normalizado pelo valor rms;
$K_n$	coeficiente da curtose normalizado pela variança;
$V_r$	variança do sinal;
$RMS$	valor rms de um sinal;
$RMS_0$	valor rms da assinatura;

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.	Curva de Falha Característica .....	22
Figura 2.2.	Espectro das frequências de um sistema .....	23
Figura 2.3.	Velocidades dos Elementos de um Rolamento .....	29
Figura 2.4.	Desenho esquemático do Rolamento Autocompensador de esfera.....	30
Figura 2.5.	Rolamento autocompensador de esferas .....	31
Figura 2.6.	Observação do Sinal no domínio do Tempo e no domínio da Frequência.....	32
Figura 2.7.	Rolamento Rígido de Esferas .....	36
Figura 2.8.	Frequências relacionadas aos defeitos .....	36
Figura 2.9.	Representação da equação (33). $T_k$ é o período de repetição do defeito .....	40
Figura 2.10.	Processo de Modulação.....	42
Figura 2.11.	Envelope de um sinal.....	42
Figura 2.12.	Detector analógico de envelope .....	43
Figura 2.13.	Esquema básico para obtenção do espectro do envelope.....	44
Figura 2.14.	Representação de um sinal senoidal.....	45
Figura 2.15.	Rugosidade das pistas.....	46
Figura 2.16.	Distribuição de alturas na região de contato entre duas superfícies.....	47
Figura 2.17.	Variação do Fator de Crista.....	52
Figura 2.18.	Comportamento do Fator de Crista no tempo .....	53
Figura 2.19.	Curva de tendência.....	54

Figura 2.20. Diagrama fluxo básico.....	60
Figura 3.1. Desenho esquemático da Bancada.....	63
Figura 3.2. Mancal SNH506.....	63
Figura 3.3. Sinal de calibração do acelerômetro 41.708. a) No Tempo, b) Na Freqüência.....	66
Figura 3.4. Sinal modulado(parte superior). Espectro(inferior).....	67
Figura 3.5. Modelo de filtro passabanda.....	68
Figura 3.6. Sinal modulado 1000Hzx100Hz(superior). Espectro do Envelope(inferior).....	68
Figura 3.7. Sinal 4kHz modulado por um sinal de 100Hz (parte superior).....	69
Figura 3.8. Sinal modulado de 4kHz, envelopado(parte superior). Espectro do Envelope(parte inferior).....	70
Figura 3.9. Freqüência de ressonância estrutural.....	71
Figura 4.1. Espectro do Sinal do rolamento sem defeito.....	73
Figura 4.2. Espectro do Envelope do rolamento sem defeito.....	73
Figura 4.3. Envelope do rolamento sem defeito.....	74
Figura 4.4. Espectro do envelope. Identificação da BPFO, defeito G1.....	74
Figura 4.5. Espectro do Envelope, identificado BPFO e uma composição, parte superior.....	75
Figura 4.6. Sinal no tempo e Espectro do rolamento com inserção do defeito, G3.....	75
Figura 4.7. Espectro do envelope, identificação da BPFO.....	76
Figura 4.8. Espectro do envelope. Identificação da BPFO, defeito G3.....	76
Figura 4.9. Sinal no domínio do tempo. Presença de defeito na BPFO, defeito G3.....	77

Figura 4.10. Espectro do envelope. Presença de defeito na BPFO, defeito G3 .....	77
Figura 4.11. Espectro do envelope. Identificação da BPFI, defeito G0 .....	78
Figura 4.12. Espectro do envelope. Identificação da BPFI, defeito G2 .....	79
Figura 4.13. Espectro o envelope. Identificação da BPFI, G2. ....	79
Figura 4.14. Espectro do envelope. Identificação da BPFI, defeito G3 .....	80
Figura 4.15. Espectro do envelope. Identificação da BPFI, defeito G3 .....	80
Figura 4.16. Espectro do envelope. Identificação da BPFI, defeito G3 .....	81
Figura 4.17. Espectro do envelope. Identificação da BPFI, defeito G3 .....	81
Figura 4.18. Espectro do envelope. Identificação da BPFI, defeito G3 .....	82
Figura 4.19. Curtose do rolamento sem defeito.....	83
Figura 4.20. Curtose do rolamento com grau G1. Defeito superficial .....	83
Figura 4.21. Curtose do rolamento com grau G2. Defeito um pouco mais profundo.....	84
Figura 4.22. Curtose do rolamento com grau G3. Defeito profundo.....	84
Figura 4.23. Variação da Curtose a 1000rpm. Variação do Defeito. ....	85
Figura 4.24. Variação da Curtose a 1500rpm. Variação do Defeito.....	85
Figura 4.25. Variação da Curtose. Rotação fixa em 1705rpm. ....	86
Figura 4.26. Curtose do rolamento. Rotação fixa em 2000rpm. ....	86
Figura 4.27. Variação da Curtose a 2500rpm. Variação do Defeito.....	87
Figura 4.28. Variação da Curtose a 3000rpm. Variação do Defeito.....	87

Figura A.1.	Foto da Bancada .....	103
Figura A.2.	Foto da Bancada. Vista Superior.....	103
Figura A.3.	Sacador de Rolamentos SKF.....	104
Figura A.4.	Torquímetro K-DTOOLS, mod. 2957W4335 .....	104
Figura A.5.	Inversor de Frequências WEG, mod. CFW-07 com dispositivo paraajuste manual dos parâmetros.....	104
Figura A.6.	Martelo de Impacto PCB, mod. 086C20-10635 .....	105
Figura A.7.	Calibrador PCB, mod. 394C06 Held Hand.....	105
Figura A.8.	Tacômetro digital, mod. 1726-AMETEK.....	106

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores das freqüências de passagem de cada componente do rolamento[Hz]. .....	70
Tab. A-1. Variação da Curtose aplicada ao Sinal filtrado e no Sinal do Envelope, conforme o aumento do defeito 1000rpm .....	94
Tab. A-2. Variação da Curtose aplicada ao Sinal filtrado e no Sinal do Envelope, conforme o aumento do defeito 1500rpm .....	94
Tab. A-3. Variação da Curtose aplicada ao Sinal filtrado e no Sinal do Envelope, conforme o aumento do defeito 1705rpm .....	94
Tab. A-4. Variação da Curtose aplicada ao Sinal filtrado e no Sinal do Envelope, conforme o aumento do defeito 2000rpm .....	95
Tab. A-5. Variação da Curtose aplicada ao Sinal filtrado e no Sinal do Envelope, conforme o aumento do defeito 2500rpm .....	95
Tab. A-6. Variação da Curtose aplicada ao Sinal filtrado e no Sinal do Envelope, conforme o aumento do defeito 3000rpm .....	95
Tab. A-7. Variação da Curtose para a Assinatura - G0 .....	96
Tab. A-8. Variação da Curtose para defeito grau 1 - G1 .....	96

**Tab. A-9. Variação da Curtose para defeito grau 2 - G2 ..... 96**

**Tab. A-10. Variação da Curtose para defeito grau 3 – G3 ..... 97**

# CAPÍTULO 1

## Introdução

A crescente necessidade de otimizar e aperfeiçoar os processos, reduzir custos e melhorar a qualidade, portanto, aumentar a competitividade dos produtos, obrigou as empresas a investir em novas tecnologias e em novos processos, que é a única maneira de sobreviver em um mercado cada vez mais competitivo (Monk, 1972).

Um dos fatores que impedem o alcance destes objetivos é a manutenção. A imprevisibilidade de quando um equipamento possa necessitar ser reparado, por uma quebra, por um desgaste ou por um mau funcionamento, diminui a confiabilidade em um processo de fabricação.

Com esta situação, a manutenção passa a ser considerada essencial em todo o processo produtivo, e conseqüentemente para a própria empresa. Sistemas da qualidade são usados como ferramentas para fazer um controle e acompanhamento rigoroso dos processos visando a melhoria constante da manutenção (Mirshawka, 1991 e Nunes, 1997). Devido a sua importância, o setor de manutenção tem recebido investimentos em pesquisas, o que incentivou o desenvolvimento de novos equipamentos e novas técnicas.

A manutenção possui algumas variações no que diz respeito a sua forma de aplicação. Ela pode ser feita para fazer uma correção, para prevenir uma eventual quebra ou mau funcionamento de um equipamento ou sistema e para investigar e estimar a probabilidade de uma possível falha.

Estas modalidades de intervenção são bem distintas e são classificadas como: Manutenção Corretiva, Manutenção Preventiva e Manutenção Preditiva (MP), também conhecida como manutenção por condição (Pozzi, 1991 e Antonioli, 1999).

Dentre estas três, a corretiva é a mais intuitiva e “primitiva”. Ela é aplicada após a falha ou a quebra, somente no momento em que o equipamento apresenta sinais de mau funcionamento, o que normalmente faz com que ele entre em colapso ou pare.

A Manutenção Preventiva está baseada em eventos. Assim como a corretiva, o seu objetivo é recolocar a máquina novamente em operação. Para que isto seja possível, este modelo requer um inventário de peças, além da necessidade de se manter um pessoal especializado sempre disponível para intervenções de emergências. Paradas para manutenções corretivas são gravíssimas para a linha de produção e acabam gerando certos inconvenientes além dos atrasos e, muitas vezes a intervenção acaba por inserir novos problemas devido a má montagem dos equipamentos. A mobilização de mão-de-obra e a necessidade de se manter um estoque de peças elevado, são outros inconvenientes gerados, a fim de suprir todas os tipos de ocorrências (Santos, 1996).

Com este tipo de estratégia de manutenção, Manutenção Preventiva, utiliza-se fundamentalmente dados estatísticos aliados com a experiência. E uma das formas de aumentar a confiança é através da diminuição dos intervalos entre reparos e na conservação de um estoque de peças sobressalentes, o que acarreta um aumento considerável nos custos de produção (Pozzi, 1991; Nunes, 1997 e Antonioli, 1999).

Com esta estratégia, há um aumento relativo da confiabilidade na linha de produção. No entanto é insuficiente, pois não se tem um acompanhamento baseado em dados técnicos, que determinem as verdadeiras condições das máquinas. Alguns fatos indesejáveis são gerados, tais como a necessidade de parar a máquina, substituir peças ainda em boas condições de uso e a introdução de defeitos devido a montagem.

Com o objetivo de superar estas dificuldades, estão sendo empregadas outras técnicas de análise. A Manutenção Preditiva foi concebida como uma das técnicas que

permite a redução dos custos e possibilita o aumento da confiabilidade das linhas de produção. Assim, para cumprir tal tarefa, ela foi idealizada baseando-se em dados do próprio equipamento, portanto relatando da melhor forma possível, as verdadeiras condições da máquina(Wowk,1991).

Os primeiros sinais da utilização da Manutenção Preditiva ou Manutenção por Condição, tem registros de mais de cem anos atrás. Desde aqueles tempos já se tentava diagnosticar falhas através dos sinais de vibração, embora muito rusticamente. Utilizava-se como transdutores chaves de fendas, pedaços de madeira ou as próprias mãos, os quais eram apoiados sobre a superfície e, nestes objetos encostava-se o ouvido. Através da sensibilidade, tentava-se diagnosticar as condições da máquina.

Meios científicos foram aplicados com o surgimento da transformada de Fourier, a qual transforma o sinal no domínio do tempo para um sinal no domínio da frequência. Porém a utilização eficiente foi feita somente nas décadas de 60 e 70(Wowk,1991).

Atualmente com a era digital, e conseqüentemente com a evolução de novos equipamentos e transdutores, viabilizou-se o tratamento de um volume de dados maior, tornando assim, os diagnósticos mais precisos.

O conceito de Manutenção Preditiva parte do pressuposto de que toda máquina produz vibrações, pois não há um processo de fabricação que consiga produzir componentes perfeitos(Harris,1991;Wowk,1991 e Mitchell,1993)

Atualmente a Manutenção Preditiva é uma estratégia que vem sendo muito divulgada e sua utilização vem sendo amplamente disseminada, pelo fato de se mostrar mais eficiente, pois está fundamentada em dados técnicos e no fato de que todas as máquinas necessitam de manutenção. A preocupação é, quando e em que momento é mais conveniente intervir (Charlotte,1993; Wowk,1991 e Mitchell,1993). Com os resultados obtidos, há a possibilidade de planejar uma parada, programando as peças e mobilizando a mão-de-obra para realizar os serviços. Uma das vantagens mais

interessantes é o fato do monitoramento poder ser feito com o equipamento em funcionamento.

Os resultados alcançados com a manutenção preditiva são a diminuição do inventário de peças em estoque, ou seja, menor o capital imobilizado, prolongamento da vida em serviço dos componentes, e diminuição do desperdício de peças. Há um aumento efetivo na confiabilidade da linha de produção, devido a redução dos tempos de paradas.

Quando há um grande número de máquinas, as vezes se torna impossível fazer um monitoramento detalhado em cada uma delas. Neste caso, deve-se determinar quais máquinas são vitais para o processo produtivo, e nestas a análise deve ser mais refinada.

A estratégia de atuação da Manutenção Preditiva se concentra na observação de alguns tipos bem definidos de medições e análises(Wowk,1991 e Antonioli,1999), por exemplo:

Sinais de Vibrações e Ruídos;

Termografia;

Alinhamento Óptico;

Desgaste;

Qualidade do Lubrificante;

Emissão Acústica;

Medidas Elétricas;

Os equipamentos, onde são feitas as análises com mais detalhes, são escolhidos e classificados pela importância à produção. Normalmente são classificados de mais vitais a menos importantes. Outros aspectos para esta avaliação são as características da máquina, ou seja, seu tamanho, sua localização e as peças necessárias, quanto sua disponibilidade no momento em que for requisitada, se as peças necessitam ser importadas ou são de difícil aquisição. O tipo de mão-de-obra empregada para execução do serviço também é parâmetro de classificação.

A manutenção tem desempenhado um papel fundamental dentro das empresas, pois é através da preocupação com este setor que elas vem buscando a redução de custos com a produção. Tenta-se cada vez mais evitar paradas inesperadas, o que incorre muitas vezes em tempo desperdiçado, resultando em multas por atraso. Além disto, a parada pode criar riscos de acidentes. Os resultados com a otimização da manutenção sobre os custos de produção apresentam resultados rápidos devido a diminuição dos inventários com peças, geralmente caras, as quais não se tem previsão de quando ou mesmo se haverá realmente necessidade de utilizá-las, e que implicam em um capital parado razoável(Mirshawka,1991).

## 1.1 Revisão Bibliográfica

Ruffini (1963), afirma que rolamentos são transmissores e geradores de vibrações. Seja através do ar ou da própria estrutura. Rolamentos deslizando podem atenuar ruídos. Para atender as exigências dos padrões de níveis de ruídos, há a necessidade do conhecimento de vibrações e ruídos. Há ainda a prática da tentativa e erro para definir um rolamento mais silencioso, e que produza o mínimo de vibrações possível. O autor apresenta uma formulação matemática para determinar as frequências de ruídos em rolamentos e faz considerações sobre o pré-carregamento necessário para ajustar um rolamento para que produza menos ruído. Afirma que os rolamentos radiais de uma carreira de esfera, ou um par de rolamentos de contato angular produzem o menor ruído. Neste trabalho é feito ainda considerações sobre a geometria interna e o tratamento térmico, os quais tem influência direta na produção de ruídos.

Botó (1971), comenta que paradas por falhas em rolamentos são anti-econômicas, e para evitar esta situação, muitas vezes estes são substituídos ainda em bom estado. Para tentar otimizar a utilização dos rolamentos, há a necessidade de um

meio de monitoração. Vários métodos tem sido testados. As falhas em rolamentos produzem choques, os quais excitam as várias frequências. Neste trabalho, o autor utiliza o método de pulso de choque, como método de monitoramento. Quando um defeito entra em contato com outra superfície, este sendo provocado por fadiga ou por lascamento, ele produz um choque mecânico. Este choque se assemelha ao impacto de um martelo sobre a estrutura. Quando uma falha se apresenta, normalmente será sobre as pistas e nos elementos rolantes, esferas ou rolos.

Monk (1972), apresenta em seu trabalho uma análise sobre a detecção de defeitos através dos sinais de vibrações. Afirma que esta prática apresenta um potencial considerável para a indústria. Esta afirmação esta baseada no fato de que forças como desbalanceamento, defeitos em rolamentos, desalinhamento, produzem forças reativas nos mancais, as quais podem ser monitoradas nestes pontos. Através de dados coletados dos sinais de vibrações, é possível diagnosticar o estado do equipamento. Dependendo das condições deste, o nível global de vibração é alterado. Evita-se com este tipo de monitoramento, tirar a máquina da linha de produção, em um momento inadequado. Com isto é possível reduzir os custos, pois consegue-se fazer um planejamento de manutenção. A técnica de análise de assinatura no espectro de banda estreita é um meio efetivo de monitoramento de falhas incipientes, pois estas afetam a frequência de passagem de pás, elementos rolantes e dentes de engrenagens.

Braun e Datner (1979) fazem uma análise sobre o desenvolvimento de falhas em rolamentos através dos sinais de vibrações. Em seu trabalho, os autores utilizam-se de alguns modelos teóricos, que descrevem os sinais emitidos, causados por uma falha. Propõe-se a análise de vibrações como uma forma de ensaio não destrutivo, que além das vantagens evidentes, possibilita a previsão do surgimento de alguma falha. Assim, viabilizando o planejamento, com considerável antecedência, da manutenção do equipamento. Dentre os equacionamentos desenvolvidos, estão as fórmulas para cálculo das frequências relativas a cada defeito. Estes normalmente se apresentam devido a fadiga, sujeira, correntes elétricas, corrosão, pré-carregamentos excessivos,

vibrações, montagens incorretas, altas temperaturas e outros. Utilizam-se da análise espectral como forma de reduzir os dados de vibrações. Algumas considerações são feitas sobre os efeitos provocados pelos sistemas com muitas ressonâncias, mostrando que estas podem provocar o obscurecimento do espectro.

Taylor (1980), faz uma análise espectral em rolamentos, para detecção de defeitos. A dimensão destes defeitos pode ser determinada empiricamente, dentro de certos limites. Estes defeitos se apresentam como sinais repetidos no espectro. Os cinco tipos de defeitos, os quais normalmente se apresentam em rolamentos são, na pista interna, pista externa, elementos rolantes, gaiola e devido a própria rotação do eixo. As frequências características destes defeitos, podem aparecer compostas no espectro, na forma de soma ou subtração uma das outras. O autor constata que os defeitos normalmente se manifestam inicialmente nas pistas, em seguida nos rolos e por último na gaiola.

McFadden e Smith (1983), constataram que os defeitos agem como impactos sobre a estrutura, excitando as várias ressonâncias. Estas se manifestam nos mancais, sendo conveniente portanto, posicionar os transdutores sobre os mesmos, para fazer o monitoramento.

McFadden e Smith (1984a), comentam que há várias técnicas para o monitoramento de falhas incipientes em mancais de elementos rolantes, como Curtose, Fator de Crista, Envelope, Pulso de Choque, e a Técnica de Ressonância em Altas Frequências (HFRT). Esta última é uma das melhores técnicas para monitoramento de vibrações em caixas de engrenagens e turbomáquinas, devido a sua capacidade de separar a vibração gerada por um rolamento de outras fontes de vibração da máquina. Os autores apresentam os conceitos básicos para aplicação desta técnica, a qual segundo eles, esta centrada no fato de que, cada vez que um defeito, em um rolamento entra em contato com outra superfície, é gerado um impulso de vibração. Este impulso é extremamente rápido, de curtíssima duração, e sua energia é transmitida numa faixa larga de frequências com baixo nível de vibração. Assim, sua análise no espectro

direto é encoberta por outras fontes. No entanto, o impacto excita as ressonâncias no sistema, em altas frequências, que modificam a energia do sistema. Estas ressonâncias seriam, a vibração dos elementos rolantes, entre as pistas interna e externa, a vibração das próprias pistas, a vibração dos mancais e a vibração estrutural da máquina. As ressonâncias são moduladas em amplitude, com a característica das frequências dos defeitos. Estas por sua vez dependem da localização e podem ser determinadas através de equações específicas. Tais equações são aproximações, podendo apresentar distorções nos resultados, pois fatores como deslizamento não são considerados nas mesmas. Estas distorções podem chegar a 50%. Não existe uma única ressonância, na qual possa se basear para aplicação do método. Há a necessidade de determinar a condição empiricamente, para a detecção do envelope.

McFadden e Smith (1984b), fazem a análise de um modelo para a vibração produzida por um único defeito em uma pista de um rolamento. Este modelo simula o comportamento de um único defeito, sendo que quando este entra em contato com uma superfície produz um impacto. A medida em que há a rotação do eixo, haverá a repetição destes impulsos, com a frequência correspondendo ao local onde se encontra tal defeito. Os autores aplicam um filtro passa banda, para eliminar boa parte das vibrações provindas de outras fontes. Isto possibilita a análise do rolamento em uma máquina mais complexa. O sinal depois de filtrado é demodulado por um detector de envelope e então obtido o espectro deste sinal. Através deste procedimento é possível detectar um defeito no rolamento. Este procedimento é a base da técnica de ressonância em altas frequências. Algumas vezes referenciada como análise de ressonância demodulada, ou análise de envelope da densidade do espectro de potência.

McFadden e Smith (1985), ampliam o estudo feito em trabalho anterior (McFadden e Smith, 1984) para um sistema com vários defeitos. A análise é feita através da técnica de ressonância em altas frequências, sob carregamento axial. As frequências são independentes da posição onde se encontram, porém o ângulo de fase, dos componentes, está relacionado com estas posições. Pelo fato deste ângulo de fase

se alterar, há situações onde componentes se cancelam e se somam, modificando o espectro. As componentes relacionadas as frequências de passagem dos elementos, são necessariamente as maiores em cada grupo.

Martins (1985), faz um estudo sobre o método da curtose e análise espectral para análise de vibrações em rolamentos, diagnóstico e avaliação. Apresenta um modelo simplificado para o modelo de um rolamento danificado. Os resultados alcançados em seus experimentos mostraram limitações no método da curtose. Para contornar isto são propostos dois novos parâmetros que melhoraram a eficiência do método. É feita uma modelagem para o tratamento espectral. O autor afirma que um rolamento em boas condições deverá possuir curtose menor ou igual a 3.

Nunes (1989), apresenta um estudo sobre análise de sinais de vibrações aplicadas à manutenção preditiva, analisando os sinais de vibrações geradas por rolamento. A pesquisa é desenvolvida sobre mancais de elementos rolantes, para os quais são desenvolvidas fórmulas para determinação das frequências de cada elemento que constitui um rolamento. Tais frequências são relacionadas aos defeitos. Estes por sua vez, produzem uma série de impactos, que excitam várias ressonâncias, portanto aumentando o nível de vibração. O trabalho mostra que existem dificuldades na análise do espectro direto, em baixas frequências, devido a influência de outros componentes da máquina. Para solucionar este problema o autor utiliza-se da técnica do envelope para eliminar o problema com mascaramento. É feita uma modelagem matemática para simular os sinais dos defeitos e a resposta impulsiva provocada por estes utilizando-se a técnica do envelope.

White (1991), utiliza a demodulação como ferramenta para manutenção preditiva. Utiliza esta técnica para superar a dificuldade encontrada de extrair informações do espectro direto, principalmente referentes a defeitos em estágio inicial de desenvolvimento. O conceito de modulação se apresenta como uma solução para este tipo de dificuldade praticamente eliminando as influências de outras fontes. O processo de modulação é definida como sendo a multiplicação de um sinal por outro.

Este processo é não linear, e resulta em um outro sinal com novas frequências. Estas novas frequências são chamadas de bandas laterais. Em outras palavras, um sinal de alta frequência é modulado por um de baixa frequência, o primeiro conhecido como portadora e o segundo como moduladora. Este conceito é o mesmo aplicado em rádios AM. O processo de modulação sempre gera bandas laterais no espectro. Havendo a presença de bandas laterais haverá o processo de modulação. Um defeito produz um choque (curta duração), que excita as várias ressonâncias. Neste sentido, estas ressonâncias fazem o papel do sinal portador e o choque, devido ao defeito, o papel do modulador.

Feldman (1993), apresenta um estudo sobre vibrações livres não lineares, usando a transformada de Hilbert. Um grande número de processos pode ser convertido pela transformada de Hilbert, para uma nova função, chamada de envelope e fase instantânea. O autor utiliza este equacionamento na análise de vibrações livres não lineares, fazendo o levantamento dos parâmetros naturais do sistema como a frequência natural, fator de amortecimento, e as dependências dos mesmos sobre amplitude e frequência de vibração.

Feldman (1994), faz uma análise de vibração forçada em sistemas não lineares. O autor utiliza o equacionamento de Hilbert, para levantar os parâmetros naturais do sistema. Conclui o autor que a transformada de Hilbert é uma ferramenta poderosa para a análise de vibrações.

Fackrell et al.(1994), fazem uma análise biespectral do sinal de vibrações. Os autores afirmam ser a Técnica de Análise do Biespectro, uma poderosa ferramenta para o monitoramento de máquinas rotativas. O emprego desta técnica supre a necessidade onde a análise linear é deficiente. O espectro de potência fornece informações de segunda ordem, isto é, energia e variância do sinal. O biespectro fornece informações de terceira ordem, tais como o coeficiente de Skewness. A Bicoerência é a normalização do Biespectro. Este método é invariante com as transformações lineares, o que facilita a medição de sinais.

Mechefske (1994), faz um estudo sobre detecção de falhas e diagnóstico em rolamentos de máquinas de baixa velocidade, utilizando o método de classificação por inferência indutiva. Os espectros de um rolamento são classificados, segundo seu estado de conservação. Com base na análise destes espectros, quando comparados com o espectro de assinatura, pode-se caracterizar o estágio de falha do mesmo.

Logan e Mathew (1995), estudam a correlação na análise de falhas em máquinas rotativas. Os autores fazem uma abordagem sobre o comportamento caótico dos sinais adquiridos no domínio do tempo. Conceitos básicos sobre a teoria do caos são apresentados, os quais servem de base para quantificar a dimensão da correlação. Os resultados alcançados mostram que a correlação é potencialmente útil para o monitoramento de máquinas, principalmente em análise de falhas em rolamentos. Para comprovar esta afirmação, são apresentados resultados obtidos em experimentos com rolamentos autocompensadores, nos quais foram inseridos defeitos. Os resultados aparecem na forma de gráfico de cores, definido como Dimensão Fractal versus Tipo de falha, onde as cores mais escuras definem o tipo de defeito do rolamento, se na pista interna, pista externa, elementos rolantes ou gaiolas. Esta técnica está em fase de estudos, mas com base nos resultados obtidos, os autores afirmam que esta técnica possui um futuro promissor, na predição da degradação de rolamentos.

Baille e Mathew(1995), fazem um estudo sobre a utilização da técnica de modelos autoregressivos, para diagnosticar falhas em rolamentos. Esta técnica utiliza menores comprimentos de sinais quando comparados aos métodos convencionais de análise. Os resultados deste tipo de tratamento de sinais mostram ser uma opção alternativa no diagnóstico de falhas em rolamentos, onde a quantidade de dados é limitada. Esta condição normalmente é encontrada em máquinas de baixa velocidade ou de velocidade variável, onde o comprimento do sinal é extremamente pequeno. Dentro deste conceito, os autores utilizam a técnica de redes neurais.

Logan e Mathew(1996), citam que o uso da dimensão da correlação aplicada a mancais de elementos rolantes tem ganho cada vez mais notoriedade, no entanto,

verificam os autores que existem poucas investigações empíricas a cerca dos parâmetros envolvidos. Os autores constataam a necessidade da simplificação de alguns destes parâmetros, devido ao tempo necessário para o tratamento computacional dos dados.

Rantall e Me (1996), fazem um estudo do efeito do mascaramento na análise digital do envelope, do sinal de falha em rolamentos. Esta é uma análise quantitativa, onde os sinais dos defeitos são mascarados por sinais estranhos no resultado da análise do envelope. Eles mostram que o sinal de modulação corresponde ao sinal de falha, e recomendam a aplicação de um filtro passa banda para diminuir os efeitos de fontes estranhas. Com o processo de digitalização dos dados, o envelope é obtido através do equacionamento de Hilbert. A principal vantagem deste método, sobre o processamento digital, é que um efetivo filtro passa banda é também um filtro anti-aliasing, num analisador FFT. Esta técnica apresenta grande potencial no diagnóstico de falhas em rolamentos, pois produzem o efeito do mascaramento.

Vargas e Bistafa (1996), afirmam em seu trabalho, que a técnica do envelope e a utilização de intensidade sonora para detecção de falhas em rolamentos são ferramentas muito difundidas e discutidas no momento. Os conceitos de modulação e demodulação são utilizados para extração do envelope. A justificativa para utilização de tais técnicas esta baseada em situações onde existem dificuldades em extrair informações do espectro direto. Nos casos, por exemplo, de detecção de defeitos em rolamentos. O sinal produzido por estes, freqüentemente tem baixa relação sinal/ruído o que causa mascaramento por outras fontes. Portanto, a técnica mostra-se conveniente para eliminação destes problemas, além de apresentar pontencialidade como transmissor de informações.

Wang e Kootsookos (1997), aplicam a autocorrelação do envelope como ferramenta para detectar e diagnosticar falhas em máquinas de baixa rotação. Através do estabelecimento de um modelo teórico para as falhas em rolamentos, os autores empregam o método de autocorrelação para obtenção de um padrão, que é comparado

com resultados obtidos experimentalmente. Os resultados alcançados são bastante satisfatórios.

Shiroishi et al.(1997), fazem um estudo sobre os métodos de detecção de defeitos em mancais de elementos rolantes, através dos sinais em alta frequência e emissão acústica. Os autores fizeram um comparativo entre o valor de pico, curtose e fator de crista. Dois tipos de sensores foram comparados, o acelerômetro e o microfone. Os resultados encontrados mostram que o microfone é mais sensível em defeitos na pista externa, já o acelerômetro mostrou-se igual ou superior sensibilidade, tanto para a pista externa quanto para pista interna. Nos experimentos, segundo os autores, a razão de pico mostrou ser um indicador mais realista para detecção da presença de defeitos entre os métodos testados. Apresentando boa correlação de dimensão do defeito obedecendo a uma relação linear. Sendo esta técnica recomendada par detecção e localização de defeitos.

Pachaud (1997), afirma ser necessário, em sistemas onde forças impulsivas, causadas por defeitos, induzem as várias ressonâncias, utilizar ferramentas como fator de crista e a curtose para caracterizar e identificar tais problemas no sinal. O valor rms indica somente a energia do sinal e não sua forma, portanto, não indicando a origem da excitação. O fator de crista e a curtose, por outro lado, são muito utilizados para o monitoramento de máquinas rotativas, no entanto, segundo o autor, não são empregadas corretamente. Um modelo simples é apresentado, com o qual é demonstrado as limitações deste dois métodos. O estudo se estende a uma análise comparativa, onde a curtose mostra-se mais sensível a rotação do que o fator de crista, e mais sensível a impulsos periódicos. A curtose é um indicador mais sensível do que o fator de crista, para a detecção de forças de excitação periódicas, causadas por defeitos. Este indicador é portanto, extremamente sensível a ruídos, o que implica na necessidade de se fazer um tratamento do sinal (filtro passa banda e detecção do envelope são essenciais).

Antoniolli(1999) faz um estudo comparativo das diversas técnicas de medição e análise dos sinais de vibrações, emitidos por rolamentos. Neste trabalho o autor afirma ser os sinais de vibrações, o melhor parâmetro para o monitoramento, e avaliação das condições dinâmicas de máquinas rotativas. Estuda-se as técnicas para implantação da manutenção preditiva, voltada à análise de vibrações, através das técnicas de análise mais comuns: nível global de vibrações, curtose, cepstrum, fator de crista e a técnica do envelope. O rolamento é ponto crítico e o maior causador de paradas. Em seu trabalho propõe-se uma maneira de calibração para a técnica do envelope, e verificação da sensibilidade entre os resultados obtidos com a técnica do fator de crista, análise espectral e envelope. O autor introduz a forma analógica e digital de detecção do envelope.

Jones (1999), apresenta uma análise sobre vibrações, a qual afirma ser útil na detecção de falhas em componentes, para o monitoramento de máquinas. Quando algum rolamento apresenta defeito, normalmente a atitude é a de substituir este rolamento. Falhas em rolamento, normalmente são sinais de algum problema na máquina. A análise de vibrações pode ajudar no controle destas falhas, e evitar paradas. Atualmente os dispositivos (os transdutores) usados para o monitoramento são portáteis ou permanentes. Este último tipo, não necessita de mão-de-obra tão especializada para operá-lo, e fornecem resultados precisos. Isto porque o período de leituras é muito menor. Para interpretação dos resultados, é necessário conhecer as frequências relacionadas aos defeitos. Um pico em uma harmônica é sinal que existem problemas. Há pelo menos quatro frequências elementares, as quais correspondem a cada um dos elementos do rolamento. Elas são a BPFI(Ball Pass Frequency Inner Race), frequência de passagem da pista interna, BPFO(Ball Pass Frequency Outer Race), frequência de passagem da pista externa, BSF (Ball Spin Frequency), frequência da esfera, e FTF(Fundamental Train Frequency), frequência de passagem da gaiola. O autor afirma que quando um defeito entra em contato com outra superfície, este contato gera um impulso. No acompanhamento dos níveis de vibrações

o método FFT(Fast Fourier Transform) é muito usado. A frequência dá indícios sobre a fonte de vibrações, enquanto que a amplitude indica a severidade. As medições em velocidade para o acompanhamento de vibrações são mais utilizadas no monitoramento de desalinhamento e desbalanceamento. Já o envelope de aceleração, monitora as baixas amplitudes, porém em altas frequências, como defeitos em rolamentos.

Li et al. (1999), fazem um estudo sobre formas de prever o tempo remanescente de vida de máquinas antes da falha, com o objetivo de otimização da manutenção. Como os modelos determinísticos são inadequados para representar a natureza da propagação dos defeitos, é proposto então um modelo estocástico. Os resultados alcançados mostraram que o método é potencialmente útil para melhorar a previsibilidade do tempo remanescente, reduzindo drasticamente o nível de incertezas, relacionadas a determinação deste tempo.

Barclay e Wei(1994), afirma ser a técnica do envelope, para diagnóstico de mancais de elementos girantes, uma abordagem incorreta. Pelo fato de não haver consistência teórica, por ignorar os fatores como a diferença de dureza dinâmica entre os vários tipos de mancais, as quais afetam a transferência de energia através da estrutura. Os autores afirmam serem estes fatores fundamentais para uma avaliação científica. Para justificar esta posição apresentam alguns problemas que ocorre com a técnica. Primeiro, os autores se apóiam em alguns relatos sobre dificuldades na obtenção de resultados, no quesito repetitividade. Segundo, o posicionamento dos transdutores quase sempre não é o mesmo, assim como outros ajustes não são os mesmos a cada leitura. Terceiro, afirmam que uma medida direta é sempre preferível a uma indireta, como é o caso do envelope de vibração.

Courrech(2000), em seu artigo publicado na revista *Manutenção y Qualidade*, esclarece algumas polêmicas criadas em torno da técnica do envelope. O autor após uma detalhada explicação, onde compara o espectro direto em banda estreita e o espectro do envelope, mostra a dificuldade em se detectar sinais de defeitos no

primeiro caso, os quais estão bem explícitos no último, ou seja no envelope. Há pelo menos quatro enfoques sobre a análise do envelope, primeiro onde se faz uma seleção em torno da ressonância estrutural em altas frequências. Segundo, ao contrário da primeira a seleção se dá fora da ressonância estrutural na faixa mais plana do espectro. A terceira, se aplica uma análise ampla, sem ser seletiva. A última, diz que a análise de envelope não funciona. O autor conclui afirmando que toda boa ferramenta deve ser utilizada apropriadamente, como é o caso da Técnica do Envelope. Assim, com base nos vários estudos já realizados sobre este assunto e em sua experiência, o autor afirma que a técnica é eficiente para diagnosticar e avaliar as condições de mancal de elementos girantes.

Brie (1999), faz um modelamento para o sinal de vibrações de lascamento em rolamentos, propondo duas aproximações: a primeira, onde as características no domínio da frequência, com relação a distribuição do carregamento é observada, e a segunda, onde os parâmetros do sistema(massa, mola e amortecedor) sofrem uma variação linear. Os espectros são obtidos com base nos sinais de vibrações, através de acelerômetro, e nos sinais sonoros, através de microfone.

Li et al.(2000), propõe um modelo para o monitoramento de rolamentos,. É utilizada uma metodologia para determinar o tempo de vida remanescente de um rolamento, na qual os sinais de vibrações são utilizados para avaliar a severidade do defeito. Um algoritmo foi desenvolvido para o tratamento mais refinado dos parâmetros (vibrações, propagação e outros), o qual possibilita monitorar a taxa instantânea de propagação dos defeitos, e assim, o comportamento dos mesmos. Através dos dados é possível obter uma maior precisão na determinação do tempo de vida remanescente dos rolamentos.

Piñeyro et al. (2000), apresentam em seu trabalho três modelos de análise espectral, os quais tem por objetivo detectar e diagnosticar defeitos localizados. Os métodos de análise são a análise de densidade do espectro de segunda ordem, a qual segundo os autores, é uma poderosa ferramenta na detecção de picos e auxílio na

análise clássica do espectro linear. A segunda técnica utilizada neste trabalho é o biespectro, o qual é aplicado na análise de detecção de pares picos em fase quadrática, e devido a sua propriedade de terceira ordem é capaz, segundo os autores, de eliminar o ruído de fundo. A outra técnica empregada neste trabalho é a utilização da transformada de Haar. Com a aplicação desta técnica é possível detectar os impactos gerados no início do desenvolvimento do defeito. Segundo os resultados alcançados pelos autores, estas técnicas são ferramentas que podem auxiliar na resolução de problemas de falhas em rolamentos. Elas permitem a redução de ruídos e de outras componentes de banda larga, retendo sinais harmônicos praticamente puros, em especial aqueles referentes a falhas nos componentes de rolamentos.

Parker et al. (2000), afirma ser a análise de vibrações e emissão sonora os dois parâmetros principais para o monitoramento de componentes de máquinas rotativas. Os autores fazem um estudo sobre a influência do defeito no domínio do bi-espectro. O bi-espectro é uma técnica estatística de terceira ordem, a qual ajuda a identificar pares de componentes espectrais relacionadas por fase, cuja utilidade se aplica a detecção e isolamento de falhas. Os autores apresentam os resultados obtidos na análise do bi-espectro na caixa de transmissão de dois helicópteros. Os resultados demonstraram a viabilidade do método, por reduzir influências de outras fontes de vibração que não são do ponto desejado, além de se manter invariável com a mudança do regime do equipamento, tais como a variação do torque.

Ho e Randall (2000), fazem um modelamento para análise de falhas em rolamentos como uma série de respostas impulsivas de um sistema com um grau de liberdade. O sinal de falha modelado foi utilizado para verificar a eficiência do sistema Auto-adaptativo de cancelamento de ruído em conjunto com a técnica do envelope. Os autores apresentam esta técnica como uma forma de reduzir os efeitos do mascaramento no sinal de envelope, ainda remanescentes. O método para obtenção do envelope é através da transformada de Hilbert. Os autores investigam através da

simulação digital as falhas em rolamentos, incluindo o fenômeno da flutuação randômica.

## **1.2 Objetivos**

Este trabalho tem por objetivo fazer um estudo sobre a aplicação da Técnica do Envelope e sobre a aplicação do Método da Curtose, em sinais de vibrações de rolamentos. Para a geração de dados e obtenção dos resultados foi elaborada uma rotina computacional utilizando o software MatLab, o que possibilitou automatizar e agilizar a obtenção dos resultados. Os sinais utilizados (vibrações) são obtidos através de defeitos introduzidos em mancais de rolamento autocompensadores.

## **1.3 Descrição do Trabalho**

Este trabalho em seus primeiros tópicos aborda a importância da manutenção para as empresas. Dentro deste contexto, a manutenção preditiva vem tomando destaque e se apresenta como essencial no combate ao desperdício e prima pela diminuição de custos. É feita a revisão bibliográfica, onde estão resumidas as obras consultadas, e que deram apoio teórico na elaboração deste trabalho. Em seguida são apresentados os objetivos.

No capítulo Conceitos Básicos, são introduzidos os tópicos necessários ao entendimento da Técnica do Envelope e o Método da Curtose. São apresentados os conceitos dos fatores que influem na vida de um equipamento desde o minério de ferro até a sua substituição da linha de produção. Dentro deste assunto são tratados os parâmetros elementares como as inúmeras frequências geradas dentro da máquina, características de amortecimento, impedância mecânica, isolamento, velocidades e tratamento de um dos elementos fundamentais das máquinas, o rolamento. Sendo que

para este elemento são estudados os movimentos internos e as frequências geradas na pista interna, pista externa, gaiola e elementos rolantes. São mostrados ainda, conceitos de vibrações em máquinas, onde são apresentados os tipos de avaliação dos níveis de vibrações, o conceito de assinatura de um rolamento e formulações matemáticas inerentes ao entendimento do fenômeno do surgimento de defeitos e seu desenvolvimento. Trata-se ainda da Técnica do envelope, onde são apresentados os passos para obtenção do mesmo e justificativa de sua utilização. Introduce-se o conceito de aliasing, porque este fenômeno ocorre e como evitá-lo. No item 2.9, Método da Curtose, inicialmente são apresentados conceitos estatísticos básicos necessários à sua compreensão, deduções e justificativa para que um rolamento em boas condições tenha o coeficiente menor ou igual a 3. O item 2.10, faz uma apresentação rápida das técnicas e métodos de avaliação bastante difundidos, como Fator de Crista, Curva de Tendência.

No item 2.11 é feita a apresentação dos instrumentos de medição de vibrações mais utilizados, como transdutores de deslocamento, velocidade, aceleração e o analisador de frequências.

O item 2.12, Análise automatizada, é apresentado o software desenvolvido para o tratamento dos dados. São mostrados: sua funcionalidade e versatilidade, e como os resultados são gerados.

No capítulo 3 são apresentados os materiais utilizados, a preparação da bancada de teste, a calibração dos transdutores e do sistema de medição, e os métodos para a execução do experimento.

As análises e discussões dos resultados são apresentadas no capítulo 4, que é subdividido em dois subtópicos. O primeiro, item 4.1, trata da Técnica do Envelope, onde são aplicados os conceitos e procedimentos para obtenção do envelope de um rolamento novo e com alguns defeitos inseridos na pista interna e pista externa. Em seguida, no item 4.2, é aplicado o Método da Curtose, onde são feitas as verificações propostas, ou seja, o comportamento dos coeficientes  $K_{global}$ ,  $K_{xf}$ ,  $K_{ll}$ ,  $K_{hl}$  e  $K_{rms}$ .

No capítulo 5, são feitas as conclusões sobre os resultados obtidos e propostas para futuros trabalhos.

O anexo I traz as tabelas com os resultados obtidos pelo Método da Curtose. As fotos da bancada de ensaio e os instrumentos de medição são mostrados no anexo II.

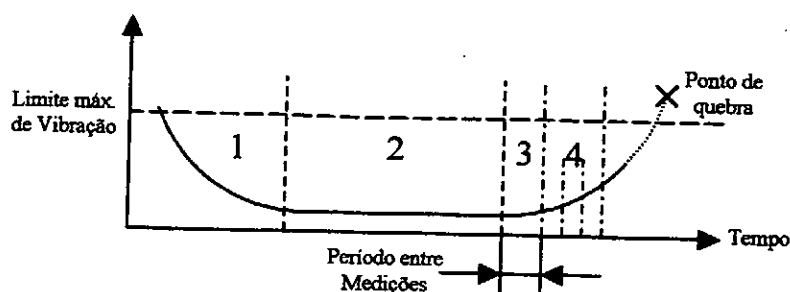
## **CAPÍTULO 2**

### **Conceitos Básicos**

#### **2.1 Ciclo de Vida da Máquina**

A vida de um equipamento é influenciada em todos os passos, desde o momento da extração do minério de ferro até o momento em que é retirada de uso. Isto porque, desde o processo de extração tensões internas são introduzidas. Durante o processo de fundição e posteriormente resfriamento, ao longo do processo de usinagem, montagem, armazenamento, transporte, instalação até o uso efetivo, a máquina está constantemente exposta a agentes causadores de defeitos. Por exemplo, defeitos podem ser introduzidos durante o armazenamento, caso haja alguma fonte de vibração, podendo danificar os mancais do equipamento armazenado. O transporte e a instalação são outros momentos críticos, onde normalmente defeitos são inseridos.

“Se uma máquina funcionar por 30 minutos sem problemas e sua temperatura estiver estabilizada, então há uma probabilidade de 50% de que ela sobreviverá até a maturidade”(Wowk,1991). O comportamento de um equipamento, quando desenhada a curva Falha versus Tempo, se assemelha a uma banheira, como representado na Fig. (2.1).



*Figura 2.1. Curva de falha característica.*

No início de operação há uma fase crítica, pois o equipamento está exposto a muitas fontes que podem causar danos, isto é exemplificado na fase 1 da Fig. (2.1). Após esta fase inicial 1, há um período relativamente longo de estabilidade, a fase 2, obviamente se não houver nenhuma anormalidade, pois a máquina não está mais tão passível a influência dos principais agentes causadores de falhas (Wowk, 1991, Charlotte, 1993 e Jones, 1999). Em seguida, os níveis de vibrações tornam a se elevar, devido ao processo de fadiga dos componentes, ou mesmo na introdução de algum defeito, causando uma elevação na curva. Isto exige que os períodos entre medições diminuam. Desenhando-se a continuidade da curva com os dados, verifica-se o formato exemplificado entre os pontos 3 e 4. Conforme a inclinação da curva se torna cada vez mais ascendente, os períodos entre medições necessitam ser cada vez mais diminuídos. Em um dado momento, a quantidade de dados destas medições torna-se suficiente para projetar a continuação desta curva. Portanto, consegue-se ter uma perspectiva acerca de quando a máquina superará o nível limite de vibração, e quando provavelmente ocorrerá a pane ou a quebra.

A vida de uma máquina está diretamente relacionada ao desgaste e falhas de seus componentes. O acompanhamento do desgaste e falhas destes é feito através de certas características, as quais servem como parâmetros de medição.

Os referidos parâmetros são afetados pelas características inerentes a cada máquina, tais como as frequências, o amortecimento, a impedância, tipo de

amortecimento, velocidades de operação, que acabam por influenciar na determinação do ciclo de vida do equipamento (Wowk,1991;Mitchell,1993 e Charlotte,1993).

## 2.2 Freqüências Internas

Devido a limitações dos processos de fabricação e pelo aspecto construtivo uma máquina, em operação, está constantemente gerando vibrações. Isto devido a imprecisões dimensionais, deficiência na manufatura dos componentes, sobrecargas, cargas intermitentes e outras fontes(Wowk,1991; Mitchell,1993 e Charlotte,1993).

As freqüências destas vibrações estão relacionadas as freqüências naturais de cada componentes e ao tipo de operação, nas quais aqueles estão envolvidos.

Como exemplificado na Fig. (2.2), no espectro de freqüência, os diversos componentes estão relacionado com determinadas freqüências, ou a certas características deste espectro (Charlotte,1993 e Santos,1996).

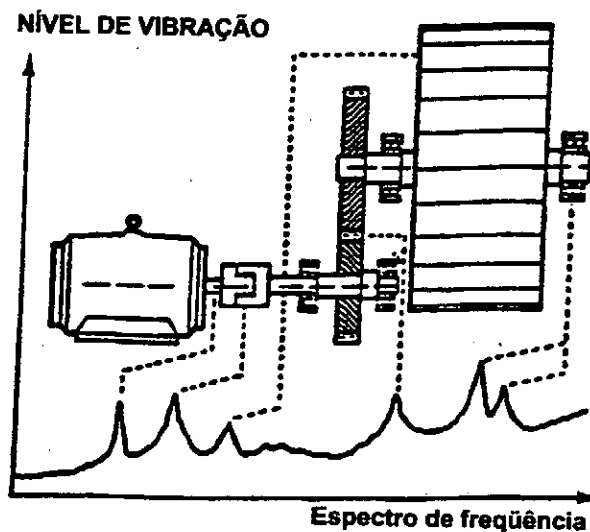


Figura. 2.2. Espectro das freqüências de um sistema.

## 2.3 Amortecimento

Amortecimento é um fenômeno de dissipação de energia. Portanto, o amortecedor é um dispositivo concebido para converter a energia cinética em calor. Todas as estruturas possuem algum tipo de amortecimento. É por este motivo que quando uma estrutura é excitada, e esta for deixada vibrar livremente, há um decaimento na amplitude do seu movimento com o passar do tempo até que este cesse. A importância de quantificar o amortecimento se deve ao fato dele atenuar os movimentos transitórios e desta forma é um parâmetro importante no comportamento dinâmico de uma determinada estrutura. Em sistemas excitados por defeitos em elementos rolantes, este parâmetro é extremamente importante nas faixas de ressonâncias, limitando as amplitudes dos movimentos dos sistemas (Wowk,1991).

## 2.4 Impedância Mecânica

É a propriedade estrutural de atenuar a transmissão de forças de oscilação. Ela depende do tipo de material, pelo qual está sendo transmitido, da geometria deste, do tipo de elementos de ligação e do material conectado. Portanto, havendo uma perda de energia a sua amplitude tende a diminuir, conforme esta oscilação percorre através da estrutura, da fonte até o transdutor. A atenuação da vibração percorrendo a estrutura, devido ao conjunto dos diversos tipos de ligações de materiais diferentes, no interior do equipamento é, portanto, o conceito de impedância mecânica(Wowk,1991).

## 2.5 Isolamento

O isolador de vibrações é baseado no conceito de impedância mecânica, através da colocação de dois materiais com rigidez diferentes, na trajetória de

propagação. Com isto há a diminuição da amplitude, mas deve-se observar que a frequência permanece praticamente inalterada. Os típicos materiais isoladores são as molas mecânicas, as mantas de neoprene, feltro, fibra de vidro e outros. Para o projeto de um absorvedor de vibrações deve-se, portanto, considerar a frequência a serem atenuadas(Wowk,1991).

## **2.6 Velocidades**

Quando um rotor atinge uma velocidade tal que o mesmo entra em uma condição de ressonância, a esta velocidade dá-se o nome de Velocidade Crítica. Esta velocidade pode não ser exatamente igual a frequência natural do próprio rotor. Isto por que ambos, rotor e rolamentos, tem características dinâmicas dependentes da velocidade(Wowk,1991 e Harris,1991).

## **2.7 Rolamentos**

No monitoramento de máquinas rotativas, através da análise dos sinais de vibrações, o objetivo principal é o acompanhamento da performance do rolamento. Cerca de aproximadamente 90% dos defeitos podem ser previstos meses antes da ocorrência de quebras, os outros 10% são devidos a imprevisões(Wowk,1991).

Os rolamentos fabricados atualmente passam por um rigoroso controle de qualidade, portanto o índice de rolamentos ruins saídos das fábricas é baixíssimo. Assim, as falhas normalmente são oriundas da montagem, da inserção de misturas, da falta de lubrificação, de umidade ou outros agentes abrasivos ou ácidos(Wowk,1991; Charlotte,1993 e Santos,1996).

No caso de montagem, vários defeitos podem ser introduzidos, pressão excessiva, desalinhamento, o qual pode ser paralelo ou angular.

Os rolamentos são os elementos de máquinas responsáveis pela transferência de energia com o mínimo de resistência possível. Eles são os componentes mais comuns, e são empregados em quase todas as máquinas ou equipamentos. Os rolamentos de esferas são os mais numerosos.

Ao longo da história dos mancais de elementos rolantes sua importância para indústria chegou tal ponto que durante a II Guerra mundial uma fábrica de rolamentos foi bombardeada como estratégia de guerra (Schaefer,2000).

Este elemento de máquina possui uma posição crítica dentro dos equipamentos, pois na maior parte das vezes é ele quem faz a ligação entre partes móveis e estáticas. É estatisticamente comprovado ser o rolamento o primeiro a falhar(Martins,1985).

As conseqüências no caso de sua falha não se restringem apenas ao próprio elemento, outros conectados a ele serão danificados.

### **2.7.1 Movimentos Internos**

A seguir é descrito o movimento simples dos elementos de um rolamento, ou seja, da gaiola, do elemento rolante. Considera-se para as análises que as pistas rotacionam Fig. (2.3), sendo que possuem um contato angular  $\alpha$  e não há um escorregamento entre os elementos rolantes (Harris,1991).

A rotação sobre o eixo é dada pela eq. (1):

$$v = \omega r \quad (1)$$

Onde  $\omega$  é a rotação do eixo [rad/s] e  $r$  é o raio. Assim, por conseguinte tem-se:

$$v_i = \frac{1}{2}\omega_i (d_p - D\cos(\alpha)) \quad (2)$$

Ou seja

$$v_i = \frac{1}{2}\omega_i d_p (1 - \gamma) \quad (3)$$

Faz-se a mesma analogia para a pista externa,

$$v_o = \frac{1}{2}\omega_o d_p (1 + \gamma) \quad (4)$$

Onde

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (5)$$

Nesta relação  $n$  é a rotação do eixo em rpm, tem-se então:

$$v_i = \frac{\pi n_i d_p}{60} (1 - \gamma) \quad (6)$$

$$v_o = \frac{\pi n_o d_p}{60} (1 + \gamma) \quad (7)$$

Se não houver escorregamento, os elementos rolantes terão velocidade igual a média da velocidade da pista externa e pista interna, ou seja:

$$v_m = \frac{1}{2}(v_i + v_o) \quad (8)$$

Substituindo eq. (6) e eq. (7) dentro da eq. (8) obtém-se,

$$v = \frac{\pi d_p}{120} [n_i (1 - \gamma) + n_o (1 + \gamma)] \quad (9)$$

Sendo:

$$v_m = \frac{1}{2} \omega_m d_p = \frac{\pi d_p n_m}{60} \quad (10)$$

Tem-se:

$$n_m = \frac{1}{2} [n_i (1 - \gamma) + n_o (1 + \gamma)] \quad (11)$$

Na rotação do elemento rolante, a velocidade angular da gaiola é relativa a pista interna, ou seja,

$$n_{mi} = n_m - n_i \quad (12)$$

A velocidade do elemento é idêntica a da pista, no ponto de contato, o que resulta em:

$$\frac{1}{2} \omega_{mi} d_p (1 - \gamma) = \frac{1}{2} \omega_e d \quad (13)$$

Valendo a proporcionalidade entre  $\omega$  e  $n$ ,

$$n_e = (n_m - n_i) \frac{d_p}{d} (1 - \gamma) \quad (14)$$

Substituindo a eq. (14) na eq. (11), tem-se:

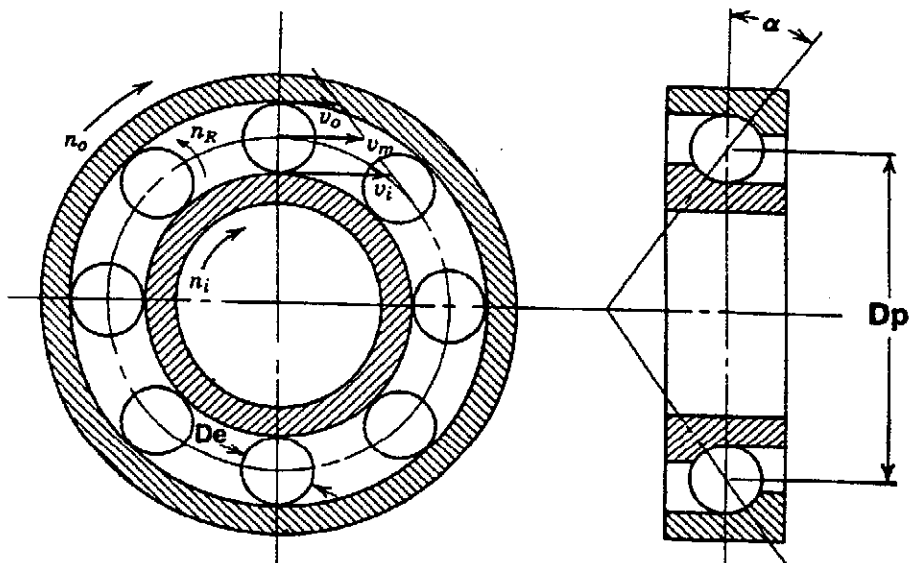
$$n_e = \frac{1}{2} \frac{d_p}{d} (1 - \gamma) (1 + \gamma) (n_o - n_i) \quad (15)$$

Assim, se for feito a consideração de que somente a pista externa seja estática, tem-se então as seguintes relações,

$$n_m = \frac{1}{2} [n_i (1 - \gamma)] \quad (16)$$

$$n = \frac{1}{2} \frac{d_p}{d} n_i (1 - \gamma^2) \quad (17)$$

As velocidades internas em um rolamento estão associadas diretamente com a sua geometria.



*Figura 2.3. Velocidades dos Elementos de um Rolamento.*

Na Fig. (2.3) apresentada esquematicamente os movimentos internos de um rolamento rígido de esferas, onde  $D_p$  é o diâmetro primitivo,  $\alpha$  é o ângulo de contato, o qual para este tipo de rolamento é normalmente igual a zero,  $D_e$  é o diâmetro da esfera,  $v_i$ ,  $v_o$  e  $v_m$  são as velocidades nos respectivos pontos.  $n_i$ ,  $n_o$ , e  $n_R$  são as rotações dos anéis interno, externo e esfera. Para um rolamento autocompensador de esferas, as

considerações são praticamente as mesmas, apenas uma consideração sobre o ângulo de contato deve ser acrescentada, conforme o esquema da Fig. (2.4).

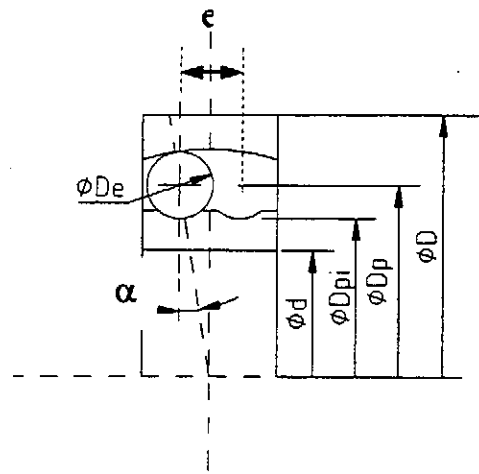
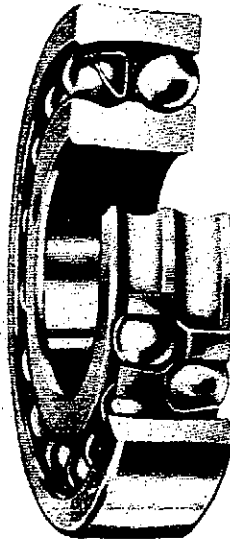


Figura 2.4. Desenho esquemático do Rolamento Autocompensador de esfera.

$$\alpha = \text{atang}\left(\frac{e}{(D_p + D_e)}\right) \cong 8,9^\circ \quad (18)$$

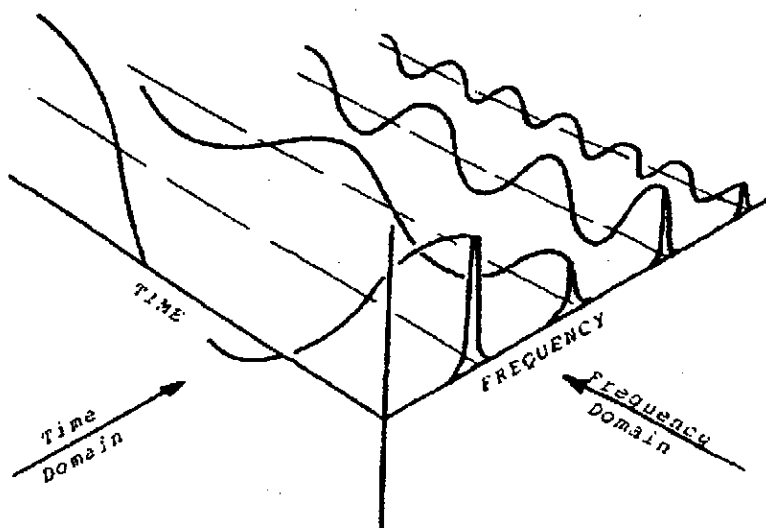
A eq. (18) apresenta o ângulo de contato que há no rolamento autocompensador de esferas. Onde  $e$  é a distância entre centros (direção axial) das esferas de uma carreira a outra. A Fig. (2.5) mostra um rolamento autocompensador (Harris, 1991).



*Fig. 2.5. Rolamento autocompesador de esferas.*

### **2.7.2 Freqüências**

Fazer análise de vibrações no domínio do tempo se torna pouco produtivo em sistemas onde há muitas ressonâncias, porque praticamente nenhuma informação útil é possível de se obter (Martins, 1985; Randall et al, 1996 e, Vargas e Bistafa, 1996). Portanto, para analisar tais sinais é necessário fazer sua transformação para o domínio da frequência. Fourier descobriu que todo sinal harmônico complexo pode ser representado em uma série de ondas senoidais, sendo que cada uma delas difere em amplitude e frequência das outras (Martins, 1985; Nunes, 1989 e Antonioli, 1999). Observar o sinal no domínio da frequência seria semelhante ao se observar um objeto de outro ponto de vista, isto é representado na Fig. (2.6).



*Figura 2.6. Observação do Sinal no domínio do Tempo e no domínio da Frequência.*

Este sinal no domínio da frequência é conhecido como espectro de vibrações. Observando o espectro é possível fazer um acompanhamento mais nítido das alterações ocorridas em um equipamento. Tais alterações, referem-se as modificações em amplitude, e aspecto, das diversas frequências geradas no interior da máquina e pelas fontes vizinhas (Wowk, 1991; Mitchell, 1993; Martins, 1985; Nunes, 1989; Antonioli, 1999), como foi exemplificado na Fig. (2.2).

Quando se fala em frequências, na análise de vibrações de máquinas, refere-se a frequência gerada pelo engrenamento, pela tração realizada pela correia, pela passagem das pás e tantas outras. Como parte integrante deste conjunto, o rolamento também gera algumas frequências, as quais estão relacionadas a passagem de cada um dos seus componentes sobre um defeito ou devido ao atrito do contato entre os elementos, por exemplo. Estes componentes são basicamente, a pista interna, a pista externa, a blindagem, a gaiola e os elementos rolantes, que são as esferas ou rolos.

As frequências geradas pelo atrito são devidas ao fato de não se ter nenhum tipo de processo de fabricação perfeito, que produza superfícies isentas de rugosidade ou qualquer outro tipo de imperfeição. Assim, quando os componentes entram em contato uns com os outros, acabam por gerar vibrações.

No entanto, quando um defeito começa a surgir, seja ele sobre alguma das pistas, na gaiola ou sobre os elementos rolantes, a frequência de passagem dos componentes sobre o mesmo se sobressai no espectro.

Com base nesta informação é que se pode rastrear o espectro à busca de tais defeitos, pois se sabe em que frequências normalmente se manifestam.

Ao longo dos anos foram desenvolvidas algumas fórmulas, as quais são hoje comumente empregadas à análise de defeitos em rolamentos. Elas estão relacionadas com a geometria de seus componentes. Isto é, com a frequência de passagem destes sobre algum defeito, e são calculadas através das equações (19), (20), (21) e (22) (Wowk, 1991; Mitchell, 1993 e Charlotte, 1993).

$$\text{BPFI} = \frac{N_b}{2} \times \left( 1 + \frac{B_d}{P_d} \times \cos(\alpha) \right) \times \text{RPM} \quad (19)$$

$$\text{BPFO} = \frac{N_b}{2} \times \left( 1 - \frac{B_d}{P_d} \times \cos(\alpha) \right) \times \text{RPM} \quad (20)$$

$$\text{BSF} = \frac{P_d}{2 \times B_d} \times \left( 1 - \left( \frac{B_d}{P_d} \times \cos(\alpha) \right)^2 \right) \times \text{RPM} \quad (21)$$

$$\text{FTF} = \frac{1}{2} \times \left( 1 - \frac{B_d}{P_d} \times \cos(\alpha) \right) \times \text{RPM} \quad (22)$$

As frequências da pista externa e gaiola podem também ser encontradas através da relação dadas pelas eq. (23) e eq. (24).

$$\text{BPFO} = N_b \times \text{FTF} \quad (23)$$

$$FTF \approx 0,35 - 0,45 \times \text{RPM} \quad (24)$$

A expressão  $\times\text{RPM}$  significa a relação vezes a rotação do eixo e não simplesmente unidade rpm. Outras relações que podem ser utilizadas quando não se tem todas as dimensões do rolamento, mas ao menos se tem o número de elementos rolantes, são das pelas seguintes expressões(Charlotte,1993).

$$\text{BPFI} = \left( \frac{N_e}{2} + 1,2 \right) \times \text{RPM} \quad (25)$$

$$\text{BPFO} = \left( \frac{N_e}{2} - 1,2 \right) \times \text{RPM} \quad (26)$$

$$\text{BSF} = \frac{1}{2} \times \left( \frac{N_e}{2} - \frac{1,2}{N_e} \right) \times \text{RPM} \quad (27)$$

$$\text{BSF} = \left( \frac{1}{2} - \frac{1,2}{N_e} \right) \times \text{RPM} \quad (28)$$

Estas equações são apenas uma aproximação rápida. Estas frequências diferenciam-se das de outras fontes de vibrações, partindo-se do princípio que elas não deveriam estar presentes, isto porque são frequências relacionadas a defeitos.

Outro detalhe importante nesta diferenciação está baseado no próprio cálculo das frequências. Normalmente encontramos no espectro frequências da forma  $1 \times \text{rpm}$ ,  $2 \times \text{rpm}$  até  $n \times \text{rpm}$ , referentes a desalinhamento, número de dentes de engrenagens, passagem de pás e assim por diante. Por outro lado, as frequências relacionadas a defeitos em rolamentos dependem da geometria dos mesmos e dificilmente a relação será um número inteiro que multiplicando a rotação do eixo.

Quando se faz uma análise do espectro procuramos por algo que não deveria estar lá, ou seja, por alguma anomalia. Freqüências como as referentes a desbalanceamento e desalinhamento, por exemplos, são comumente encontradas, ao contrário das freqüências relacionadas a defeitos, pois se parte do pressuposto de que rolamentos são praticamente perfeitos. Assim, a presença destas freqüências pode indicar que o rolamento está com problemas, isto é, que algum tipo de defeito está se desenvolvendo provenientes, talvez da falta de lubrificação, de um carregamento inadequado ou uma pressão de ajuste excessiva da montagem eixo-rolamento (Harris,1991 e Charlotte,1993).

Para fazer a análise de defeito em mancais de elemento rolantes é necessário conhecer as freqüências relacionadas com cada componente que forma o rolamento, isto é, a Pista Interna, Pista Externa, Gaiola e Elemento Rolante (Esfera ou Rolo). Na Fig. (2.7) são apresentados os elementos que compõe o rolamento. Como pode ser visto na Fig. (2.8), pode-se observar as freqüências relacionadas com os defeitos, em cada um destes elementos.

Supondo a pista externa ser fixa, e a pista interna ser ajustada sob pressão no eixo, se esta possuir um defeito, percebe-se que ao passar o elemento rolante sobre o defeito, e este se encontrar na zona de carregamento, há um pico devido ao impacto bem acentuado. Ocorrendo o impacto fora da zona de carregamento, o pico é menos intenso.

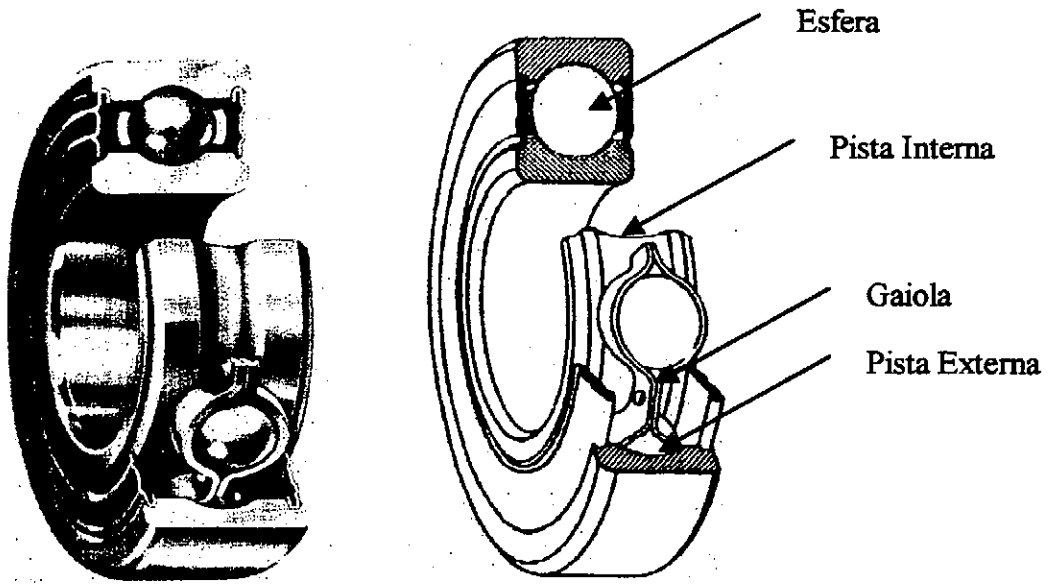


Figura 2.7. Rolamento Rígido de Esferas.

BEARING REPETITION FREQUENCIES

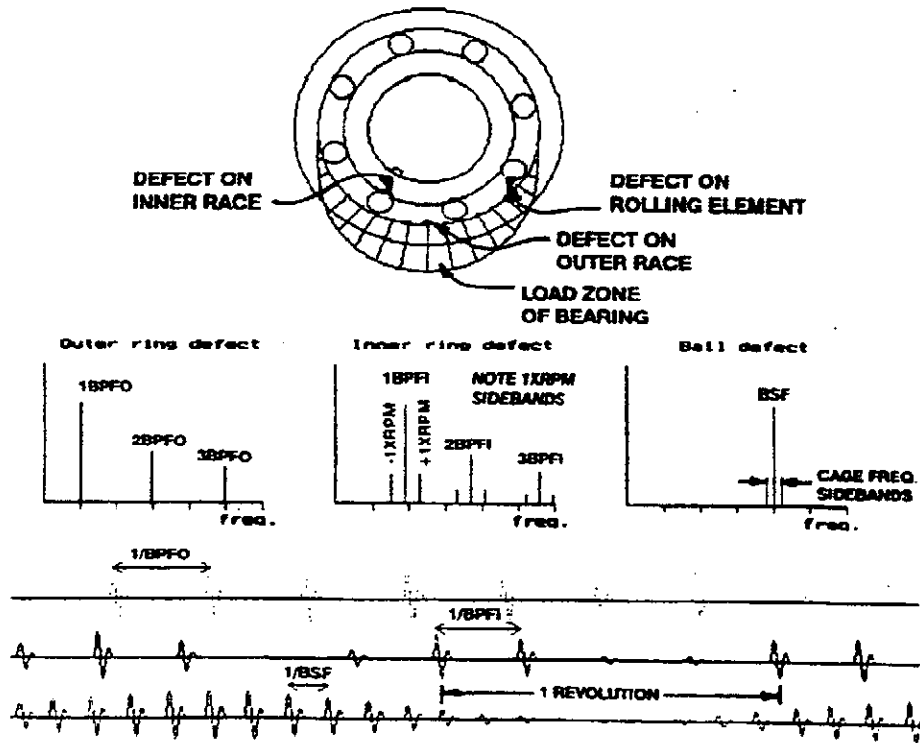


Figura 2.8. Frequências relacionadas aos defeitos.

Este fenômeno, do elemento rolante entrar em contato com o defeito ora dentro e ora fora da zona de carregamento molda o sinal com uma frequência principal com bandas laterais, o que caracteriza o defeito na pista interna. Estas bandas laterais estão distantes da BPFI de  $1X$ ,  $2X$  a rotação do eixo. O aumento das bandas laterais implica no maior desenvolvimento do defeito (Charlotte,1993).

Ao contrário, sendo o defeito na pista externa, e como foi dito esta ser fixa, há apenas o aparecimento de harmônicos, múltiplos da frequência de passagem da pista externa. Quanto a frequência de passagem dos elementos rolantes, estes estão correlacionados com a frequência da gaiola, ou seja, a frequência de passagem dos elementos rolantes possuem bandas laterais distantes, pelo valor da frequência da gaiola.

A Fig. (2.8) mostra a característica de cada sinal de defeito, sendo que é apresentado o esquema de um rolamento, com um defeito na pista interna (BPFI), outro na pista externa (BPFO) e no elemento rolante (BSF). Mostra também a zona de carregamento, os sinais característicos destes defeitos.

## **2.8 Análise de Vibrações**

### **2.8.1 Avaliação dos Níveis de Vibrações**

O método de análise de vibrações tem mostrado ser uma ferramenta fundamental para a manutenção, pois ela possibilita o monitoramento com o equipamento ainda em funcionamento e permite o diagnóstico em um tempo tal que possibilita o planejamento e a programação da manutenção (Mirshawka,1991).

A avaliação parte inicialmente do estabelecimento de um espectro de referência. Haverá a necessidade de se determinar este com base nas condições de operação, portanto, esta avaliação varia de um caso para outro (Wowk,1991). No

entanto, como ponto de partida, a determinação do espectro de referência pode se basear em três métodos(Mitchell, 1993).

Primeiramente, com base em uma série de espectros de máquinas similares é determinado um espectro, o qual é avaliado e determinado como representar uma máquina em boas condições. Partindo-se deste para avaliar as outras máquinas.

O espectro de cada ponto medido, em um grupo de máquinas similares, é combinado estatisticamente, de onde é encontrado um espectro de referência.

Na indisponibilidade de dados do grupo, para se levantar este espectro, deve-se tomar o espectro próprio de cada máquina. Estes espectros serão as referências, até que se tenha dados suficiente para otimizar o espectro de referência (Mitchell,1993).

### **2.8.2 Assinatura de um Rolamento**

A assinatura de um rolamento é o sinal emitido por este. Faz-se medições iniciais, das quais se estabelece um padrão de vibração, o qual é chamado de assinatura do rolamento. A partir do estabelecimento da assinatura, esta será utilizada em termos de comparação, a fim de verificar possíveis alterações (Mitchell,1993).

### **2.8.3 Modelo Matemático**

O comportamento do sistema quando um defeito entra em contato com alguma superfície, seja ela a pista interna, pista externa ou mesmo o próprio elemento que entra em contato com alguma pista com defeito, se assemelha a impactos de martelos. Da teoria de vibrações mecânicas, sabe-se que isto excita as várias ressonâncias(Botö, 1971; Taylor, 1980, Martins,1985 e Antonioli, 1999). Portanto pode-se modelar este fenômeno através das seguintes equações:

$$x_i(t) = \sum_{n=0}^{\infty} g_i(t - nT_i) \cdot U(t - nT_i) \quad (29)$$

$$g_i(t) = A_i e^{-\alpha t} \text{sen}(\omega_0 t) \quad (30)$$

O coeficiente  $A_i$  na eq. (30) é a amplitude do sinal, e  $\alpha$  é o fator de amortecimento da estrutura.

$$T_i = 1/f_i \quad (31)$$

$$U(t) = \begin{cases} 0 & \text{para } t < 0 \\ 1 & \text{para } t \geq 0 \end{cases} \quad (32)$$

$$y(t) = \left\{ \sum_i \sum_n A_i e^{-\alpha_0(t-nT_i)} \text{sen}[\omega_0(t-nT_i)] U(t-nT_i) \right\} * h(t) \quad (33)$$

Na eq. (33),  $h(t)$  representa a resposta impulsiva da propagação entre o sensor e o ponto de geração do sinal. E o sinal  $*$  representa o produto de convolução (Kreyszig, 1999).

O sinal emitido é bastante complexo, pois ele é composto como descrito na eq. (33) mais um sinal de banda larga, gerado pelo contato elementos rolantes e pistas, ainda em bom estado. Portanto, a observação do sinal no tempo torna-se bastante difícil de ser analisado e praticamente não se tem informações úteis com ele. Assim, torna-se interessante a análise no domínio da frequência, o que se consegue aplicando-se a transformada de Fourier. A transformada de Fourier da eq. (29) é dada por:

$$\mathfrak{F}(x_i(t)) = 2\pi \sum_i X_n(\omega) \delta(\omega - n\omega_m) \quad (34)$$

Onde o índice  $m$  é referente a frequência  $m$ , ou seja aquela calculada para um determinado defeito.  $\delta$  é a função degrau unitário, ou delta de Dirac.

$$\omega_m = 2\pi/T_m \quad (35)$$

Então a relação  $X_i(\omega)$  corresponde ao coeficiente da série de Fourier:

$$X_i(\omega) = \frac{1}{T_i} \int_{-T_i/2}^{+T_i/2} g_i(t) e^{-j\omega t} dt \quad (36)$$

O operador  $\mathfrak{F}$  é linear e transforma o sinal no domínio do tempo para o domínio da frequência, o qual se denomina como espectro de frequência do sinal. Através de sua análise, é possível fazer uma avaliação do comportamento do estado de um rolamento, identificando alguma possível anomalia que possa surgir. Os resultados obtidos nas equações (34) e (36) são substituídos na equação (33), para obter-se:

$$Y(\omega) = \left\{ 2\pi \sum_i \sum_n X_{in}(\omega) \delta(\omega - n\omega_0) \right\} H(\omega) \quad (37)$$

Fazendo a hipótese de que o modo relacionado com a frequência  $\omega_0$  é o mais significativo, verifica-se através de testes que isto é perfeitamente coerente. Estes impactos são gerados a intervalos regulares, conforme é apresentado na Fig.(2.9).

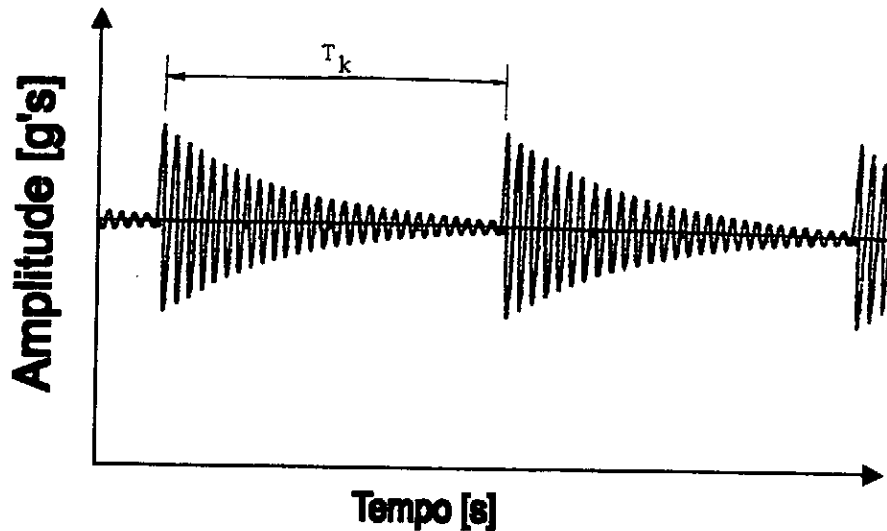
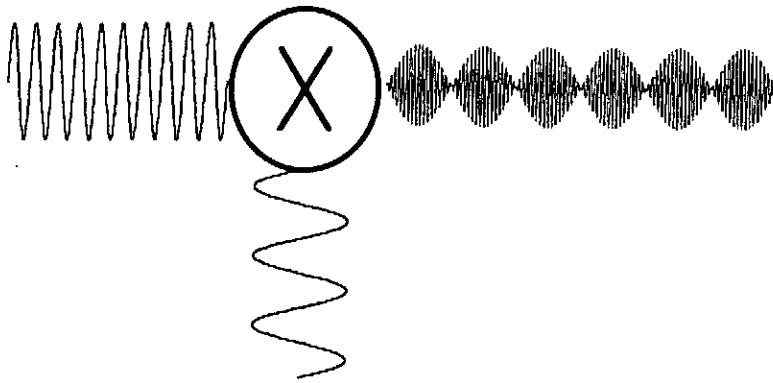


Figura 2.9. Representação da equação (33).  $T_k$  é o período de repetição do defeito.

#### 2.8.4 Técnica do Envelope

Normalmente, quando se faz uma medição em uma máquina, vários de seus componentes, ou vizinhos podem estar gerando ruídos ao mesmo tempo. Estes ruídos são normalmente em baixas frequências e com um grande conteúdo de energia, e acabam encobrindo o sinal de falha no estágio inicial do rolamento, tornando praticamente impossível fazer um diagnóstico do espectro direto. Isto é conhecido como mascaramento, o que na verdade é uma baixa relação entre o sinal e o ruído. Para contornar esta condição, utiliza-se a técnica do envelope.

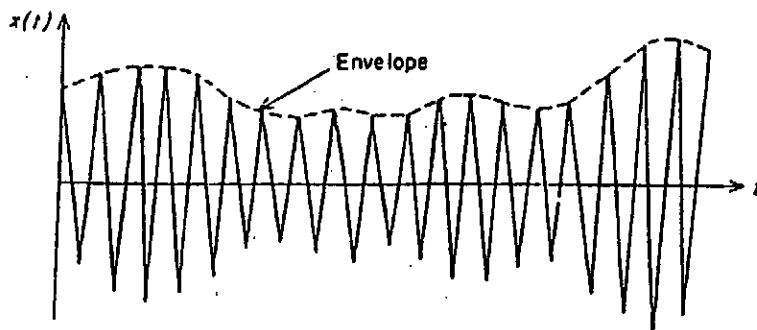
A técnica do envelope é um dos conceitos aplicados à área de telecomunicações, mais precisamente na parte de transmissão e recepção de dados. Onde um sinal em alta frequência, denominado como Portadora, é utilizada para transportar o sinal de um ponto a outro. O outro sinal, o qual é de interesse, é denominado como Modulador, o qual modula o sinal portador. Assim o processo de modulação é definido como sendo um sinal de alta frequência sendo modulado por outro sinal de baixa frequência, definido como modulador Fig. (2.10).



*Figura 10. Processo de Modulação.*

Traduzindo isto para análise de vibrações em rolamento, a ressonância da estrutura como um sinal portador, é modulado pelo sinal do defeito, que se comporta como sinal modulador, ou moduladora.

O processo de demodulação nada mais é que separar os dois sinais. Portanto, o objetivo é decodificar o sinal recebido encontrando o sinal modulador, que na verdade é o próprio sinal do defeito. A Fig. (2.11) apresenta um esquema onde a linha pontilhada é o envelope do sinal.



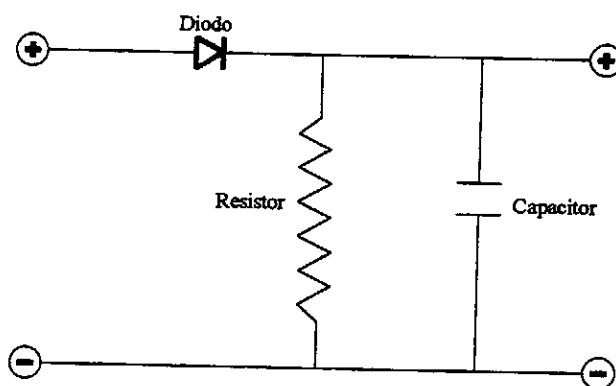
*Figura 2.11. Envelope de um sinal.*

Há pelo menos duas formas para se fazer a modulação, um é através da modulação da amplitude, e o sinal é então do tipo AM. A outra forma de modulação é através da modulação da frequência, e desta forma o sinal é do tipo FM. No entanto, a

forma de modulação do tipo AM é a mais comumente aplicada em sistemas mecânicos.

Infelizmente devido ao fenômeno da impedância da estrutura, o sinal não é tão puro, portanto isto deve ser levado em consideração, durante o processo de análise.

Há duas formas de se extrair o envelope, um é através do processo analógico, como exemplificado na Fig. (2.12), e a outro é através do sinal digital. A primeira utiliza-se de um circuito constituído de um capacitor, um resistor e um diodo. O outro é através da técnica digital, baseado no conceito da transformada de Hilbert.



*Figura 2.12. Detector analógico de envelope.*

A forma de aplicação da Técnica do envelope é relativamente simples, e seguem os seguintes passos:

1. Como primeiro passo, o sinal é adquirido no domínio do tempo;
2. Em seguida este sinal é então passado para o domínio da frequência, aplicando-se a Transformada rápida de Fourier (FFT). Com base neste espectro, verifica-se em qual ressonância houve alguma alteração;
3. É feito então a filtragem do sinal, aplicando-se um filtro passa banda, o qual pode variar de 3 a 24% em torno da ressonância escolhida. Deve-se observar que o espectro da assinatura é necessário, para verificação de tal alteração.

4. O sinal é adquirido no domínio do tempo;

5. O sinal é então submetido a transformada de Hilbert, para sinais digitais, ou ao equacionamento de Duguni ou Crandal, para sinais analógicos.

6. Sinal do envelope é então transformado para o domínio da frequência.

Os passos para obtenção do espectro do envelope podem ser acompanhados pela Fig. (2.13).

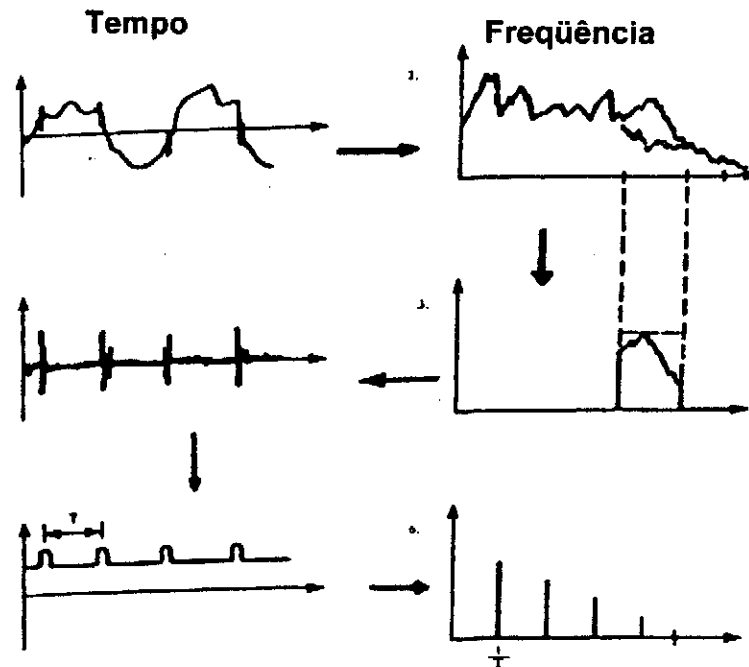


Figura 2.13. Esquema básico para obtenção do espectro do envelope.

O equacionamento da transformada de Hilbert segue em Fig. (38a), Fig. (38b) e Fig.(38c). Note que  $X(t)$  é uma função analítica na forma complexa e  $A(t)$ , amplitude do envelope (Feldman,1993).

$$X(t) = x(t) + i \hat{x}(t) \quad (38a)$$

$$H[x(t)] = \hat{x}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (38b)$$

$$A(t) = \sqrt{x(t)^2 + \hat{x}(t)^2} \quad (38c)$$

### 2.8.5 Aliasing

Em sistemas de aquisição de dados contendo um conversor analógico digital (ADC - Analogic Digital Conversor) um sinal analógico é convertido em um sinal digital, numa taxa específica de amostragem. Esta amostragem é extremamente importante em medições dinâmicas, onde sinais analógicos em alta frequência estão sendo processados.

Para representar o sinal mostrado na Fig. (2.14) são necessários mais de 10 pontos por período de amostragem.

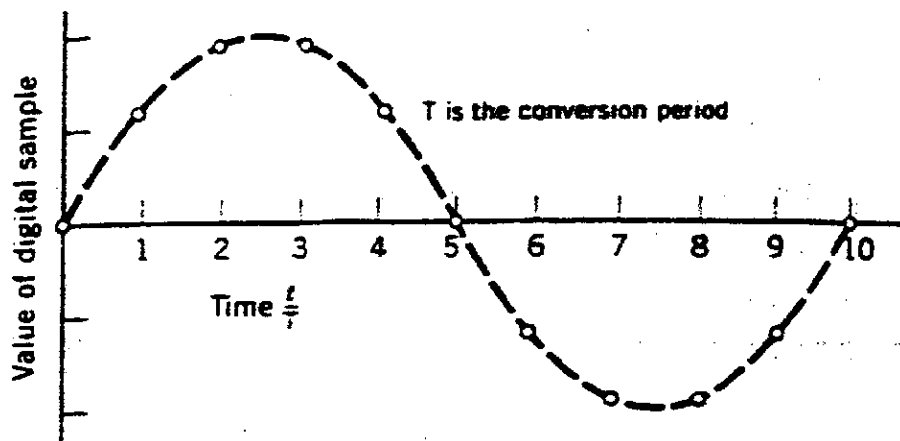


Figura. 2.14. Representação de um sinal senoidal.

Conforme o número de pontos diminui haverá um aumento da distorção, na representação desta onda, comprometendo sua representação. Quando a frequência de amostragem é  $f_s \leq 2 \cdot f$ , ou  $1/T_s \leq 2/T$ , assim como  $T \leq 2 \cdot T_s$ . O sinal não é amostrado com uma taxa ideal de aquisição. A teoria de amostragem de Nyquist está fundamentada na inequação anterior. A frequência de amostragem mínima é  $f_s = 2 \cdot f^*$  e a conversão máxima de tempo é:

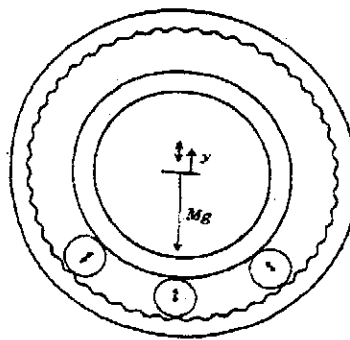
$$T_s^* = \frac{1}{2} \times f^*$$

Onde  $T_s^*$  é o período e  $f^*$  é chamado de frequência de Nyquist.

Se a frequência do sinal analógico  $f \geq f_s / 2$ , o processo de amostragem é inadequado e o sinal de saída do conversor ADC (Analogic Digital Conversor, Conversor Analógico Digital) dá uma representação de onda falsa, a qual é chamando de aliasing, que difere do verdadeiro sinal. O aliasing é evitado quando  $f_s = 2f_c > 2f_2$  (Dally et al, 1993).

## 2.9 Método da Curtose

Um dos métodos que vem sendo bastante aplicado é o método da curtose, ou o quarto momento estatístico. Muitos sinais randômicos possuem um comportamento que descrevem com bastante aproximação a função distribuição de Gauss, ou distribuição Normal (Martin e Honarvar, 1984). As rugosidades das superfícies em boas condições também possuem este tipo de comportamento, Fig. (2.15). Ou seja, a distribuição das alturas seguem o padrão de distribuição definida pela função distribuição (Martins, 1985; Martin e Honarvar, 1984).



*Figura 2.15. Rugosidade das pistas.*

Quando há perdas de material, a forma da função densidade de probabilidade tende a ser concentrada. Esta condição é bem monitorada através do quarto momento

chamado de Curtose. A Fig. (2.16) ilustra a região de contato entre duas superfícies e como é o comportamento da Curtose nesta área (Martin e Hornarvar, 1984).

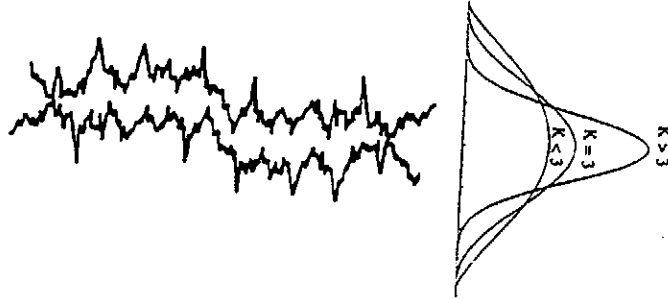


Figura 2.16. Distribuição de alturas na região de contato entre duas superfícies.

Um número útil associado a um conjunto de dados é seu valor médio, também conhecido como média aritmética, a qual é descrita segundo a eq. (39).

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (39)$$

Valor  $\bar{x}$  é o valor central de uma amostra. É o que melhor descreve o referido conjunto de dados, e  $x_i$ , são todos os valores assumidos por  $x(t)$ . Outro parâmetro utilizado para descrever a amostra é uma medida de dispersão, o qual descreve a variabilidade dos dados observados, e o que melhor descreve é a variância da amostra (Benjamin, 1972), e é dada pela eq. (40).

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i^2 - n\bar{x}^2) \quad (40)$$

O desvio padrão da amostra é,

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i^2 - n\bar{x}^2)} \quad (41)$$

Medidas de probabilidade é, então outros parâmetros para descrever o comportamento estatístico de uma amostra. Deve-se, para sua aplicação, utilizar as seguintes relações dadas pelos três axiomas (Benjamin, 1972):

*Axioma I:* A probabilidade de um evento A é maior ou igual a zero mas menor ou igual a unidade, isto é:

$$0 \leq P(A) \leq 1$$

Onde P é a função probabilidade do evento A ser menor ou igual a 1, mas maior ou igual a zero.

*Axioma II:* A probabilidade de um determinado evento é unitária:

$$P(S) = 1$$

A probabilidade do espaço amostral S é 1.

*Axioma III:* Sendo dois eventos mutuamente exclusivos a sua probabilidade é igual a soma das respectivas probabilidades, ou seja:

$$\sum_{\text{Todos os } E_i} P[E_i] = 1$$

Sendo que  $E_i$  é um evento associado com uma determinada amostra.

Os momentos estatísticos são uma outra maneira útil de descrever o comportamento de variáveis randômicas, estes momentos também são definidos como momentos de área da função densidade de probabilidade, e quando calculado em torno da média é então definido como Momento Central. Portanto o quarto momento de tendência central é :

$$\mu^4 = \int_{-\infty}^{+\infty} [x - \bar{x}]^4 p(x) dx \quad (42)$$

Onde  $\bar{x}$  é o valor médio de  $x(t)$  e  $p(x)$  é a função distribuição de probabilidade. A determinação de  $P(x)$  se torna bastante complicado, porém tem-se uma outra relação, a qual é dada por:

$$\mu^4 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [x(t) - \bar{x}]^4 dt \quad (43)$$

Sendo que  $T$  é o tempo de duração do sinal, o coeficiente da curtose é então obtido dividindo-se  $\mu^4$  por  $\sigma^4$ , designado por  $K$ .

$$K = \frac{\mu^4}{\sigma^4} \quad (44)$$

Assim substituindo-se (43) em (44) tem-se a seguinte relação:

$$K = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T \sigma^4} \int_0^T [x - \bar{x}]^4 dt \quad (45)$$

Para facilitar a operação com as fórmulas utilizou-se  $x$  ao invés de  $x(t)$ .

Sabe-se que para um rolamento em boas condições, o sinal de vibração emitido pelo rolamento é de natureza aleatória, e seu comportamento tende a distribuição normal. A função distribuição é dada pela seguinte relação:

$$p(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{x - \bar{x}}{\sigma} \right)^2} \quad (46)$$

Substituindo a equação (46) dentro da (42) e fazendo-se a mudança de variável seguindo a relação:

$$y(t) = \left( \frac{g(t) - \bar{g}}{\sigma} \right) \quad (47)$$

onde  $g(t)$  é o sinal gerado pelo rolamento sem defeito. Tem-se,

$$\mu_g^4 = \frac{\sigma^4}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} y^4 e^{-\frac{1}{2}y^2} dy \quad (48)$$

assim, por integração por partes. Tem-se:

$$-y^3 e^{-y^2/2} + \int_{-\infty}^{+\infty} 3y^2 e^{-y^2/2} dy \quad (49)$$

aplicando-se partes pela segunda vez, tem-se:

$$-y^3 e^{-y^2/2} - 3y^2 e^{-y^2/2} + 3 \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-y^2/2} dy \quad \Big|_{-\infty}^{+\infty} \quad (50)$$

Aplicado-se os limites na eq. (50), obtêm-se:

$$K_g = \frac{3}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{g-\bar{g}}{\sigma} \right)^2} dg \quad (51)$$

A equação (50) foi submetida aos limites, donde os termos fora do sinal de integração foram eliminados. O coeficiente da curtose para o sinal  $g$  é então encontrado e tem o seguinte valor.

$$K_g = 3$$

Este valor deve-se ao fato de que na equação (51), o valor 3 está sendo multiplicado pela função distribuição de probabilidade, a qual, como foi visto, para sinal aleatório possui distribuição normal, o que implica em  $p(g)=1$ , que na verdade representa a área total sob a curva de distribuição de Gauss.

Muitas distribuições estatísticas são aplicadas para descrever variáveis de processos randômicos. E os momentos estatísticos são parâmetros para análise de rolamentos, por exemplo, o coeficiente de Skewness, ou terceiro momento, é empregado na análise variações na geometria do rolamento.

É apresentado neste trabalho além da curtose sobre o sinal filtrado, quatro outros coeficientes. Estes serão verificados para auxiliar suprir falhas que a curtose possui no que diz respeito a análise de vibrações generalizadas. Isto é, o sinal é de banda larga e com picos generalizados. Tais coeficientes são denominados como  $K_n$ , normalizado pela curtose, e é dado pela seguinte expressão.

$$K_n = K_o \times \left( 1 + \sqrt{\left( \frac{V_r - V_{ro}}{V_r} \right)^2} \right) \quad (52)$$

Onde  $K_n$  é a curtose normalizada pela variância  $V_r$ ,  $K_o$  é a curtose da assinatura do rolamento novo, sem defeitos,  $V_{ro}$  é a variância da assinatura. O outro coeficiente proposto é o normalizado pelo valor rms, formulado de maneira semelhante a equação (52), a qual segue.

$$K_{rms} = K_o \times \left( 1 + \sqrt{\left( \frac{RMS - RMS_o}{RMS} \right)^2} \right) \quad (53)$$

Aqui é introduzida a relação como valor RMS (rms-root mean square), do sinal adquirido, relacionado com o mesmo valor, porém da assinatura do rolamento.

## 2.10 Outros Métodos de Avaliação

Além dos dois métodos empregados neste trabalho, ainda há outros métodos de avaliação das condições da máquina, os quais são largamente empregados na manutenção. Dentre os quais estão o Cepstrum, a Amostragem Síncrona no Tempo (AST), a Análise Espectral de Corrente, a Pulsação de Pressão e Fator de Crista.

### 2.10.1 Fator de Crista

Este parâmetro leva em consideração a variação do pico e do valor rms. A relação entre estes dois valores é acompanhada de acordo com a Fig. (2.17). Quando feitas as medições e obtido o valor considerado normal (signature), este fator tende a assumir valores que variaram de 2 a 4. Ao passar do tempo, e algum defeito ou desgaste se apresente, este fator tende a aumentar. Porém, num certo nível de vibração (global) a falha pode ser generalizada, o que traz o fator para níveis tais que a relação pico e rms voltam a ficar na faixa semelhante as condições iniciais. Este comportamento pode ser constatado ao se observar a Fig. (2.17). Assim, quando após um determinado período, os valores do fator de pico retornam aos valores iniciais, isto significa que há uma generalização dos defeitos, e a intervenção é feita neste momento. A equação (54) dá a relação do Fator de Crista.

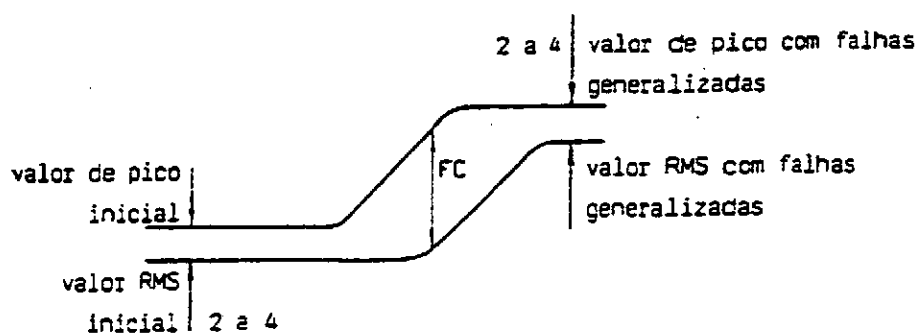
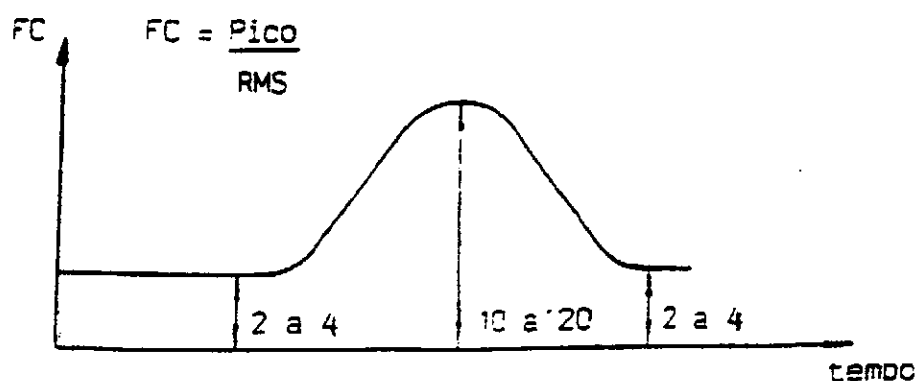


Figura 2.17. Variação do Fator de Crista.

$$\text{Fator de Crista} = \frac{\text{Valor de Pico}}{\text{Valor rms}} \quad (54)$$

Observando o comportamento da correlação do Fator de Crista no tempo, seu comportamento assume o aspecto da Fig. (2.18). Deve-se observar que esta ferramenta de análise serve apenas como um alerta. Ela não informa onde está ocorrendo a falha.



*Figura 2.18. Comportamento do Fator de Crista no tempo.*

A sensibilidade desta ferramenta está no acompanhamento dos valores de picos, no início do desenvolvimento do defeito. O valor rms é pouco alterado por eles. No entanto, quando este defeito se generaliza, os valores de pico se tornam relativamente constantes, e neste ponto o valor rms se altera. Fazendo com que a relação torne a diminuir. A faixa de frequência ideal para medição deste fator está entre 10 a 10KHz. Observa-se que em sistemas onde há cavitação e choques entre dentes de engrenagens, causam problemas com a repetitividade nas medições.

### 2.10.2 Curva de Tendência

A medição periódica dos níveis de vibrações de um equipamento nos permite desenhar uma curva de tendência, Fig. (2.19).

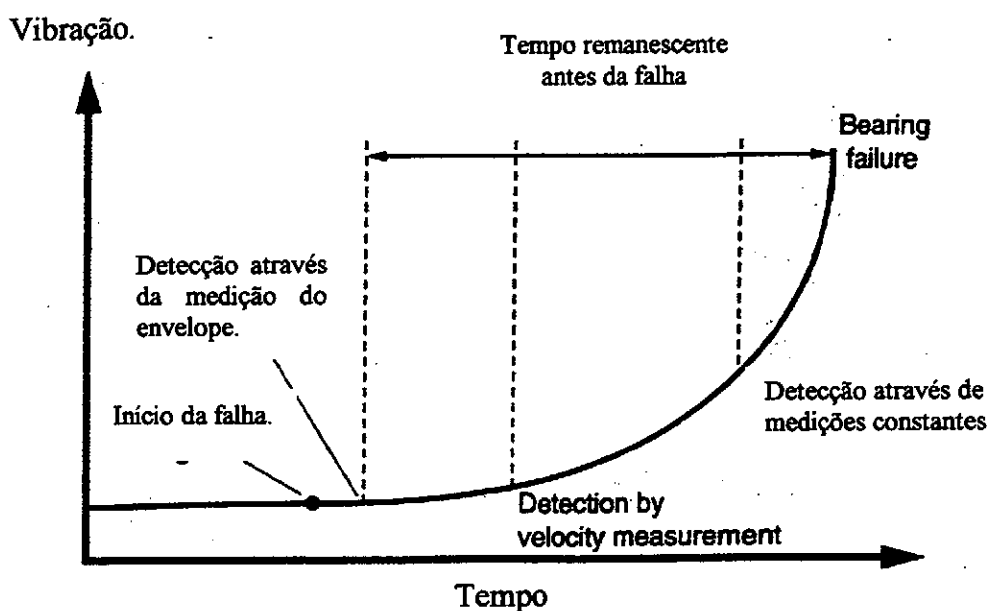


Figura 2.19. Curva de tendência.

Quando um defeito se apresenta, o nível de vibrações começa a aumentar. Conforme as medições vão se sucedendo, estes níveis tendem a se elevarem cada vez mais. Quando os resultados são colocados em um gráfico, a partir do ponto de início da falha (Damage begins), percebe-se a tendência da curva. Ou seja, qual é a tendência do desenvolvimento desta falha. Pode-se então, após uma certa quantidade de medições, determinar qual provavelmente será o comportamento dela e assim, projetar o tempo para se atingir o ponto de falha (Bearing Failure). Isto é possível extrapolando-se os valores até atingir o nível de alarme pré-determinado, onde se julga ser o nível limite de vibração.

### **2.10.3 Cepstrum**

Esta ferramenta possui a característica de agrupar famílias de bandas laterais em um único componente. Ela tem a propriedade de detectar a periodicidade do espectro, a qual pode ser causada pela modulação de um sinal em amplitude ou e mesmo em frequência. Sua principal aplicação é na análise de defeitos em engrenagens. O Cepstrum é o espectro do logaritmo do espectro. Utiliza-se esta técnica para o acompanhamento da evolução de falhas em barras de rotor rompidas em motores elétricos, por exemplo.

### **2.10.4 Amostragem Síncrona no Tempo (AST)**

Durante o funcionamento de uma máquina, existem diversas fontes que contribuem para aumentar o nível de vibrações da mesma. A técnica de Amostragem Síncrona no Tempo permite isolar cada fonte através do acoplamento de um dispositivo, um gatilho (Trigger), por exemplo, no elemento cuja vibração se deseja isolar. Comumente aplicada em balanceamento de ventiladores.

### **2.10.5 Análise Espectral de Corrente**

Com a utilização de um alicate de medir corrente, forma-se o espectro de corrente, com o qual pode-se fazer o acompanhamento de defeitos em barras do rotor e desequilíbrio no estator, além de problemas com folgas, rolamentos, tensões excessivas em correias.

### **2.10.6 Spike Energy, HFD e Shock Pulse (SPM)**

Estas três técnicas estão baseadas na análise em frequências elevadas, da ordem de 25kHz a 100kHz, embora Spike Energy e HFD tenham uma boa resposta na faixa de 5kHz a 50kHz. Não foram concebidas para analisar problemas nestes níveis de frequência. Elas são usadas no monitoramento de desgaste em rolamentos (onde a frequência natural dos próprios elementos são excitadas), problemas de lubrificação, cavitação, dentes de engrenagens, vapor e fluxo de ar a alta pressão.

Em rolamentos, estas técnicas são capazes de detectar, por exemplo, microfalhas, provenientes de fadiga e desalinhamento, montagem inadequada.

## **2.11 Instrumentos de medição**

Os dispositivos utilizados para medição de vibração são conhecidos como transdutores, os quais podem ser de caráter absoluto ou relativo, isto é, o primeiro pode ser fixado diretamente sobre a superfície a medir, enquanto que o segundo é fixado de maneira tal que mede o deslocamento relativo do eixo ao seu alojamento, portanto não havendo contato direto.

Cada um destes transdutores foi concebido para atender determinadas condições de operação, ou seja, quando não há a possibilidade de contato direto do transdutor com a superfície utiliza-se o transdutor de deslocamento relativo. Casos quando há o deslocamento do eixo, a temperatura supera os limites do transdutor ou quando a massa do transdutor pode alterar as características físicas do sistema que está sob análise.

O transdutor de aceleração é o mais utilizado, este é capaz de medir os três parâmetros de interesse: deslocamento, velocidade e aceleração, sendo que ao partir do parâmetro de aceleração pode ser encontrado os outros, com a instrumentação disponível atualmente. Quando a medição se refere a deslocamento e velocidade, o

transdutor é também conhecido como Pick-up, e quando trata de aceleração, é Acelerômetro.

Cada um dos tipos de transdutor possui sua própria frequência de ressonância, as quais devem ser observadas, e a faixa de frequência a medir nunca pode se aproximar da faixa crítica do sensor, pois isto resultaria em medidas completamente imprecisas.

Os meios como estes dispositivos são fixados sobre as diversas superfícies também dependem das condições na qual as mesmas se encontram. A seleção do tipo de fixação está ligada a característica da leitura que se deseja obter.

Os tipos convencionais de fixação são através de colagem com resina de epoxi, base magnética, parafuso prisioneiro e possivelmente soldagem na superfície. Na primeira condição há uma vantagem de se isolar o transdutor de alguma fuga de corrente e o fácil posicionamento. No entanto, a superfície deve estar isenta de poeira e óleos, os quais dificultam a aderência da resina, a temperatura é também um fator limitante. O segundo modo de fixação é através de uma base magnética, que em termos de praticidade supera qualquer outro tipo, porém ela fica restrita apenas a superfícies metálicas. Os dois últimos tipos, o parafuso prisioneiro e a soldagem do transdutor sobre a superfície, são os mais perfeitos para medição, mas necessitam que a superfície a medir seja danificada, o que quase sempre não é possível.

Em termos de medição de frequências, o tipo de fixação altera a própria frequência natural do transdutor, portanto isto deve ser levado em conta no momento da escolha da faixa de frequência que o mesmo deverá trabalhar. Os transdutores como os acelerômetros, por exemplo, possuem frequências de ressonância que variam entre 25 a 35kHz, e a faixa de trabalho pode ser reduzida a 1/3 em virtude do tipo de fixação. Os casos de fixação por parafuso prisioneiro esta frequência quase não é alterada.

Existem alguns dispositivos para fazer inspeções rápidas, são de os de apoio manual, no entanto se limitam a apenas uma rápida verificação, sem maiores ambições

a não ser o da inspeção instantânea. A caneta de inspeção é um exemplo deste tipo de dispositivo, e ela é muito comum no monitoramento de máquinas rotativas.

Os analisadores de frequências, ou analisadores de espectro, são sem dúvidas, um dos equipamentos essenciais à análise de vibrações. Eles são dotados de artifícios que habilitam fazer um tratamento minucioso do sinal. Possibilitando executar várias operações, tais como filtragem, demodulação e aplicação de FFT, para análise do sinal no domínio da frequência.

## **2.12 Análise Automatizada**

Devido a quantidade de dados a serem processados houve a necessidade de se desenvolver um programa, o qual tornasse possível a manipulação das informações. Assim, foram desenvolvidas algumas rotinas em Matlab para execução destas tarefas. Escolheu-se o Matlab como ferramenta de programação, pelo fato de sua facilidade em gerar rotinas e por ser bastante difundido, e as funções matemáticas internas já serem aprovadas.

A Fig. (2.20) apresenta o diagrama de fluxo básico deste programa. Nele pode ser visto os pontos onde são calculados os respectivos coeficientes,  $K_{xf}$ ,  $K_d$ ,  $K_{hl}$ ,  $K_{rms}$  e  $K_{global}$ .

O programa inicialmente solicita a introdução dos dados do novo rolamento ou a seleção de algum já cadastrado na base de dados. Em seguida faz a solicitação para a escolha do arquivo, o qual contém os dados do sinal adquirido pelo analisador de frequências. Os dados são carregados, obtendo-se assim  $x(t)$ . Deste é calculado o coeficiente da curtose, sendo referido como  $K_{global}$ . Na seqüência é aplicado  $fft$  para obtenção do espectro.

O sinal no domínio da frequência e  $x(t)$  são exibidos em um gráfico, de onde pode-se escolher as ressonâncias que sofreram alguma alteração. O filtro a ser aplicado é baseado nesta escolha. Pode-se escolher a largura do filtro passa banda. Os

parâmetros  $K_{xf}$ ,  $K_n$  e  $K_{rms}$  são obtidos aplicado-se os cálculos sobre este sinal filtrado,  $xf$ .

De  $xf$  também se extrai o envelope, através da aplicação da transformada de Hilbert, obtendo-se  $xhl$ . É aplicado  $fft$  em  $xhl$  resultando no espectro do envelope. A partir da seleção dos picos neste espectro é feita uma correlação com as frequências de passagem (BPFO, BPFI, BSF e FTF). Caso o resultado seja maior que 95%, significa que uma destas frequências se encaixa com o pico escolhido, e isto é indicado no espectro do envelope. Deve-se observar que há a necessidade de uma escolha coerente dos picos. O programa executa uma busca por alguma composição de pelo menos duas frequências.

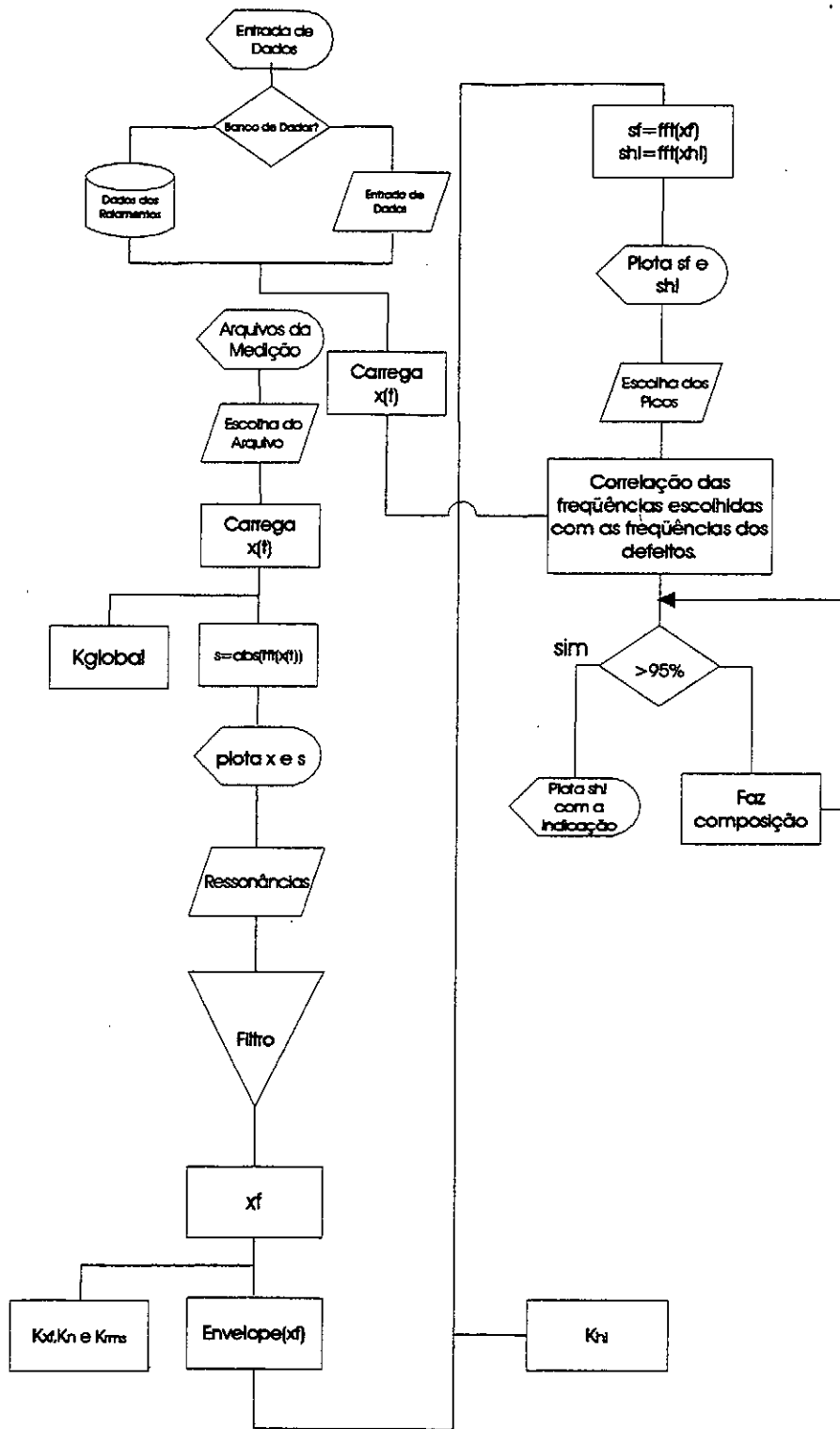


Figura 2.20. Diagrama fluxo básico.

## CAPÍTULO 3

### Preparação da Bancada Experimental

#### 3.1 Materiais

Bancada de concreto armado, Fig. (A.1) e (A.2);

Perfil em “U” mais calços;

Eixo, Arruelas e Porcas, usinados em SAE 1045 ;

Cinco Rolamentos Auto-Compensadores;

Dois Mancais SHN 506;

Torquímetro, marca K-DTOOLS, mod. 2957 WF4335, Fig. (A.4).

Microretífica, marca Dremel MultiPro com variador de velocidades, 5.000 a 30.000rpm, 1.15A;

Inversor de frequências marca Weg CFW-07 6,0/1 AC 220-230 .H2 R07 REDE/LINHA 220/230 V AC 1012 A. Frequência de operação 60/50Hz com saída de 0 a 300Hz e de 0 a 6A, Fig. (A.5);

Dois acelerômetros marca PCB tipo ICP, 41708, 9.71mV/g, modelo ICP, marca PCB;

Martelo de Impacto com acelerômetro, marca PCB, 0,21mV/g, mod. 086C20-10653, Acelerômetro tipo ICP, mod 352A, série 8296, 985mV/g, 1 a 8kHz, Fig. (A.6);

Microcomputador Pentium-MMX 166MHz 16Mb RAM, marca SES-FLEXI-SYS, HD 2.5GB 512Cache, Monitor SVGA 0,28 15", marca THE SPECTRM-AOC. Sistema operacional Windows 95 -V4.00.950.B;

Analizador de Espectro marca Hewlett Packard, modelo HP3566A/3567A, 8 canais, Máxima frequência: largura de banda 12,8kHz;

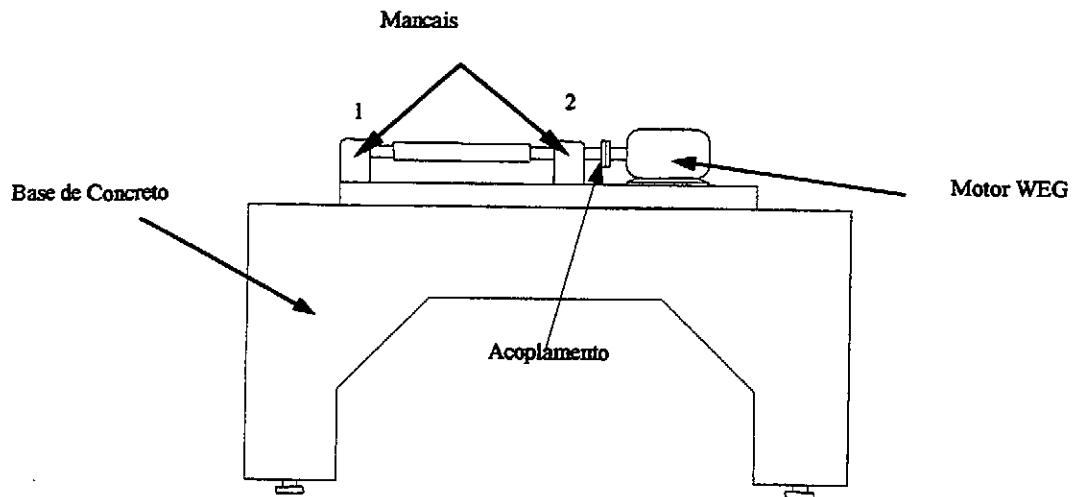
Sacador de Rolamentos SKF, Fig. (A.3);

Tacômetro digital, marca AMETEK, mod. 1726, Fig. (A.8).

## 3.2 Métodos

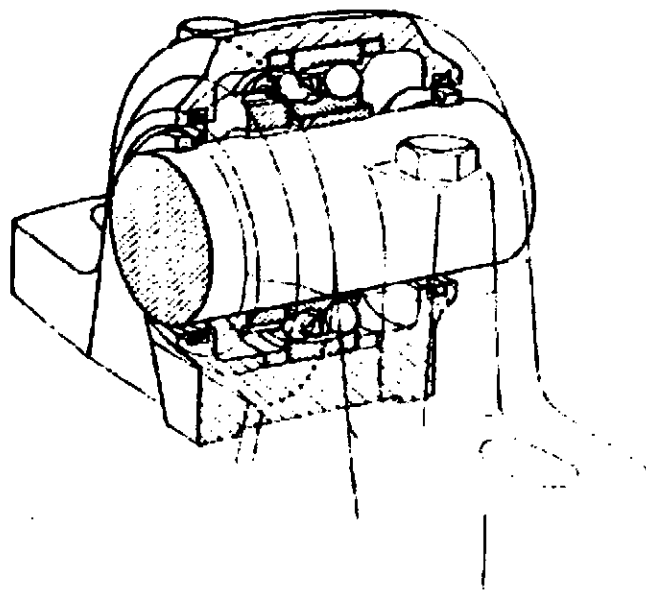
Inicialmente foi construída uma bancada de concreto armado, a qual serviu de base para a montagem do sistema motor, mancais de rolamento e eixo. Esta base de concreto foi dotada de pés niveladores e chumbadores, sendo que o primeiro foi previsto de forma tal que fosse possível ajustar o nivelamento, e o segundo para que fosse possível a fixação dos outros componentes.

A base de metal foi preparada com um perfil em "U", o qual foi oxycortado e fresado, de modo que os devidos encaixes fossem devidamente posicionados. Sobre esta base de metal foram soldados os calços para receber os mancais. Este perfil foi então soldado sobre chumbadores que foram inseridos na bancada, Fig. (3.1).



*Figura 3.1. Desenho esquemático da Bancada.*

Um eixo, e respectivos dispositivos de fixação, foram construídos em aço SAE 1045, estes foram usinados de maneira tal que fosse possível montar os rolamentos nos mancais SHN 506, Fig. (3.2)(Harris, 1991). No perfil do eixo foram previstos roscas, rebaixos e canais, de modo que fosse possíveis a montagem e adaptação dos acoplamentos. A bancada de teste se assemelha àquela utilizada pelos autores Martins(1985) e Antonioli (1999).



*Figura 3.2. Mancais SNH506.*

A opção por rolamento autocompensadores foi pelo fato da facilidade de inserção dos defeitos, muito embora a intenção inicial foi a de usar rolamentos do tipo rígido de esferas, não foi possível introduzir os defeitos de maneira satisfatória. Ao contrário, os autocompensadores, pelo fato de sua concepção construtiva, facilitou a execução desta tarefa;

Foram utilizados dois mancais do tipo SNH 506, os quais foram dotados de graxeiras para que fosse possível fazer a lubrificação dos rolamentos.

Utilizou-se um torquímetro, este foi utilizado para garantir a mesma condição de aperto em todas as montagens. Com a micro retífica Dremel, foram inseridos os defeitos nos elementos dos rolamentos.

Inversor de frequências foi utilizado para variar a rotação do eixo. Este equipamento tem a capacidade de variar a frequência de operação do motor, com isto variar a rotação do eixo. A frequência proporcionada pelo inversor varia de 0 a 300Hz e de 0 a 6A, isto proporciona uma variação de rotação de aproximadamente 10rpm até 10000rpm. Os acelerômetros foram instalados sobre um dos mancais, na posição 1, como indicado na Fig. (3.1).

Martelo de impacto foi utilizado para fazer a análise modal do sistema e, portanto levantar as frequências de ressonância da estrutura. Através do software da HP instalado no microcomputador, o qual faz o gerenciamento do analisador de espectro, fez-se e a análise dos dados coletados.

A montagem dos rolamentos foi feita com auxílio do sacador de rolamentos da SKF, que foi adaptado para executar ambas as tarefas, inserir e sacar os rolamentos. Todos os procedimentos para montagem e desmontagem foram cuidadosamente observados, e evitou-se assim a inserção de defeitos de montagem(Martins, 1985).

Nos rolamentos foram inseridos três graus de defeitos, denominados de G1, G2 e G3, esta nomenclatura simbolizando respectivamente a gravidade dos defeitos inseridos. G0 representando o rolamento sem defeitos. Em todas as montagens os

rolamentos foram lavados, secos e lubrificados com graxa. Os parafusos foram apertados com o auxílio do torquímetro.

A seqüência do experimento seguiu os seguintes passos: ligou-se o analisador de espectro, em seguida o microcomputador. É necessário aguardar que o analisador conclua uma série de autotestes, para então acessar o software de gerenciamento. Acoplou-se em seguida o cabo do acelerômetro à régua de entrada, a qual por sua vez está conectada ao analisador. Ajustou-se a sensibilidade, a unidade de trabalho, no caso g's(aceleração da gravidade), escolheu-se a faixa de freqüência (em Hz) no software de gerenciamento. Foi inicialmente feita a calibração do acelerômetro, utilizando-se de um Calibrador PCB. Em seguida o mesmo foi fixado sobre o mancal com uma resina de epóxi. Variou-se a rotação na ordem de; 1000rpm, 1500rpm, 1705rpm, 2000rpm, 3000rpm e 4000rpm(rotações no eixo), depois de: 50Hz, 60Hz, 70Hz, 80Hz, 90Hz e 100 Hz (freqüências no inversor). Todas estas variações foram feitas para cada grau de defeito, ou seja, G0, G1, G2 e G3.

### **3.3 Preparação do Experimento**

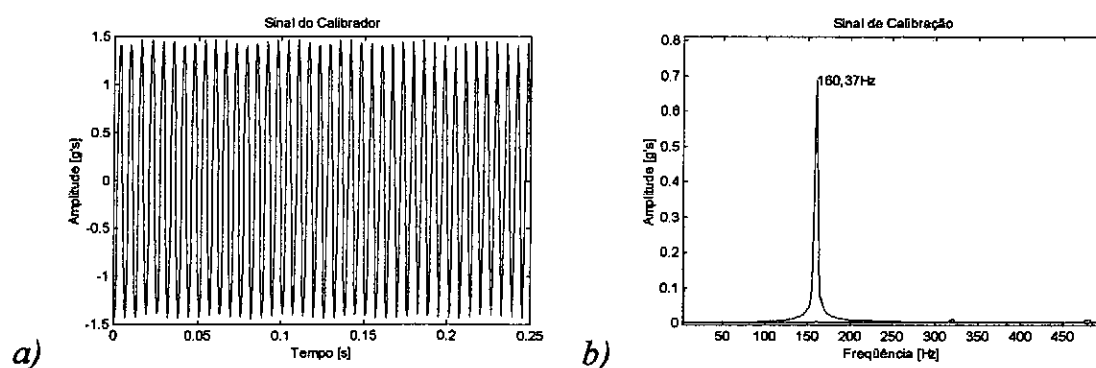
Para o início das medições preparou-se o sistema de medição, composto pelo analisador de freqüências, micro computador e transdutores. Ligou-se o analisador de freqüências, o qual procede a uma série de autotestes, e somente após estes é possível acessar as funções deste equipamento. Na seqüência pode-se ligar o micro computador e acessar o software de gerenciamento dos transdutores e de análise dos sinais. Conectaram-se os transdutores à régua contendo oito saídas, cujas conexões são do tipo BNC, comuns em ligações de rede do tipo par trançado.

Os rolamentos foram montados de forma que o autocompensador ficasse no ponto mais próximo do motor e o rígido mais afastado. Isto pelo fato do formato do acoplamento proporcionar maior carga sobre o primeiro. Assim, realçando ainda mais o defeito.

Inicialmente fez-se uma verificação da frequência natural deste sistema, através da utilização do martelo de impacto e captura do sinal com um acelerômetro. Este sinal foi capturado no domínio da frequência.

### 3.4 Calibração do Sistema

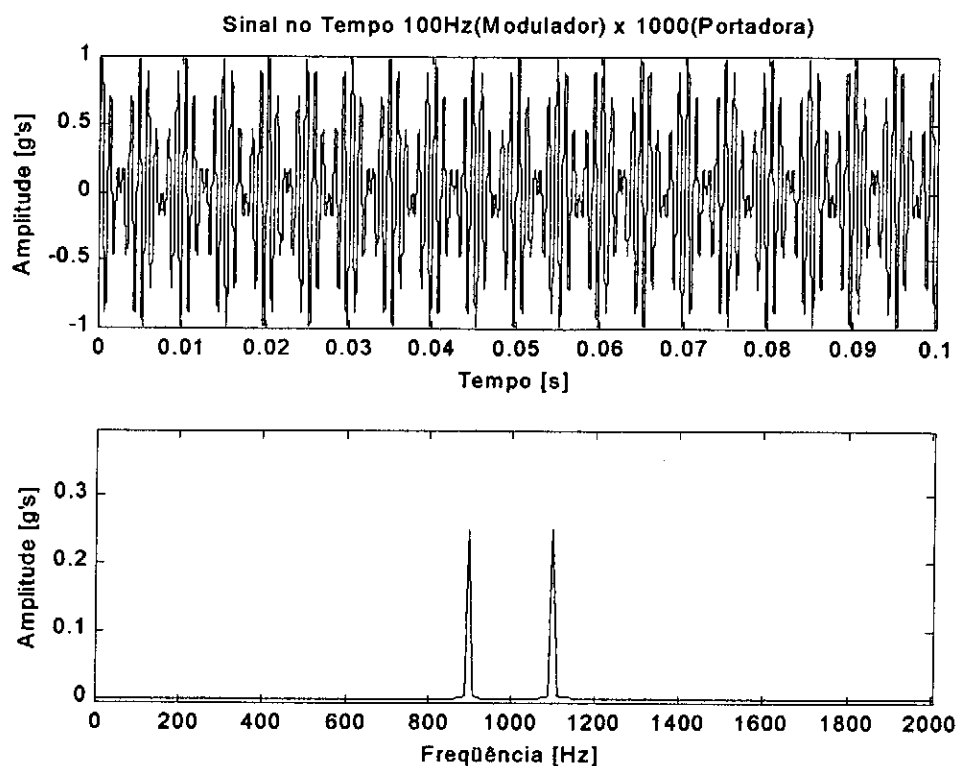
Com relação a calibração a preocupação foi com a resposta que o instrumentos forneceriam sob as condições dos ensaios. Tomaram-se então, as cartas de calibração dos acelerômetros para averiguação quanto a sensibilidade e faixa de frequência de trabalho. Em seguida utilizou-se um calibrador, o qual emite um sinal de  $160\text{Hz} \pm 1\%$ . O sinal no domínio do tempo e da frequência para o acelerômetro 41708 é mostrado na Fig. (3.3). Calibrou-se este transdutor para garantir a fidelidade das leituras feitas com ele.



*Figura 3.3. Sinal de calibração do acelerômetro 41.708. a) No Tempo, b) Na Frequência.*

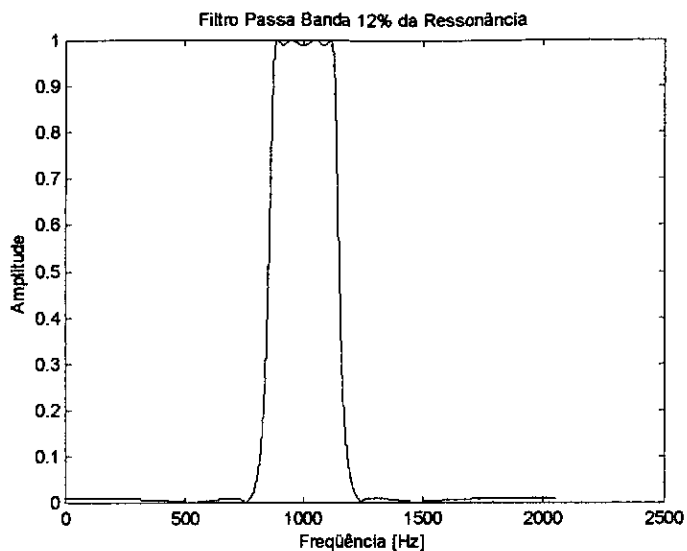
Na seqüência foi gerado um sinal modulado para verificação dos resultados fornecidos pelo programa. Um sinal senoidal de 1000Hz foi gerado, simulando uma ressonância. Outro sinal de baixa frequência foi gerado, senoidal 100Hz, fazendo o

papel do modulador. O referido sinal, no domínio do tempo e no domínio da frequência é apresentado na Fig. (3.4).



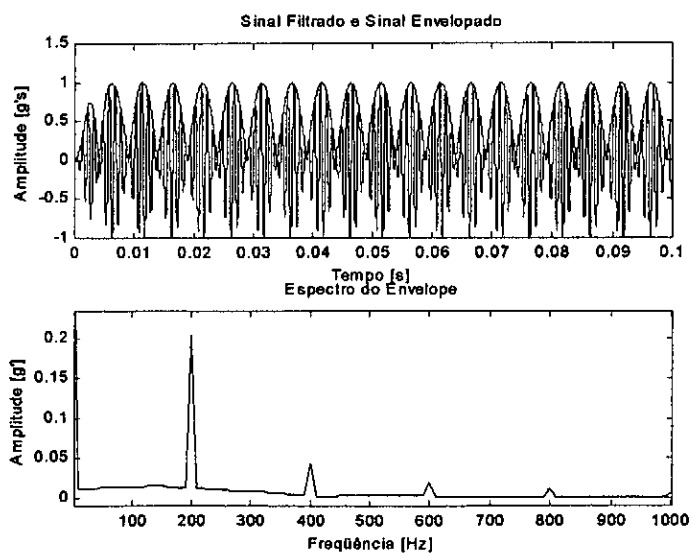
*Figura 3.4. Sinal modulado(parte superior). Espectro(inferior).*

Em seguida foi aplicado um filtro passabanda 12% em torno da frequência de ressonância, no caso 1000Hz. O modelo do filtro elíptico é apresentado na Fig. (3.5-3).



*Figura 3.5. Modelo de filtro passabanda –Filtro Elíptico.*

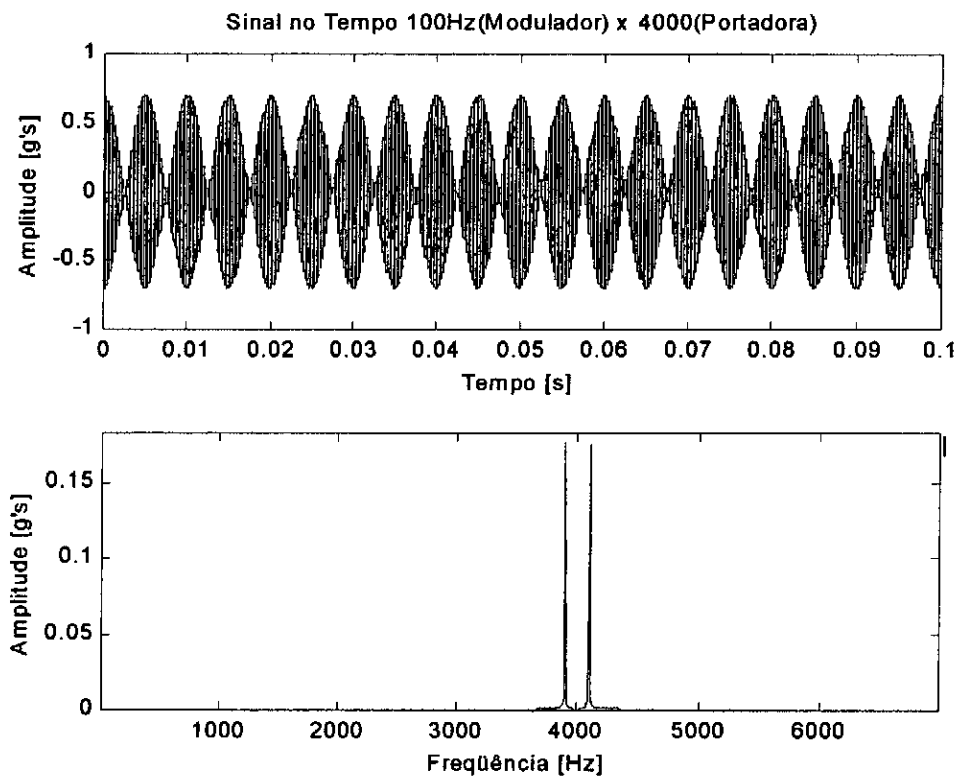
Após a filtragem é então aplicada o equacionamento de Hilbert. Do sinal resultante é aplicado um FFT. O resultado desta última é o espectro de frequência do Envelope, Fig. (3.6).



*Figura. 3.6. Sinal modulado 1000Hzx100Hz(superior). Espectro do Envelope(inferior).*

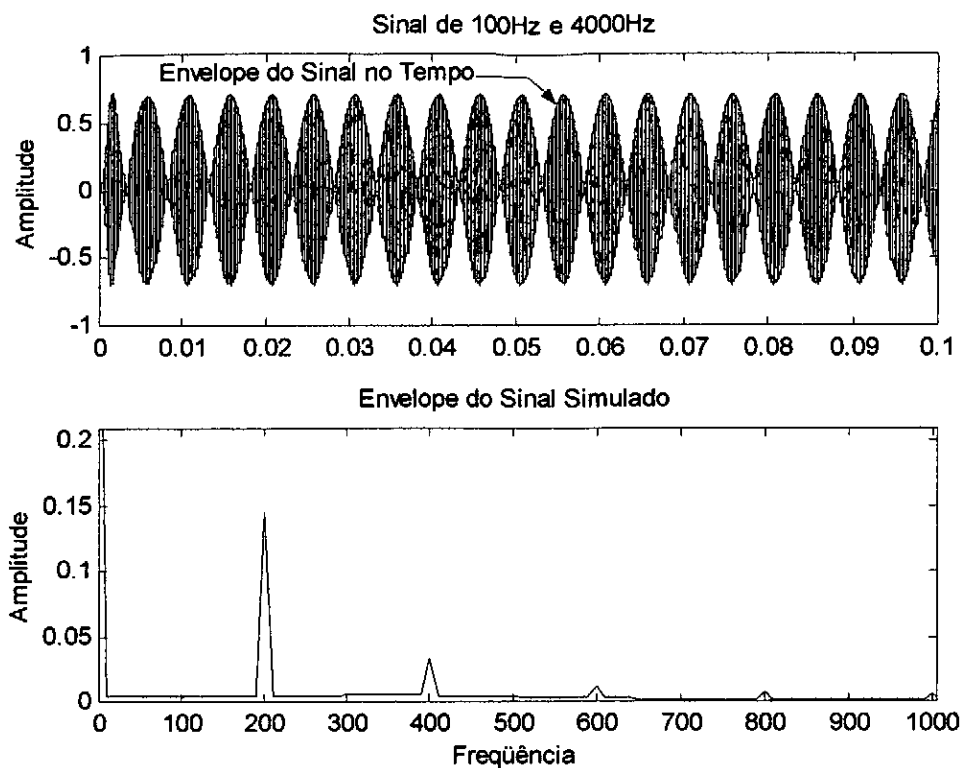
Observa-se na Fig. (3.6) parte inferior, que a frequência do sinal modulador aparece duas vezes maior, isto é pelo fato de que a frequência do envelope ser duas vezes maior que a frequência do sinal modulador.

Fez-se estes mesmos procedimento para um sinal modulador em 100Hz e um portador de 4000KHz, repetindo o meso experimento feito por Antonioli(1999). Os resultado encontrados foram iguais aos apresentados na Fig. (3.7).



*Figura 3.7. Sinal 4kHz modulado por um sinal de 100Hz(parte superior). Espectro do sinal modulado(parte inferior).*

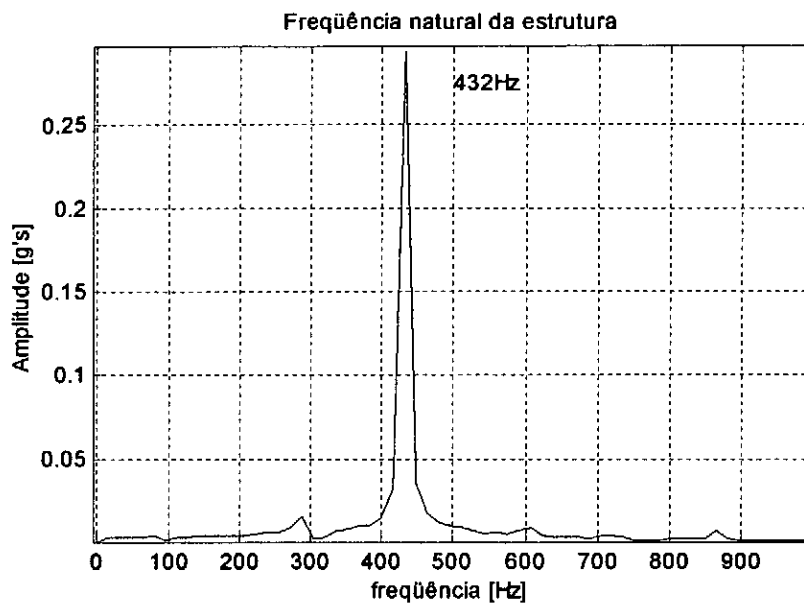
Na seqüência foi obtido o sinal modulado com o respectivo envelope, Fig. (3.8) parte superior. Em seguida é apresentado o espectro do envelope, parte inferior.



*Figura 3.8. Sinal modulado de 4kHz, envelopado(parte superior). Espectro do Envelope(parte inferior).*

O mesmo procedimento foi feito para diversos outros sinais obtendo-se os mesmo resultados. A partir destes resultados, pode-se concluir que o método é coerente e pode ser aplicado para detecção de defeitos através da Técnica do Envelope no experimento proposto.

Na seqüência fez-se o levantamento das freqüências da estrutura. Utilizou-se para fazer este levantamento o martelo de impacto. Com este instrumento aplicou-se um impacto na estrutura. O sinal no domínio da freqüência para este procedimento é apresentada na Fig. (3.9).



*Figura 3.9. Frequência de ressonância estrutural.*

## CAPÍTULO 4

### Resultados e Discussões

#### 4.1 Análise do Espectro do Envelope

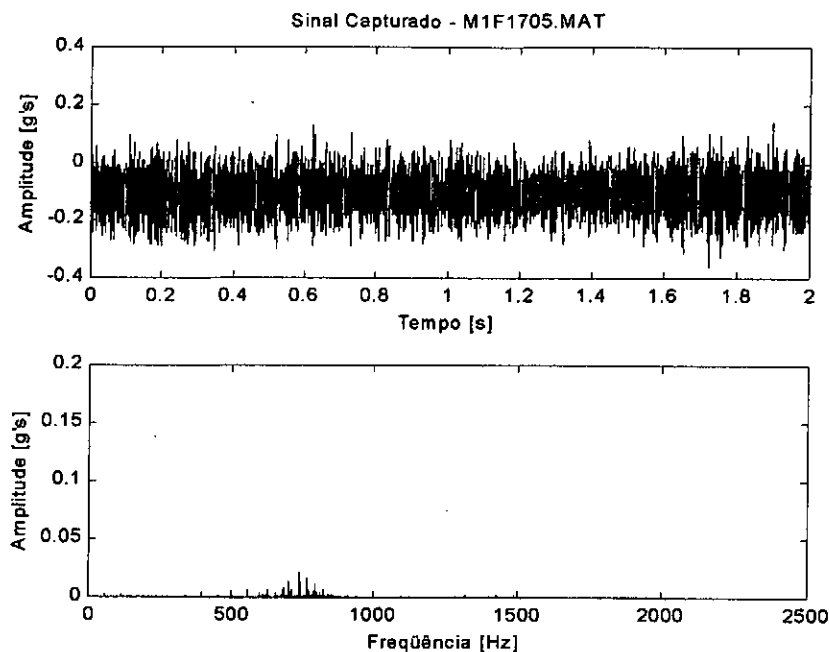
Para se fazer uma análise de envelope ou mesmo uma análise espectral é necessário primeiramente saber as frequências relacionadas com os defeitos. Isto porque, como foi discutido anteriormente, o defeito é algo que não deveria estar presente neste espectro. Há a necessidade de se ter o espectro do rolamento sem nenhum defeito, pois este será necessário para comparar com o que apresenta defeitos:

A Tab. (1) apresenta os valores calculados para o rolamento autocompensador de esferas. O cálculo foi baseado nas equações (19), (20), (21) e (22).

Tabela 1. Valores das frequências de passagem de cada componente do rolamento [Hz].

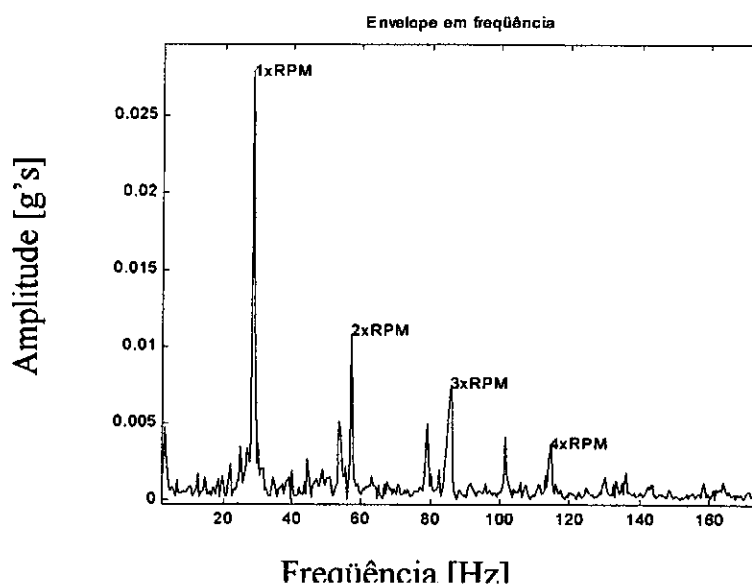
Rpm	1000	1500	1705	2000	2500	3000	4000
<b>BPI</b>	136.99	205.48	233.56	273.98	342.47	410.97	547.96
<b>BPFO</b>	96.34	144.51	164.26	192.68	240.85	289.02	385.37
<b>BSF</b>	46.38	69.57	79.08	92.77	115.96	139.15	185.54
<b>FTF</b>	6.88	10.32	11.73	13.76	17.20	20.64	27.52

Nas figuras a seguir são apresentados os resultados das medições. A primeira medição referiu-se a assinatura na condição sem defeito. Procurou-se fazer os defeitos de modo gradual, na tentativa de caracterizar o aparecimento e a progressão dos mesmos. Esta análise é feita para os defeitos nas pistas interna e externa.



*Figura 4.1. Espectro do Sinal do rolamento sem defeito. Parte superior o sinal no tempo e parte inferior no domínio da frequência.*

Na Fig. (4.1) o espectro de frequência, parte inferior, apresenta pequenos picos em torno da ressonância estrutural. Como pode ser visto na Fig. (4.2), isto se deve ao fato da presença de problemas de desalinhamento e desbalanceamento.



*Figura 4.2. Espectro do Envelope do rolamento sem defeito. Apresenta problemas de desbalanceamento e alinhamento.*

Fez-se então alguns ajustes, de modo a diminuir os efeitos destes problemas. O resultado obtido é apresentado na Fig. (4.3).

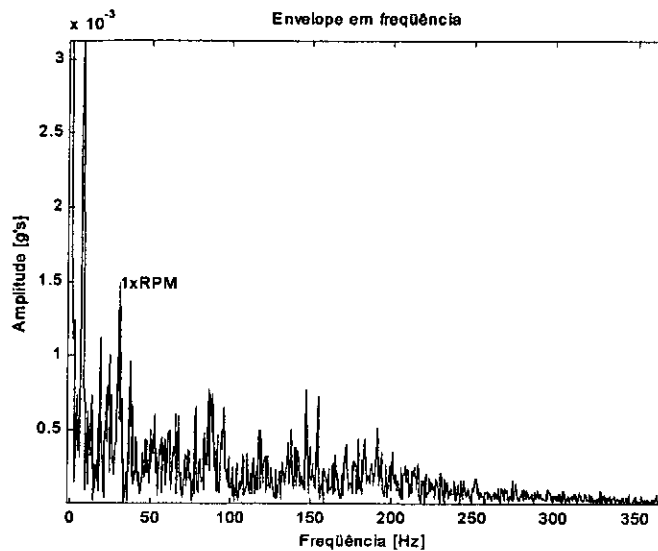


Figura 4.3. Envelope do rolamento sem defeito.

Na seqüência o defeito foi inserido, obtendo-se os sinais apresentados na Fig. (4.4) e Fig. (4.5). Neste último, além do defeito da pista externa, um problema na gaiola foi constatado. Este introduzido no momento da montagem do rolamento.

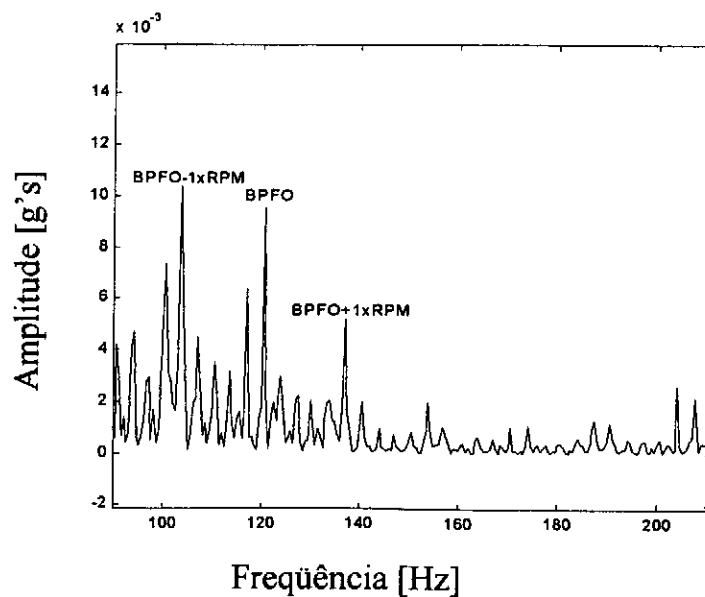


Figura 4.4. Espectro do envelope. Identificação da BPFO, defeito GI.

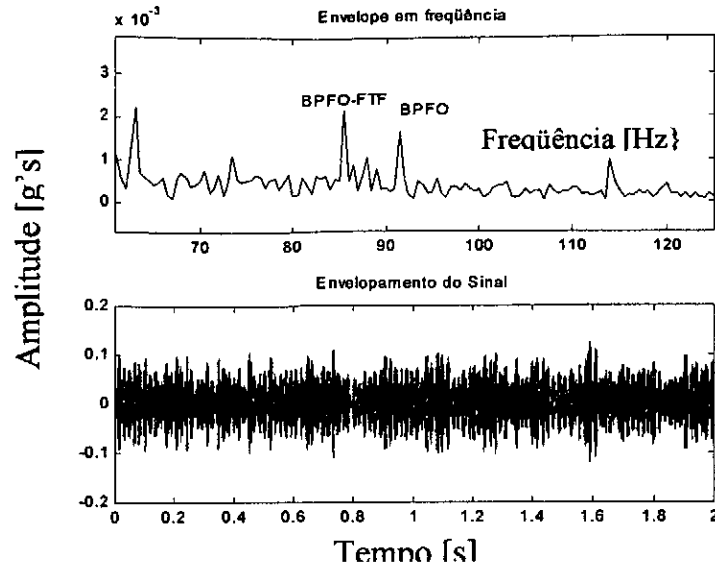


Figura. 4.5. Espectro do Envelope, identificado BPFO e uma composição, parte superior. Parte inferior sinal e o envelope no tempo.

O defeito foi agravado mais ainda, e o sinal é apresentado na Fig. (4.6).

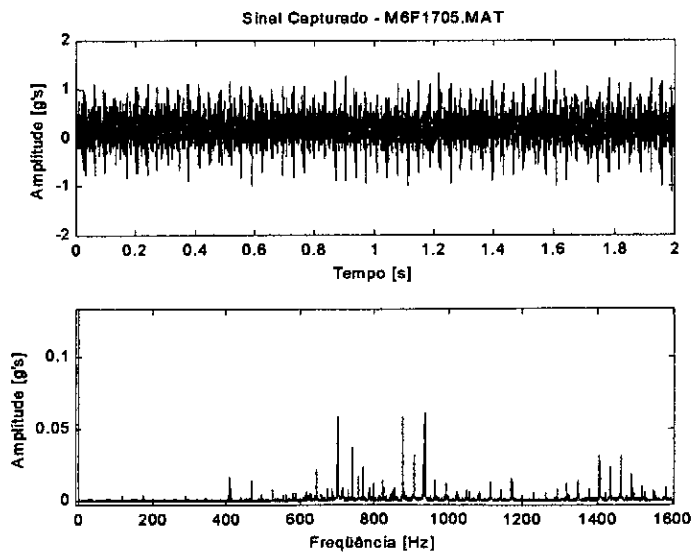


Figura 4.6. Sinal no tempo e Espectro do rolamento com inserção do defeito, G3.

Observa-se que o nível de energia aumentou consideravelmente na faixa de altas frequências. Isto é fácil de se verificar quando se comparadas às figuras (4.6) e (4.1). Aplicando-se a técnica do envelope obtem-se o sinal apresentado na Fig. (4.7).

Nesta aparece o defeito na pista externa, com bandas laterais distantes em 1 x RPM(rotação do eixo), da BPFO(Frequência de passagem da pistas externa).

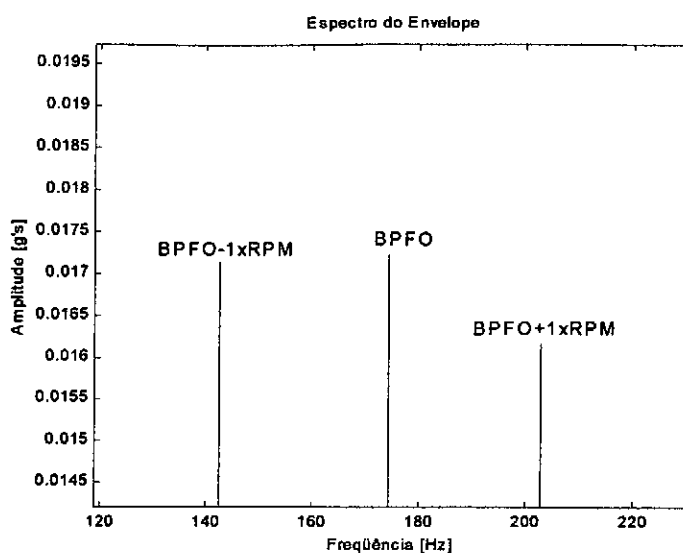


Figura 4.7. Espectro do envelope, identificação da BPFO.

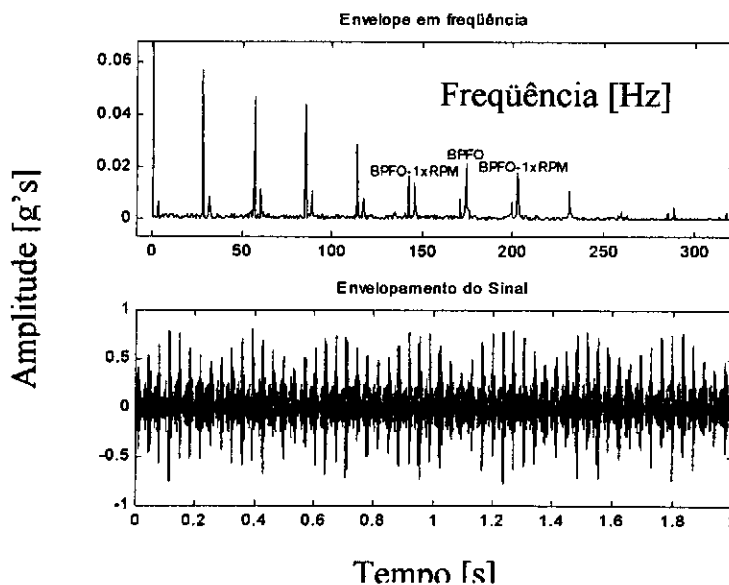


Figura 4.8. Espectro do envelope. Identificação da BPFO, defeito G3.

A Fig. (4.8) apresenta uma visão ampla do espectro do envelope. Na parte inferior da figura é apresentado o sinal com o envelope no tempo. Na Fig. 4.9 é feita uma apresentação semelhante, no entanto o sinal foi filtrado em torno da ressonância.

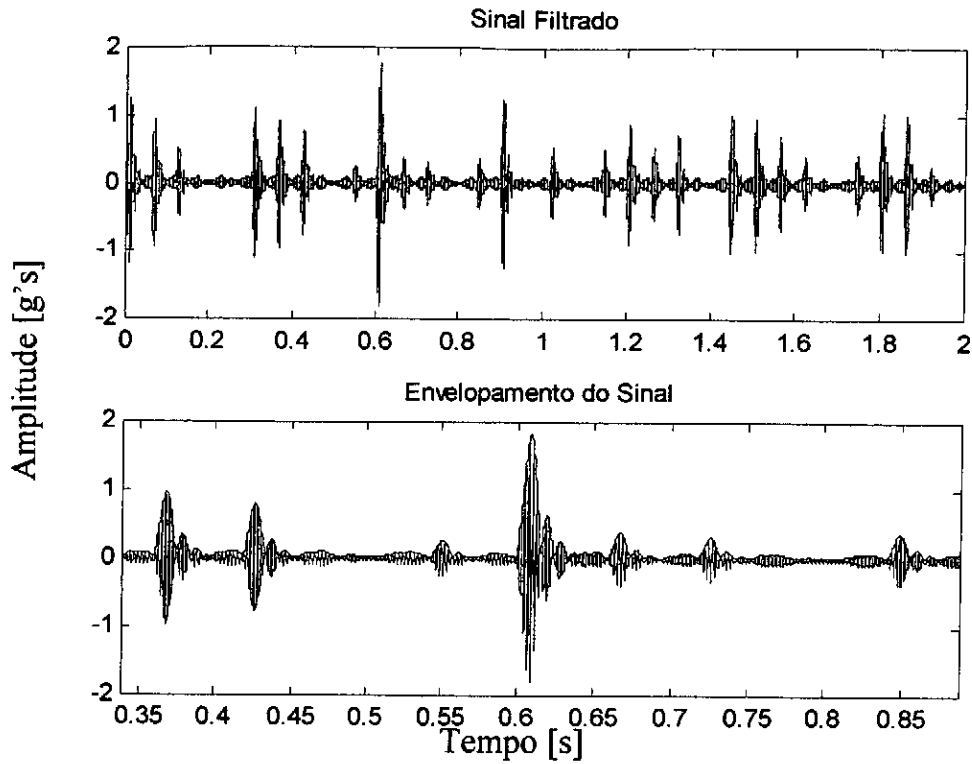


Figura 4.9. Sinal no domínio do tempo. Presença de defeito na BPFO, defeito G3.

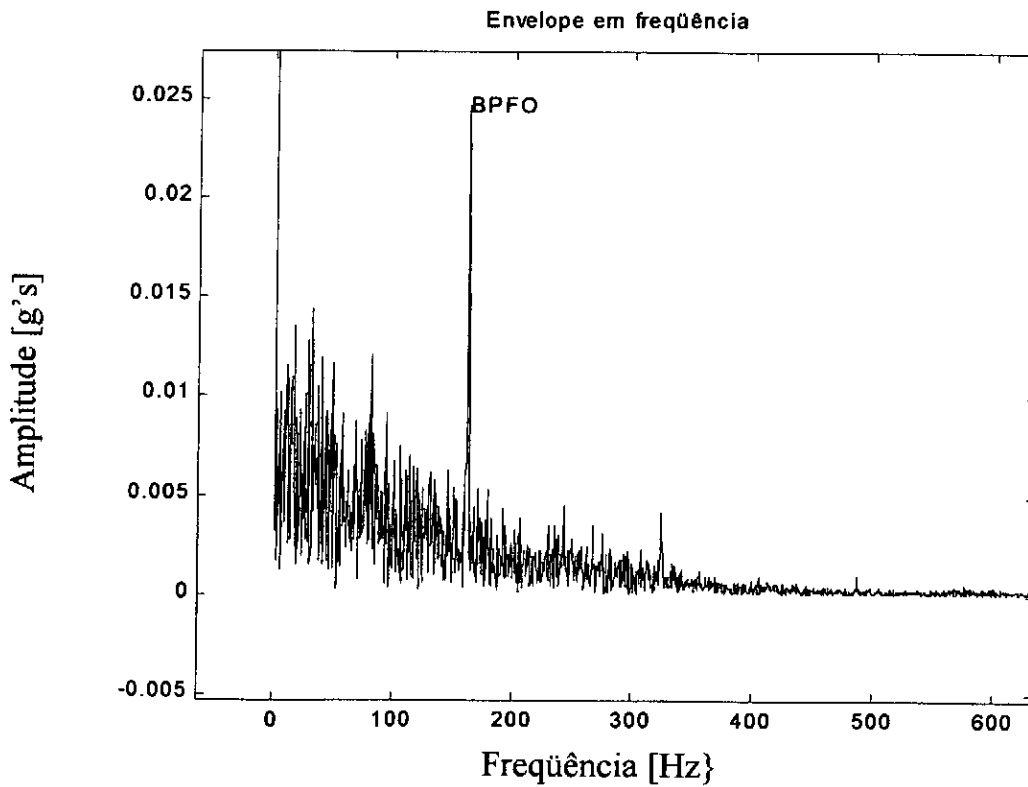
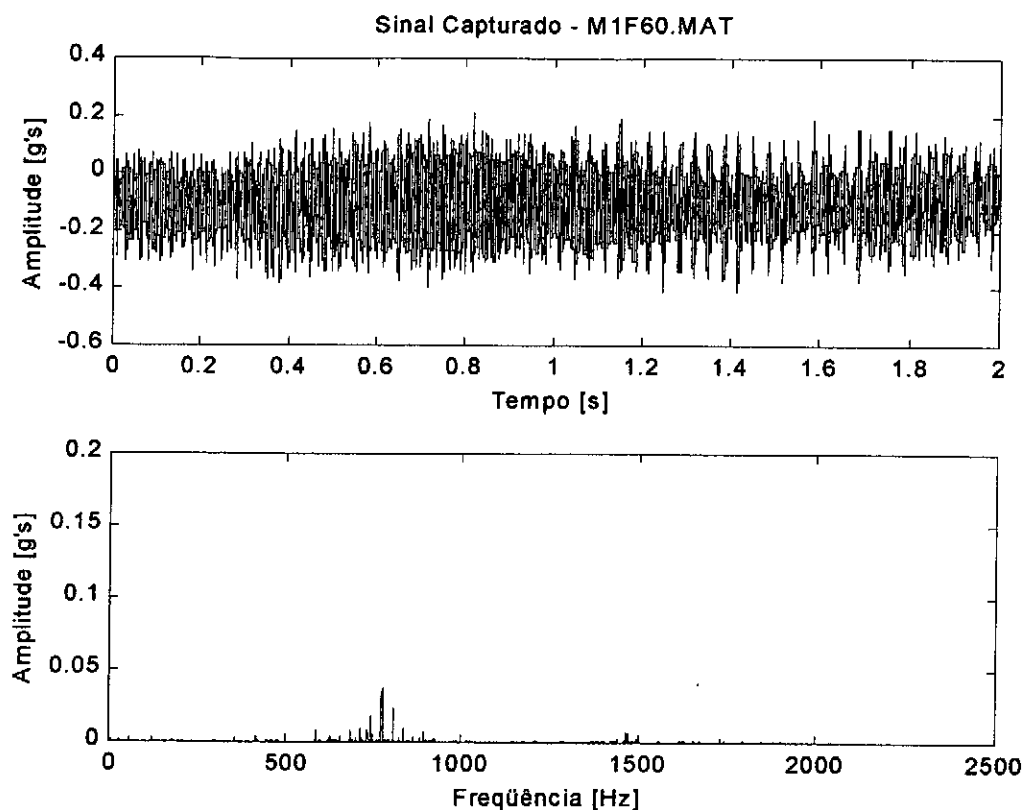


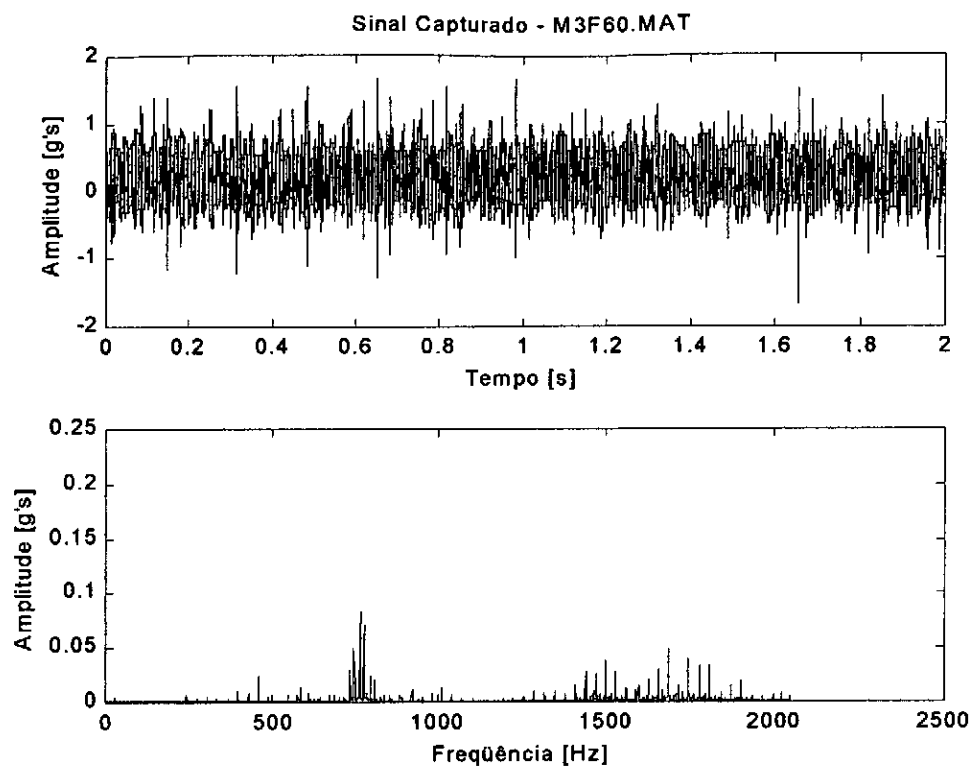
Fig. 4.10. Espectro do envelope. Presença de defeito na BPFO, defeito G3.

Na seqüência a análise foi feita sobre a pista interna. Nesta prática aplicou-se a freqüência de 60Hz no inversor de freqüências. O primeiro sinal obtido é apresentado na Fig. (4.11).

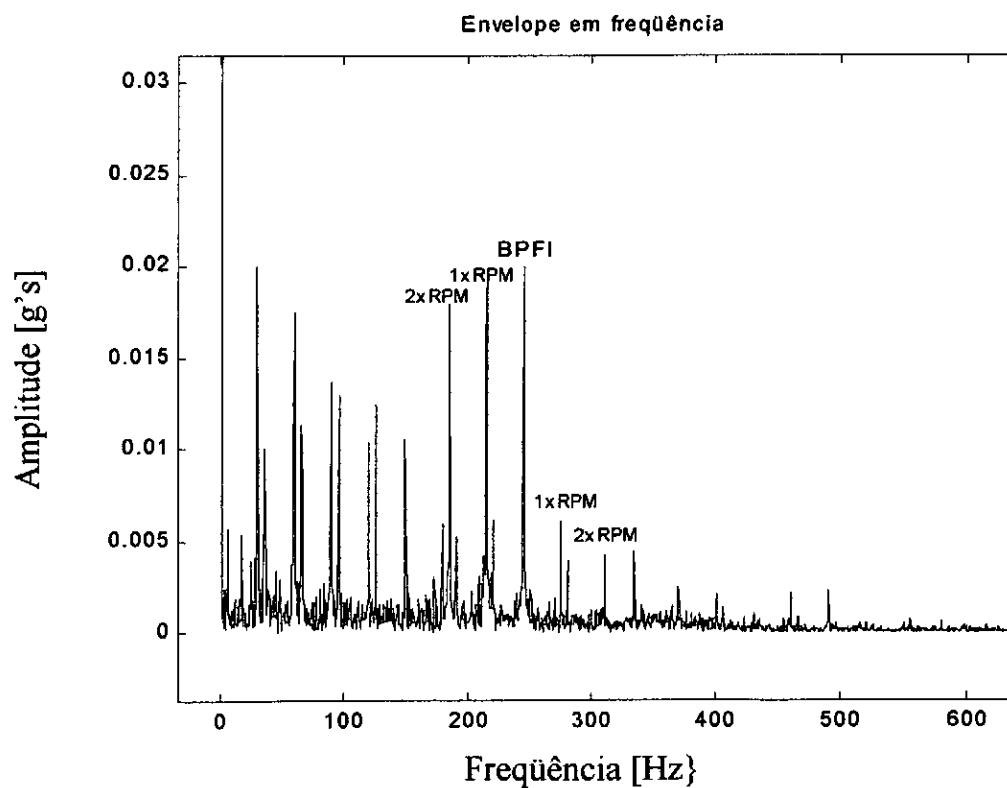


*Figura 4.11. Espectro do envelope. Identificação da BPFI, defeito G0.*

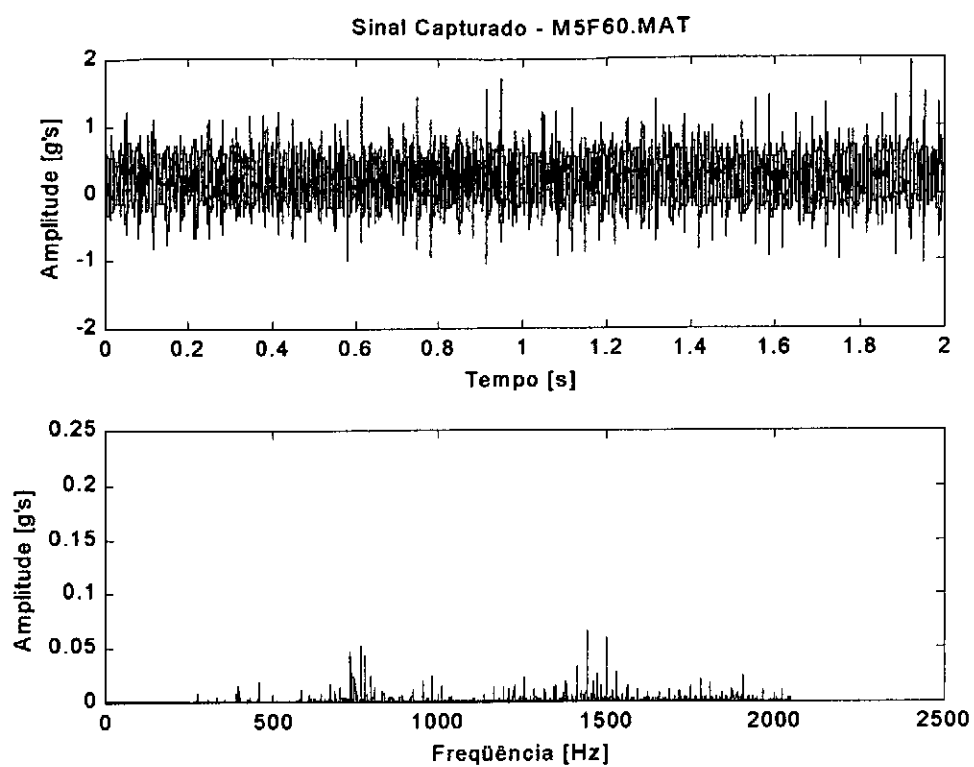
Em seguida foi inserindo o defeito na pista interna, os sinais do defeito alteram o espectro, conforme as figuras (4.12), (4.13) e (4.14). Deve ser observado que nas Figuras (4.13), (4.14), (4.15), (4.16), (4.17) e (4.18), a expressão  $1xRPM$ , significa que há uma banda lateral distante da freqüência do defeito, no caso a BPFI, 1, 2 vezes a rotação do eixo.



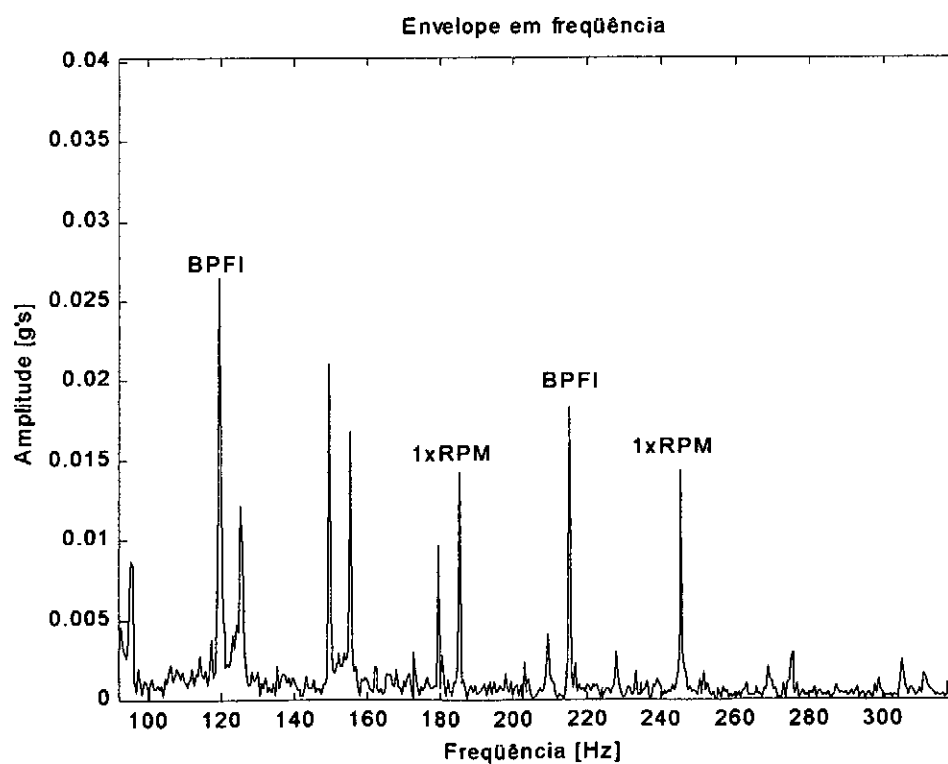
*Figura 4.12. Espectro do envelope. Identificação da BRFI, defeito G2.*



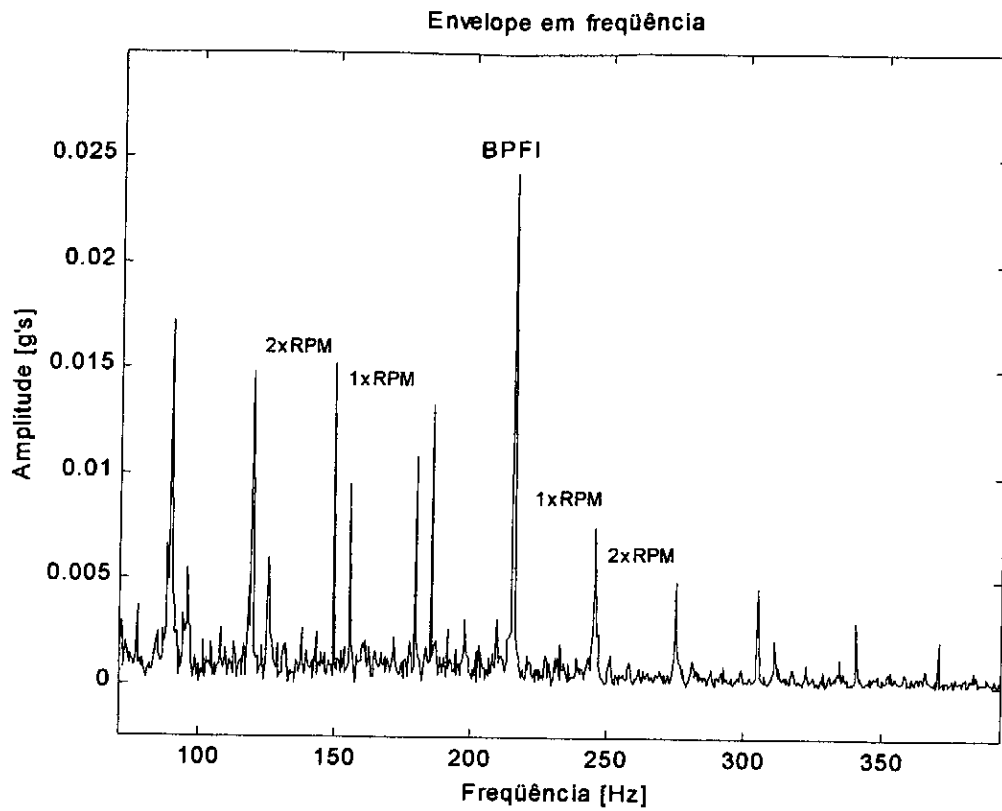
*Figura. 4.13. Espectro do envelope. Identificação da BRFI, G2.*



*Figura. 4.14. Espectro do envelope. Identificação da BPFI, defeito G3.*

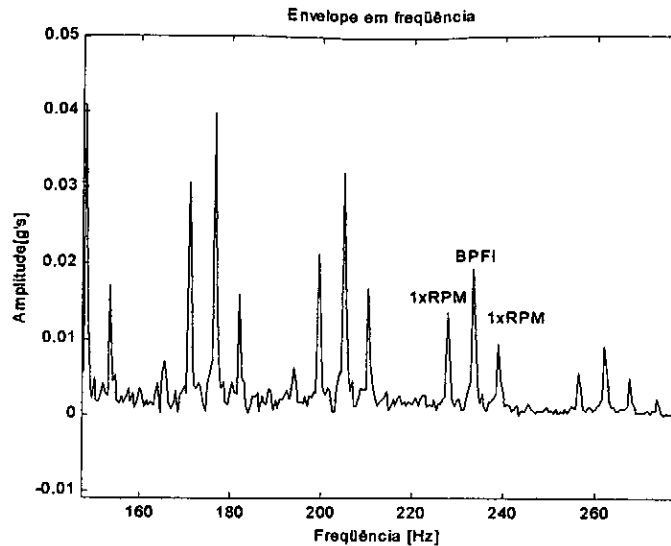


*Figura 4.15. Espectro do envelope. Identificação da BPF1, defeito G3.*

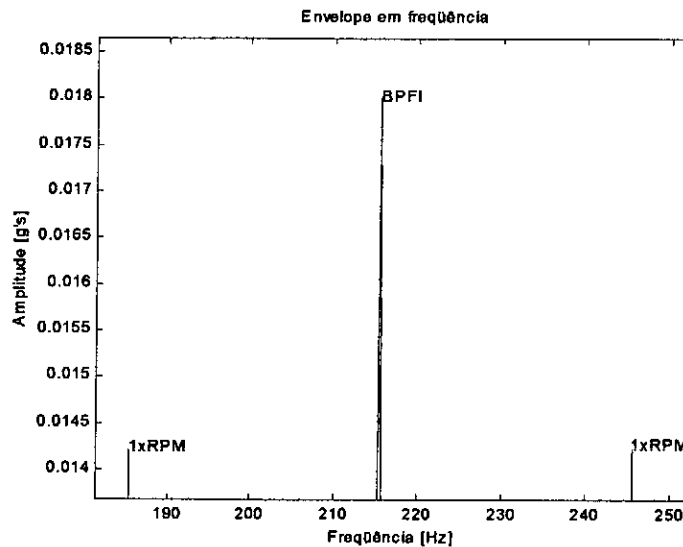


*Figura 4.16. Espectro do envelope. Identificação da BPF1, defeito G3.*

Conforme visto na teoria, quando há um agravamento do defeito, há um aumento na quantidade de bandas laterais, Fig. (4.16). Esta situação tende a piorar com o aumento do defeito, Fig. (4.17).



*Figura 4.17. Espectro do envelope. Identificação da BPF1, defeito G3.*



*Figura 4.18. Espectro do envelope. Identificação da BPF1, defeito G3.*

A Fig. (4.18) é uma vista mais especializada do espectro do envelope, onde é possível verificar o defeito na pista interna e as bandas laterais.

## 4.2 Investigação do Comportamento da Curtose

O coeficiente da curtose é utilizado para detectar defeitos em sua fase inicial. Investiga-se neste ponto o coeficiente como ele é normalmente aplicado-se mais outras formas. Estas com o objetivo de caracterizar outras formas de avaliação de defeitos.

Fez-se a curtose do sinal puro, sem nenhum tipo de filtro, e este é conhecido como global,  $K_{\text{global}}$ . Aplicou-se o método sobre o sinal filtrado, determinado como  $K_{\text{xf}}$  e sobre o envelope,  $K_{\text{hl}}$ . Normalizou-se a curtose através de uma relação envolvendo a variância, denominado de  $K_{\text{n}}$ , e pelo valor rms, este sendo denominado como  $K_{\text{rms}}$ .

A seguir é apresentado o resultado das medições, onde se podem constatar as variações da curtose, e os novos parâmetros propostos, nas diversas rotações. Primeiramente as Figuras (4.19), (4.20), (4.21) e (4.22) apresentam a variação da curtose com o aumento gradual do defeito introduzido, para as diversas rotações. Percebe-se que há uma grande sensibilidade do parâmetro relativo a variância.

A Fig. (4.19) foi obtida com base nos dados da primeira medição. Neste momento o rolamento estava em boas condições. Nesta comparação o parâmetro  $K_{\text{rms}}$  apresentou uma certa distorção, o que gerou uma certa desconfiança na sua utilização.

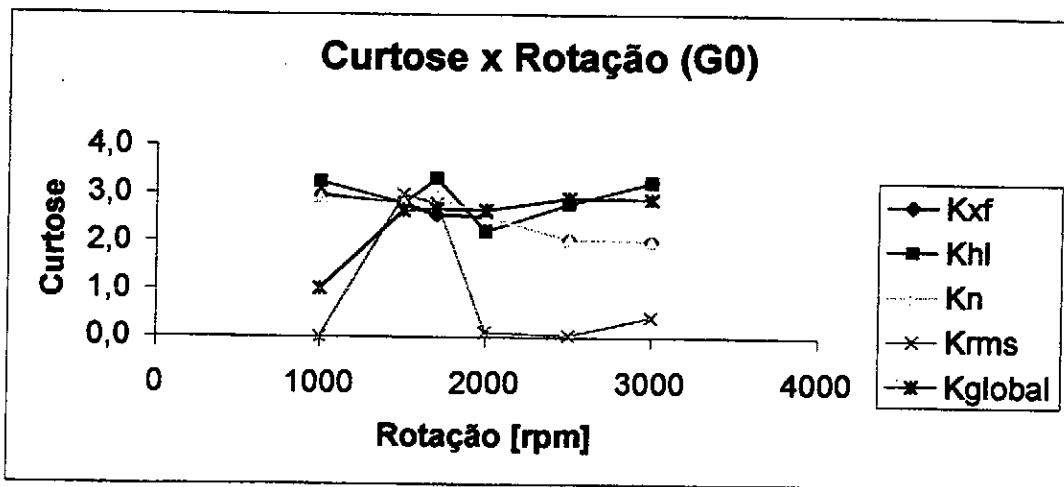


Figura 4.19. Curtose do rolamento sem defeito.

Com a inserção do defeito Fig. (4.20), verifica-se a sensibilidade do parâmetro  $K_{\text{n}}$ , podendo ser tomado como um indicativo do agravamento das condições do equipamento, com o aumento da rotação.

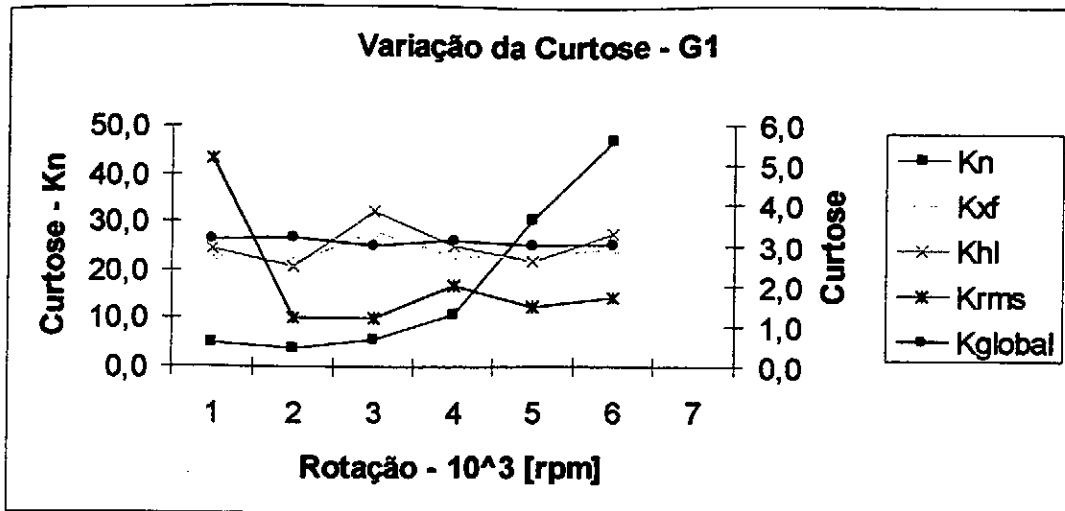


Figura 4.20. Curtose do rolamento com grau G1. Defeito superficial.

Os demais parâmetros se apresentaram pouco sensíveis para este tipo de comparação. Comparando as Figuras (4.20), (4.21) e (4.22), fica bem caracterizado a tendência de Kn e dos demais parâmetros.

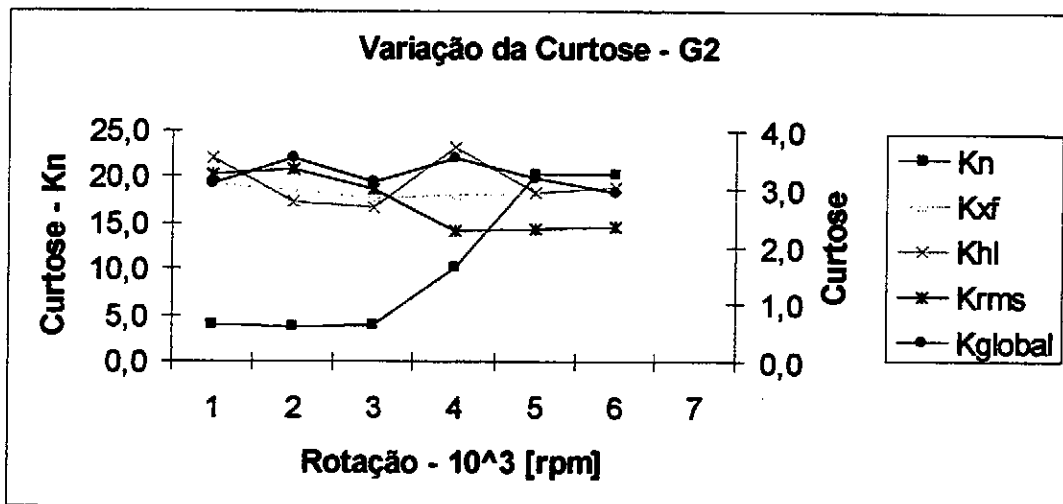


Figura 4.21. Curtose do rolamento com grau G2. Defeito um pouco mais profundo.

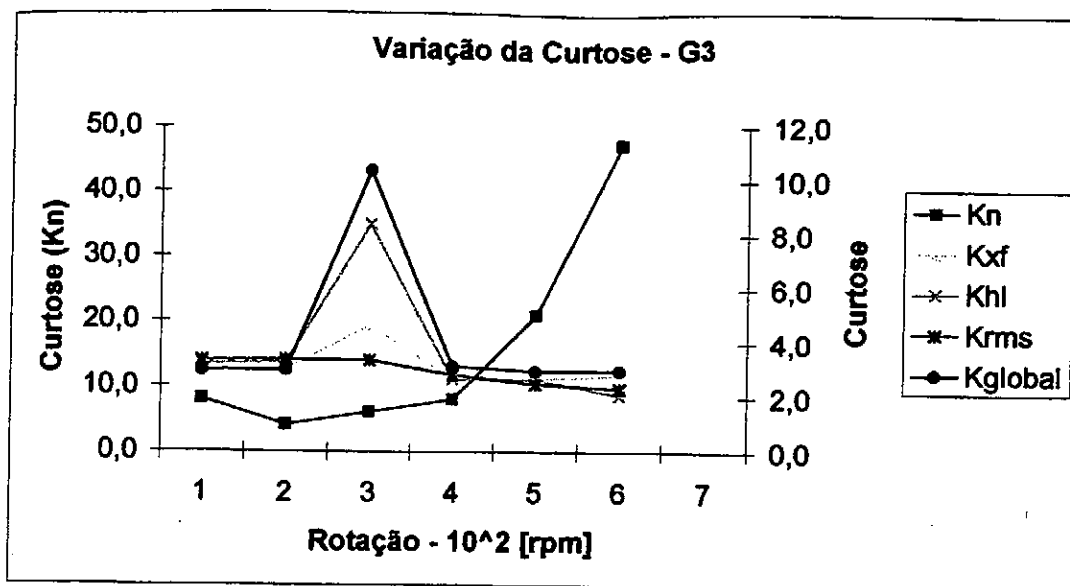


Fig. 4.22. Curtose do rolamento com grau G3. Defeito profundo.

A outra comparação feita foi quanto ao efeito do agravamento do defeito em cada uma das rotações. O que pode ser observado nas Figuras de (4.23) a (4.24).

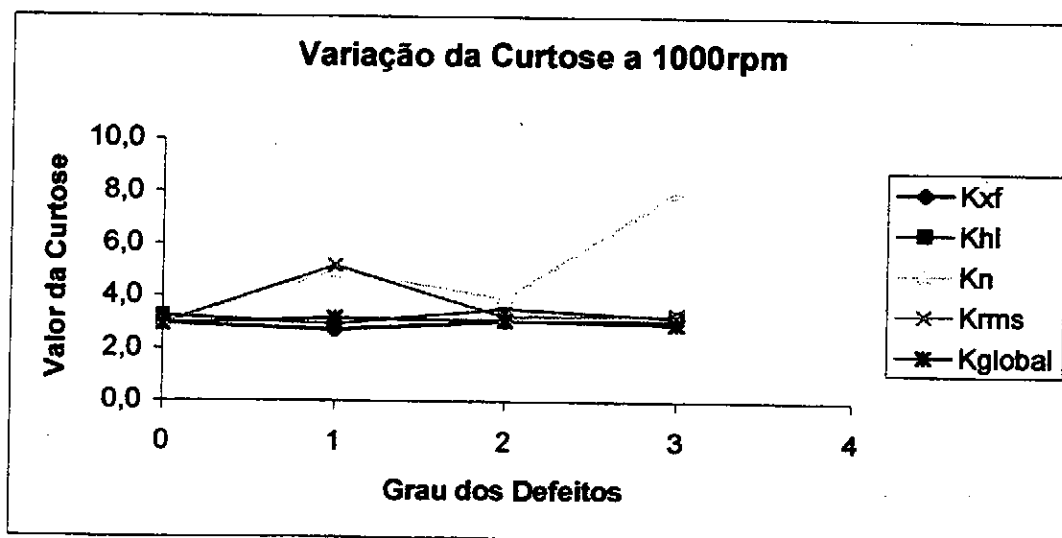


Figura 4.23. Variação da Curtose a 1000rpm. Variação do Defeito.

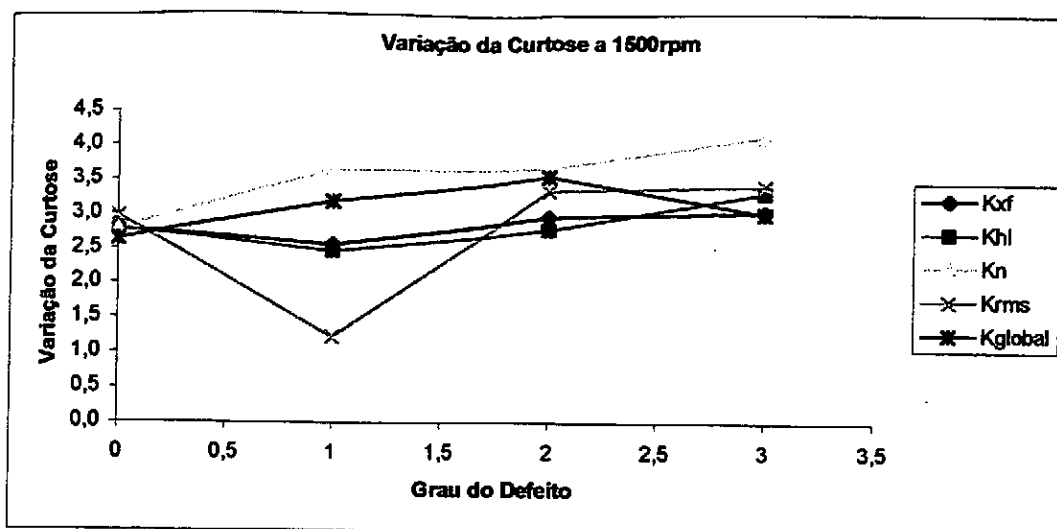


Fig. 4.24. Variação da Curtose a 1500rpm. Variação do Defeito.

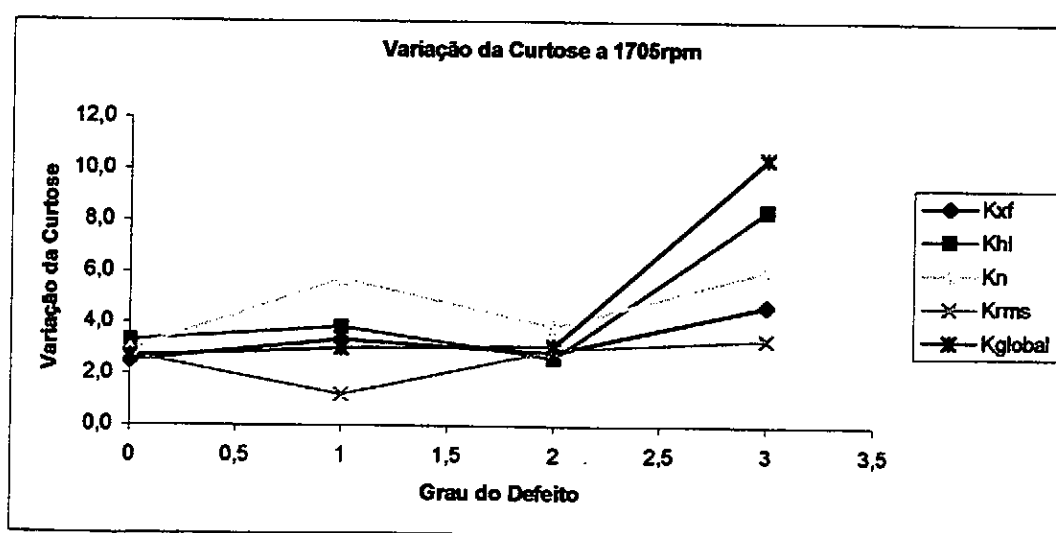
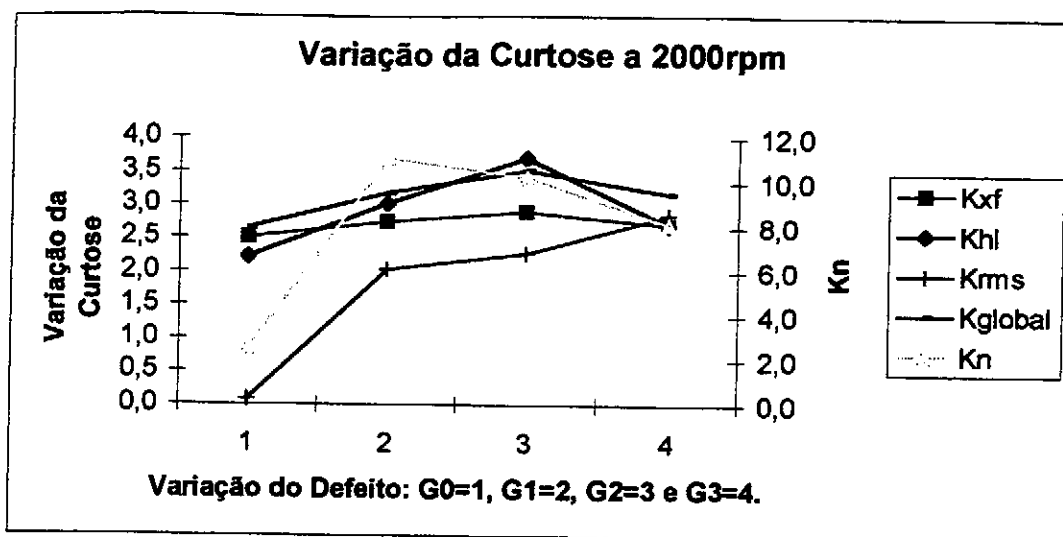


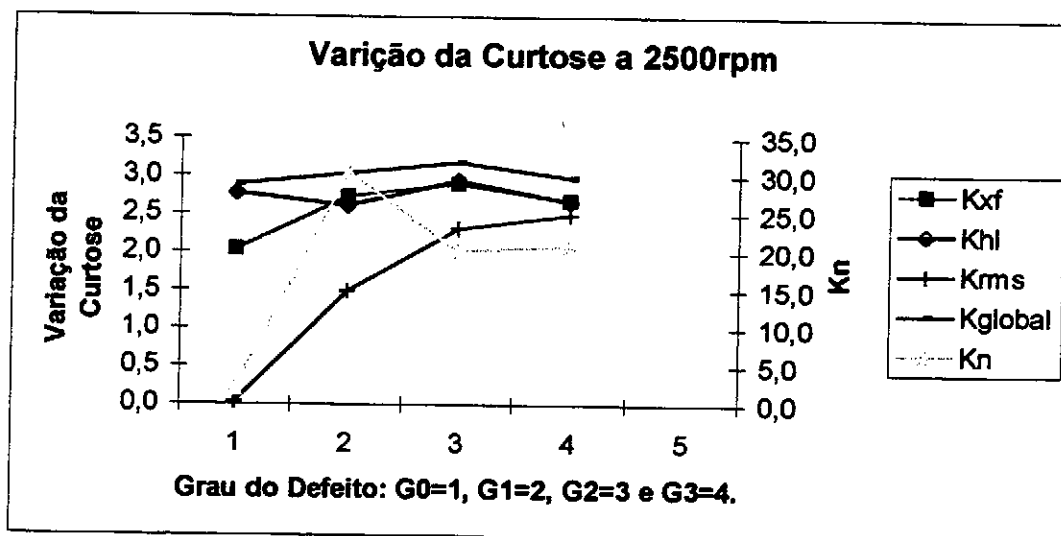
Fig. 4.25. Variação da Curtose. Rotação fixa em 1705rpm.

A Fig. (4.26) mostra que o Kn começa a apresentar certa distorção, neste tipo de comparação, Krms, começa a mostrar uma certa sensibilidade. Verifica-se que este

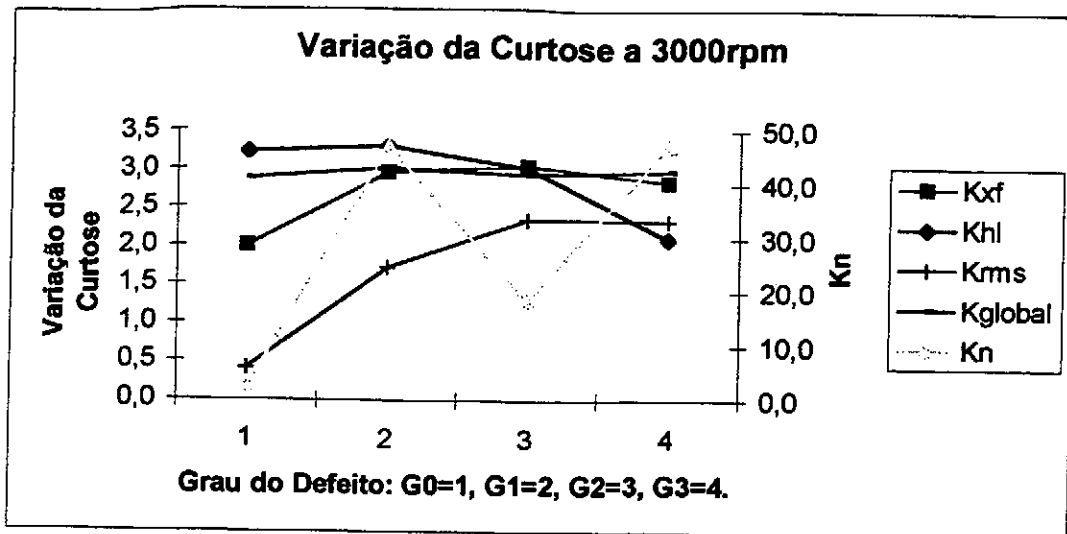
mesmo comportamento continua nas Figuras (4.26), (4.27) e (4.28). Os graus de defeitos apresentados são:  $G0=1$ ,  $G1=2$ ,  $G2=3$  e  $G3=4$ , nas Figuras (4.26), (4.27) e (4.28).



*Figura 4.26. Curtose do rolamento. Rotação fixa em 2000rpm.*



*Figura 4.27. Variação da Curtose a 2500rpm. Variação do Defeito.*



*Figura 4.28. Variação da Curtose a 3000rpm. Variação do Defeito.*

Observa-se que o valor de  $K_{rms}$  apresenta uma boa sensibilidade a partir de uma determinada rotação, destacando ainda mais os defeitos incipientes. Os parâmetros  $K_{xf}$ ,  $K_{hl}$  e  $K_{global}$ , em ambas as comparações se apresentaram uma consistência maior, pois não sofreram tanta variação nas duas situações.

A variação nos resultado deve-se ao fato da falta de carregamento no eixo, fazendo com que os valores para os parâmetros da curtose sofressem uma inconstância. No entanto, percebe-se que além dos parâmetros normalmente utilizados, ou seja,  $K_{xf}$ ,  $K_{hl}$  e  $K_{global}$ ,  $K_n$  realça a Curtose conforme a variação da rotação, por outro lado,  $K_{rms}$  realça a Curtose em rotações fixas, porém, esta hipótese é válida a partir de uma certa rotação.

## **CAPÍTULO 5**

### **Conclusão**

#### **5.1 Considerações finais**

Os resultados alcançados com a análise do envelope, permitem afirmar que esta técnica é uma ferramenta muito poderosa, pois possibilita a observação das fontes causadoras de defeitos, mais seletivamente do que uma análise do espectro direto. Com a facilidade proporcionada pelos processadores rápidos dos computadores modernos, tornou-se viável a elaboração de rotinas de programação, com a qual pode-se fazer vários tipos de comparativos, extraíndo resultados de uma quantidade considerável de dados, os quais além de tornar a análise mais precisa agilizam a tomada de decisão. Percebe-se, no entanto, que esta técnica não é recomendável em baixas frequências, pois os resultados não são tão diferentes quando relacionados com o espectro direto. Como foi visto, influências de outras fontes de ruídos, tais como problemas com desbalanceamento e desalinhamento, engrenamento e passagem de pás, devido ao seu conteúdo de energia, tendem a encobrir o espectro, mascarando os sinais de defeitos nos rolamentos.

Com relação ao Método da Curtose, os dois novos parâmetros se mostraram bem característicos. O parâmetro normalizado pela variância mostrou uma certa pontecialidade no acompanhamento do defeito com a variação da rotação. Ele é uma forma de visualizar a evolução de energia produzida de acordo com a variação da

rotação. Auxiliando na avaliação das condições do rolamento, servindo como critério de alarme. Já o parâmetro normalizado pelo valor rms, apresentou alguma potencialidade para defeitos generalizados, por constatar o aumento do nível de energia(Pachaud,1997). Como foi possível observar, a partir de uma determinada rotação, ele apresentou uma boa sensibilidade aos defeitos. Esta característica possibilita o acompanhamento de defeitos generalizados, para os quais a curtose não se mostra tão sensível.

A Curtose do sinal global é fortemente influenciado por ruídos, e portanto não seria muito aconselhável tomá-lo como parâmetro de julgamento de vida do rolamento. Ao contrário, a Curtose do sinal filtrado e do envelope são recomendáveis, pois o cálculo é feito aonde se apresentam os sinais de defeitos dos rolamentos.

O programa desenvolvido foi essencial para obtenção dos resultados. O tratamento dos dados se tornou bastante ágil, possibilitando trabalhar com vários arquivos de dados em um prazo relativamente curto.

## **5.2 Proposição para novos trabalhos**

Como proposta para novas pesquisas, seria bastante interessante trabalhar com os coeficientes propostos, nas condições de carregamento e sob defeitos generalizados. Verificar a possibilidade de relacionar o terceiro momento estatístico, o coeficiente de Skewness, a fim de obter um parâmetro que identifique, além de defeitos de perda de material e desgaste, defeitos geométricos. O desenvolvimento de softwares que popularizem a manutenção preditiva é também incentivado.

## Referências Bibliográficas

Antoniolli, E. B., 1999. **Estudo comparativo de técnicas de medição e análise de vibrações para a manutenção preditiva em mancais de rolamento.** Florianópolis. 122f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.

Baille, D. C. e Mathew, J., 1995. **A comparison of autoregressive modeling techniques for fault diagnosis of rolling element bearing.** *Mechanical Systems and Signal Processing*, p. 1-17.

Barclay, J., Wei, J., 1994. General alarm guidelines for enveloped acceleration measurements. **Revolutions – SKF**, v.6, n.2 p. 66.  
[www.bently.com/mktreference.htm](http://www.bently.com/mktreference.htm).

Benjamin, J. R. e Cornell, C. Allin., (1972). **Probability, Statistics, and decision for civil engineers.** New York: McGrall Hill

Botö, P. A., 1971. Detection of bearing damage by shock pulse measurement. **Ball Bearing Journal**, v. 167, p. 1-7, Gothenburg,

Braun, S. e Datner, B., 1979. Analysis of roller/ball bearing vibrations. **Journal of Mechanical Design**, Transactions of the ASME, v. 101, p. 118-125, jan.

- Brie, D., 1999. **Modelling of the spalled rolling element bearing vibration signal: and overview and some new results.** Mechanical Systems and Signal Processing, p. 353-369.
- CHARLOTTE, TECNICAL ASSOCIATES OF, 1993 **IRD Mechanalysis Level II.** Manual do curso de Análise de vibraçõesavançada.
- Courrech, J., 2000. Análise do Envelope para detecção efetiva de defeito em rolamentos: verdade ou ficção? **Nova Manutenção y Qualidade**, n. 30, p. 6-9 a. 7.
- Dally, J. et al., 1993. **Instrumentation for engineering measrements.** 2ed. New York: John Willey & Sons.
- Doebelin, E. O., 1990. **Measurement systems: application and design.** 4ed. New York: McGrall-Hill.
- Fackrell, J. W. A. et al., 1994. **The interpretation of the bispectra of vibration signals-II. Experimental results and application.** Mechanical Systems and Signal Processing, p. 251-264.
- Feldman, M. (1993). **Non-linear system vibration analysis using Hilbert Transform –I: free vibration analysis methodo 'FREEVIB'.** Mechanical Systems and Signal Processing, pp. 119-127.

Feldman, M. (1994). **Non-linear system vibration analysis using Hilbert Transform –II: forced vibration analysis methodo 'FREEVIB'**. Mechanical Systems and Signal Processing, pp. 309-318

Harris, T. A., 1991 **Rolling bearing analysis**. 3ed. New York: John Wiley & Sons.

Ho, D. e Randall, R. B., 2000. **Optimisation of bearing diagnostic thecnique using simulated and actual bearing fault signals**. Mechanical Systems and Signal Processing, p. 763-788.

Jones, B., (1999). **Vibration help find faulty componets: vibration monitoring equipament helps engineers catch beraring defects early preventing unexpected machine shutdowns**. Mechanical Design, pp85-88.

Kreyszig, E., 1999 **Advanced engineering mathematics**. 8ed. New York: John Wiley & Sons.

Kurfess, Y. L. e Liang, S. Y., 2000. **Stochastic prognostics for rolling element bearing**. Mechanical Systems and Signal Processing, p. 747-762.

Li, Y. et al., 1999. **Stochastic prognostics for rolling element bearing**. Mechanical Systems and Signal Processing.

Li, Y. et al., 2000. **Adaptive prognostic for rolling element bearing.** Mechanical Systems and Signal Processing, p. 103-113.

Lima, N. N. da C., 1985. **Manutenção preditiva: um estudo sobre detecção de falhas em engrenagens através de medições e análise de sinais de vibrações.** Florianópolis. 140f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – PPEGEM, UFSC.

Logan, D. B. e Mathew, J.,1995. **Using the correlation dimension for vibration fault diagnosis of rolling element bearing-I. Selection of experimental parameters.** Mechanical Systems and Signal Processing, p. 241-250.

Logan, D. B. e Mathew, J.,1996. **Using the correlation dimension for vibration fault diagnosis of rolling element bearing-II. Selection of experimental parameters.** Mechanical Systems and Signal Processing, p. 251-264.

Martin H. R. e Honarvar, F., 1984. **Application of Statistical moments to bearing failure detection.** Applied Acoustics, v. 44, p. 67-77, Great Britain.

Martins, L. G., 1985. **Detecção de defeitos em rolamentos através do processamento e análise de sinais de vibrações.** Florianópolis. 106f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – PPEM, UFSC.

McFadden P. D. e Smith, J. D., (1983). **Model for the vibration produced by a single point defect in rolling element bearing.** Journal of Sound and Vibration, pp. 69-82.

McFadden, P. D. e Smith, J. D., (1984a). **Model for the vibration produced by a single point race in rolling element bearing.** Journal of Sound and Vibration, pp. 69-82.

McFadden, P. D., e Smith, (1984b). **Vibration monitoring of rolling element bearings by the high frequency resonance technique a review.** Journal of Sound and Vibration.

McFadden, P. D. e Smith, J. D., (1985). **The vibration produced by multiple points defects in rolling element bearing.** Journal of Sound and Vibration, pp. 263-273.

Mechefske, C. K. e Matchw, J., 1994. **Fault detection and diagnosis in low speed rolling element bearing using inductive inference classification.** Mechanical Systems and Signal Processing, p. 275-286.

Mirshawka, V., 1991. **Manutenção preditiva: caminho para zero defeitos.** Rio de Janeiro : Makron,McGraw-Hill,.

Mitchell, J. S., 1993. **Introduction to machinery analysis and monitoring.** 2ed. Tulsa: PennWell Books.

- Monk, R., 1972. **Vibration gives warning of mechanical faults.** Processing Engineering, v. 53, p135-137, nov.
- Nunes, M. A. da C., 1989. **Diagnóstico de defeitos em rolamentos pela técnica do envelope.** Florianópolis. 109f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – PPEM, UFSC.
- Nunes, R. A. S., 1997. **Manutenção preditiva através da análise de vibrações.** Curitiba, p56. Monografia(Graduação em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Paraná.
- Pachaud, C. , 1997. **Crest factor and kurtosis contributions to indentify defects induting periodical impulsive forces.** Mechanical Systems and Signal Processing, p. 903-716.
- Parker, B. E. et al., 2000. **Fault diagnostics using statistical change detection in the bispectral domain.** Mechanical Systems and Signal Processing, p. 561-570.
- Piñeyro, J. et al., 2000. **Effectiveness of new spectral tools in the anomaly detection of rolling element bearings.** Mechanical Systems and Signal Processing, p. 276-279.
- Pozzi, D. M., 1991. **Sistemas para gerenciamento de dados de monitoração de máquinas rotativas em indústrias.** Rio de Janeiro. 176f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – COPPE/UFRJ, Universidade Federal de Santa Catarina.

Rantall, R. B. e Me, Y. G., 1996. **Masking effects in digital envelope analysis of faulty bearing signals.** ImechE, C500/097/96, p. 351-359.

Ruffini, J. A., 1963. **Bearing noise.** Machine design, v11-8, p. 232-235, may.

Santos, S. J., 1996. **Análise de Vibrações: módulo I.** Curitiba: Preditiva Engenharia.

Schaefer, R. M., 2000. **Rolamentos: sua importância e funções.** Manutenção y Qualidade, a.7, n. 29, pp. 14.

Shibata, K. et al., 1999. **Fault diagnosis for rotating machinery through visualisation of sound signals.** Mechanical Systems and Signal Processing, p. 229-241.

Shiroishi, J et al., 1997. **Bearing condition diagnostics via vibration and acoustic emission measurements.** Mechanical Systems and Signal Processing, p. 693-705.

Staroswiecki, M.,1999. **Quantative and qualitative models for fault detection and isolation.** Mechanical Systems and Signal Processing, p. 301-325.

Taylor, J. I, 1980. **Identification of bearing defects by spectral analysis.** Journal of mechanical design, v102, p. 199-205, apr.

Vargas, R. T., Bistafa, S. R., 1996. **Um estudo experimental sobre detecção e diagnóstico de falha em rolamentos por medição e análise de sinais acústicos e vibratórios.** Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP-Dpto de Eng<sup>a</sup> Mecânica, BT/PMC/88, São Paulo.

Wang, Y. F. e Kootsookos, P. J., 1997. **Modeling of low shaft speed bearing fault for condition monitoring.** Mechanical Systems and Signal Processing, p. 415-426.

White, G., 1991. **Amplitude demodulation: a new tool for predictive maintenance.** Sound and Vibration. , p. 14-19.

Wowk, V., 1991. **Machinery vibration: measurement and analysis.** New York: Book Mart Press.

## ANEXO I

Segue neste anexo as tabelas Tab. (A-1) a Tab. (A-8) referente a variação do Coeficiente da Curtose para cada defeito, para cada rotação.

Tab. A-1. Variação da Curtose aplicada ao Sinal filtrado e no Sinal do Envelope, conforme o aumento do defeito 1000rpm

Grau do Defeito	Kxf	Khl	Kn	Krms	Kglobal
0	2,9522	3,2386	2,9522	2,9130	2,9251
1	2,7352	2,9456	5,0000	5,1853	3,1683
2	3,0781	3,5376	3,9206	3,2403	3,0941
3	3,0596	3,2165	8,0557	3,3200	2,9807

Tab. A-2. Variação da Curtose aplicada ao Sinal filtrado e no Sinal do Envelope, conforme o aumento do defeito 1500rpm

Grau do Defeito	Kxf	Khl	Kn	Krms	Kglobal
0	2,7779	2,7857	2,7779	2,9674	2,6375
1	2,5747	2,4739	3,6612	1,2320	3,2018
2	2,9539	2,7638	3,6547	3,3310	3,5309
3	3,0269	3,3071	4,1178	3,4079	3,0074

Tab. A-3. Variação da Curtose aplicada ao Sinal filtrado e no Sinal do Envelope, conforme o aumento do defeito 1705rpm

Grau do Defeito	Kxf	Khl	Kn	Krms	Kglobal
0	2,5395	3,3126	2,9270	2,7780	2,6708
1	3,3694	3,8625	5,7446	1,2126	3,0310
2	2,8438	2,6618	3,8825	2,9887	3,1204
3	4,6951	8,4003	6,0686	3,3811	10,3914

**Tab. A-4. Variação da Curtose aplicada ao Sinal filtrado e no Sinal do Envelope, conforme o aumento do defeito 2000rpm**

Grau do Defeito	Kxf	Khl	Kn	Krms	Kglobal
0	2,5040	2,2082	2,5040	0,0811	2,6458
1	2,7327	3,0123	11,0638	2,0187	3,1643
2	2,8966	3,7027	10,2256	2,2710	3,5148
3	2,7077	2,7056	8,1405	2,8528	3,1666

**Tab. A-5. Variação da Curtose aplicada ao Sinal filtrado e no Sinal do Envelope, conforme o aumento do defeito 2500rpm**

Grau do Defeito	Kxf	Khl	Kn	Krms	Kglobal
0	2,0410	2,7712	2,0410	0,0319	2,8954
1	2,7329	2,6136	30,5291	1,4906	3,0386
2	2,8961	2,9429	20,2200	2,3095	3,1874
3	2,6819	2,6699	20,8701	2,4940	2,9825

**Tab. A-6. Variação da Curtose aplicada ao Sinal filtrado e no Sinal do Envelope, conforme o aumento do defeito 3000rpm**

Grau do Defeito	Kxf	Khl	Kn	Krms	Kglobal
0	1,9948	3,2203	1,9948	0,4146	2,8779
1	2,9518	3,2972	47,0717	1,7248	3,0154
2	3,0388	3,0134	18,4660	2,3406	2,9325
3	2,8265	2,0867	47,2708	2,3189	2,9694

**Tab. A-7. Variação da Curtose para a Assinatura – G0**

Rotação rpm	Kxf	Khl	Kn	Krms	Kglobal
1000	2,9522	3,2386	2,9130	0,0037	1,0037
1500	2,7779	2,7857	2,7779	2,9674	2,6375
1705	2,5395	3,3126	2,9270	2,7780	2,6708
2000	2,504	2,2082	2,504	0,0811	2,6458
2500	2,041	2,7712	2,041	0,0319	2,8954
3000	1,9948	3,2203	1,9948	0,4146	2,8779

**Tab. A-8. Variação da Curtose para defeito grau 1 - G1.**

Rotação rpm	Kxf	Khl	Kn	Krms	Kglobal
1000	2,7352	2,9456	5,0000	5,1853	3,1683
1500	2,5747	2,4739	3,6612	1,2320	3,2018
1705	3,3694	3,8625	5,7446	1,2126	3,0310
2000	2,7327	3,0123	11,0638	2,0187	3,1643
2500	2,7329	2,6136	30,5291	1,4906	3,0386
3000	2,9518	3,2972	47,0717	1,7248	3,0154

**Tab. A-9. Variação da Curtose para defeito grau 2 - G2**

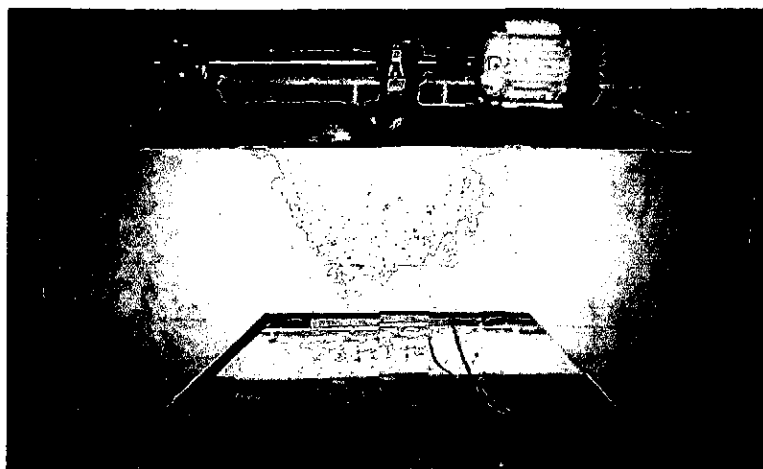
Rotação rpm	Kxf	Khl	Kn	Krms	Kglobal
1000	3,0781	3,5376	3,9206	3,2403	3,0941
1500	2,9539	2,7638	3,6547	3,3310	3,5309
1705	2,8438	2,6618	3,8825	2,9887	3,1204
2000	2,8966	3,7027	10,2256	2,271	3,5148
2500	2,8961	2,9429	20,22	2,3095	3,1874
3000	3,0388	3,0134	20,22	2,3406	2,9325

**Tab. A-10. Variação da Curtose para defeito grau 3 – G3**

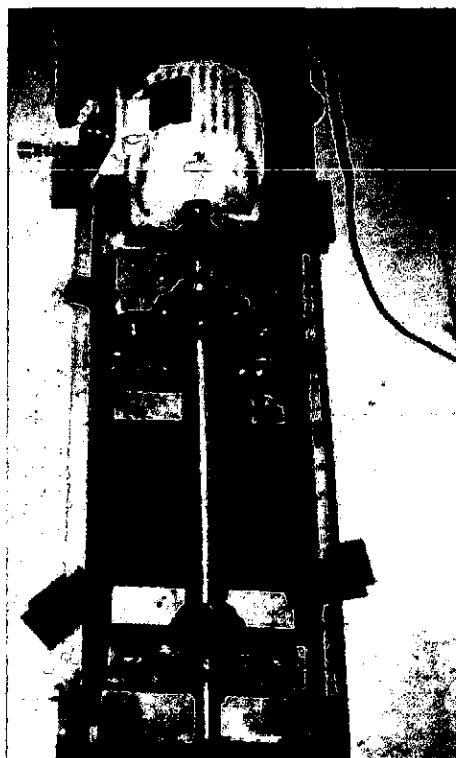
<b>Rotação rpm</b>	<b>Kxf</b>	<b>Khl</b>	<b>Kn</b>	<b>Krms</b>	<b>Kglobal</b>
<b>1000</b>	<b>3,0596</b>	<b>3,2165</b>	<b>8,0557</b>	<b>3,3200</b>	<b>2,9807</b>
<b>1500</b>	<b>3,0269</b>	<b>3,3071</b>	<b>4,1178</b>	<b>3,4079</b>	<b>3,0074</b>
<b>1705</b>	<b>4,6951</b>	<b>8,4003</b>	<b>6,0686</b>	<b>3,3811</b>	<b>10,3914</b>
<b>2000</b>	<b>2,7077</b>	<b>2,7056</b>	<b>8,1405</b>	<b>2,8528</b>	<b>3,1666</b>
<b>2500</b>	<b>2,6819</b>	<b>2,6699</b>	<b>20,8701</b>	<b>2,494</b>	<b>2,9825</b>
<b>3000</b>	<b>2,8265</b>	<b>2,0867</b>	<b>47,2708</b>	<b>2,3189</b>	<b>2,9694</b>

## ANEXO II

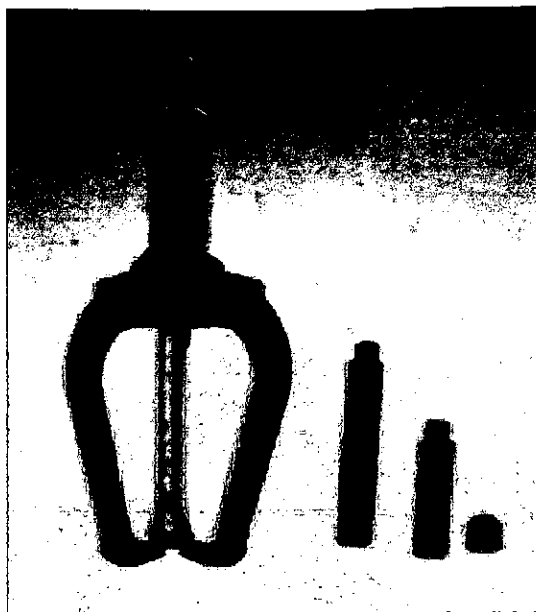
Neste anexo são apresentadas as figuras, onde estão as fotos da bancada de testes e alguns dos instrumentos utilizados.



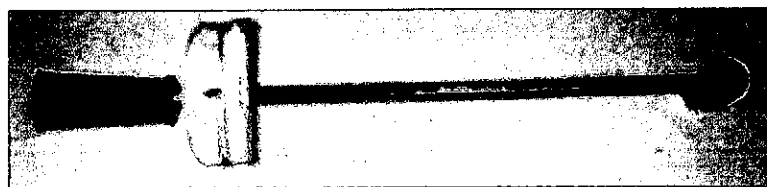
*Fig. A.1. Foto da Bancada de Testes.*



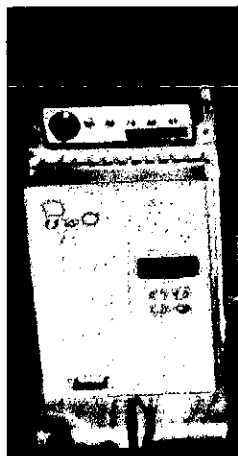
*Fig. A.2. Foto da Bancada de Testes. Vista Superior.*



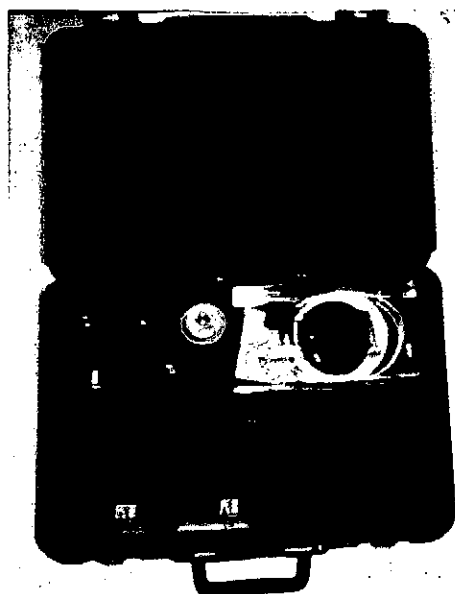
*Fig. A.3. Sacador de Rolamentos SKF.*



*Fig. A.4. Torquímetro D-DTOOLS, mod. 2957 w4335.*



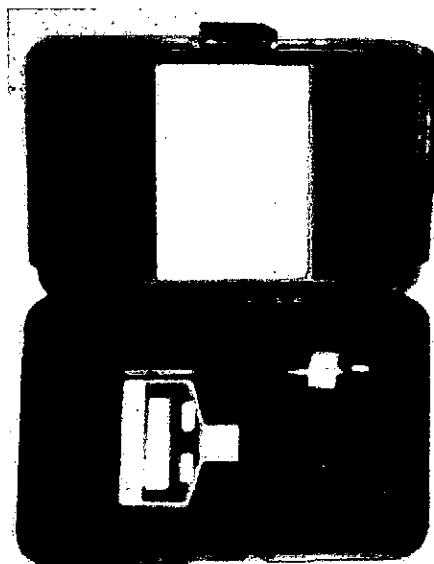
*Fig. A.5. Inversor de Frequências WEG, mod. CFW-07 com dispositivo para ajuste manual dos parâmetros.*



*Fig. A.6. Martelo de Impacto PCB, mod. 086C20-10635.*



*Fig. A.7. Calibrador PCB, mod. 394C06 Held Hand.*



*Fig. A.8. Tacômetro digital, mod. 1726 – AMETEK.*