

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Detecção de Falhas em Rolamentos por Análise de
Vibração**

**Autor: Roberto de Araújo Bezerra
Orientador: Prof. Dr. Robson Pederiva**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE PROJETO MECÂNICO**

Detecção de Falhas em Rolamentos por Análise de Vibração

Autor: Roberto de Araújo Bezerra
Orientador: Prof. Dr. Robson Pederiva

Curso: Engenharia Mecânica
Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos e Projeto Mecânico

Tese de doutorado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2004
S.P. – Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

B469d Bezerra, Roberto de Araújo
Detecção de falhas em rolamentos por análise de
vibração / Roberto de Araújo Bezerra .--Campinas, SP:
[s.n.], 2004.

Orientador: Robson Pederiva.
Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Rolamentos de esferas. 2. Processamento de sinais.
3. Filtros adaptativos. 4. Engenharia – Métodos
estatísticos. I. Pederiva, Robson. II. Universidade
Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia
Mecânica. III. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE PROJETO MECÂNICO**

TESE DE DOUTORADO

**Deteccção de Falhas em Rolamentos por Análise de
Vibração**

Autor: Roberto de Araújo Bezerra
Orientador: Prof. Dr. Robson Pederiva

Prof. Dr. Robson Pederiva, Presidente
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP/FEM/DPM

Prof. Dr. . Marcus Antônio Viana Duarte
Universidade Federal de Uberlândia - UFU

Prof. Dr. Vicente Lopes Júnior
Universidade Estadual Paulista - UNESP/ Ilha Solteira

Prof. Dr. Franco Giuseppe Dedini
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP/FEM/DPM

Prof. Dr. Milton Dias Junior
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP/FEM/DPM

Campinas, 29 de julho de 2004.

A minha esposa, a minha mãe, aos meus irmãos e aos sobrinhos.

Agradecimentos

A Deus, que me deu força nos momentos mais difíceis.

Ao Professor Dr. Robson Pederiva, pelo apoio durante o período de orientação do trabalho, e pela amizade demonstrada durante os períodos mais difíceis.

À Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

UFC-CE por terem me dado a oportunidade de realizar este trabalho.

Aos colegas do Departamento de Engenharia Mecânica da UFC, que assumiram as disciplinas por mim lecionadas, permitindo assim o meu afastamento para realização do meu trabalho.

A INA Brasil, que disponibilizou suas bancadas e deu todo apoio, material e técnico necessários para realização do trabalho.

Aos Engenheiros e Técnicos da Engenharia Experimental da INA, em especial a Alexandre e Flávio.

Aos amigos e colegas do Departamento de Projeto Mecânico - DPM em especial a Almiro, Carlos e Sergio pela amizade demonstrada.

A todos que, de forma direta e indireta, contribuíram para conclusão deste trabalho.

Aos meus irmãos Fernanda, Pedro e Verônica e sobrinhos Isaac e Samuel pelo incentivo.

A minha mãe por seu amor e afeto. Não há como retribuir tanta dedicação, o que posso fazer é dizer que só estou concluindo essa importante etapa em minha vida, porque você é uma vencedora.

À Cláudia Maria Caixeta Bezerra, esposa, companheira, amiga, que em poucas palavras seria impossível expressar a minha admiração.

*“Tu é o meu refúgio e a minha
fortaleza, o meu Deus,
em quem confio.”*

Salmo 91:2

*“O conhecimento torna a alma jovem
e diminui a amargura da velhice.
Colhe, pois, sabedoria. Armazena
suavidade para o amanhã.”*

Leonardo da Vinci

Resumo

BEZERRA, Roberto de Araújo, Detecção de Falhas em Rolamentos por Análise de Vibração, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2004. 1xx p. Tese (Doutorado).

Neste trabalho, é feito um estudo comparativo entre diversas técnicas de detecção de falhas em rolamentos por análise de vibração. Inicialmente, as técnicas foram aplicadas a modelos matemáticos de falhas nas pistas interna, externa e nas esferas dos rolamentos; sendo, em seguida, feito um estudo comparativo entre as técnicas. As técnicas foram aplicadas também a rolamentos com falhas induzidas nas pistas e esfera com diferentes tamanhos de falhas e submetidos a diferentes velocidades, para uma melhor compreensão das técnicas. Finalmente, as técnicas foram usadas para o monitoramento da evolução das falhas em um conjunto de doze rolamentos que foram submetidos a condições próximas as de trabalho, o que possibilitou um estudo mais detalhado do processo de evolução dessas falhas. Os resultados obtidos mostraram que, de todas as técnicas utilizadas, o envelope com filtro adaptativo foi a mais eficiente, sendo capaz de detectar pequenos amassamentos e o surgimento de falhas na gaiola. O estudo em condições próximas a realidade possibilitou uma melhor compreensão do processo de evolução das falhas em rolamentos.

Palavras Chave

Falha em Rolamentos, Envelope, Processamento de Sinais, Filtro Adaptativo, Parâmetros Estatísticos.

Abstract

BEZERRA, Roberto de Araújo, Detection of Fault in Rolling Bearing by Analysis of Vibration, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2004. 1xx p. Tese (Doutorado).

In this thesis, it is made a comparative study among several vibration analysis techniques of fault detection. Initially, the techniques were applied to inner and outer race and rolling element mathematical models of faults, and so, it was possible to compare the techniques. It was used the same techniques on the races and rolling elements with different size of induced faults, submitting to different speeds. With those studies it was possible to understand how to use the technique in a better way. Finally, we monitored a group of twelve bearings to analyse the evolution of faults, close to real conditions. The results showed that the most efficient techniques is the envelope with adaptive filter, it detects small dentings and the beginning of cage failure. It was possible to get a better understanding of the failure evolution process in bearings, studying it in close conditions to the reality.

Key Words

Diagnostic of Faults, Rotors, Signal Processing, Wavelets, Neural Networks.

Sumário

Lista de Figuras.....	iv
Lista de Tabelas.....	viii
Nomenclatura	ix
CAPÍTULO 1 - Introdução	
1.1 Introdução.....	1
1.2 Revisão Bibliográfica.....	2
1.2.1 Técnicas no Domínio do Tempo.....	2
1.2.2 Técnicas no Domínio da Frequência.....	4
1.2.3 Técnicas no Domínio do Tempo-Frequência.....	5
1.2.4 Cepstrum.....	6
1.3 Motivação	6
1.4 Objeto de Estudos.....	7
1.5 Objetivo do Trabalho.....	7
1.5.1 Geral.....	7
1.5.2 Específico.....	8
1.6 Descrição do Trabalho.....	8
CAPÍTULO 2 - Falhas em Rolamentos	
2.1 Introdução.....	10
2.2 Distribuição de Cargas nos Rolamentos.....	10
2.3 Relação entre o Carregamento Estático e a Deformação.....	11
2.4 Falhas Comuns em Rolamentos.....	17
2.5 Sinais e Frequências Características de Falhas nos Rolamentos.....	19
2.6 Vibrações Geradas por Defeitos Localizados.....	23

CAPÍTULO 3 - Técnicas de Detecção de Falhas em Rolamentos

3.1 Introdução.....	27
3.2 Técnicas de Identificação de Falhas em Rolamentos por Monitoramento de Vibração no Domínio do Tempo.....	28
3.3 Técnicas de Identificação de Falhas em Rolamentos por Monitoramento de Vibração no Domínio da Frequência.....	33
3.3.1 Método da Energia Residual.....	33
3.3.2 Técnica de Envelope.....	34
3.3.2- Cepstrum.....	48

CAPÍTULO 4 - Aplicação das Técnicas em Modelos Matemáticos

4.1 Introdução.....	50
4.2 Modelo Matemático de Defeitos nos Rolamentos.....	50
4.3 Influência da Velocidade de Rotação e Nível de Ruído nos Parâmetros Estatísticos.....	55
4.4 Aplicação das Técnicas de Detecção de Falhas no Domínio da Frequência nos Modelos Matemáticas de Falhas em Rolamentos.....	63

CAPÍTULO 5 - Aplicação das Técnicas em Rolamento com Falhas Induzidas

5.1 Introdução.....	70
5.2 Falhas induzidas.....	70
5.3 Bancada.....	71
5.4 Influência da Velocidade de Rotação e do Tamanho das Falhas nos Valores dos Parâmetros Estatísticos.....	72
5.5 Aplicação de Técnicas de Detecção de Falhas no Domínio da Frequência a Rolamentos com Falha Induzida.....	81

CAPÍTULO 6 - Ensaios Para Análise de Evolução de Falhas

6.1 Introdução.....	94
6.2 Bancada.....	94
6.3 Análise dos Resultados.....	96
6.3.1 Rolamentos que não apresentaram falhas.....	97

6.3.2 Rolamentos que Apresentaram Endentações na Pista Interna.....	103
6.3.3 Rolamentos que Apresentaram Falhas na Pista Interna – Amassamento.....	108
6.3.4 Rolamentos que Apresentaram Falhas Incipientes na Pista Interna: “Pit”.....	113

CAPÍTULO 7 – Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

7.1 Conclusão.....	118
7.2 Sugestões para futuros trabalhos.....	120

Bibliografia	122
---------------------	-----

Anexos

Anexo 1.....	131
Anexo 2.....	133

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Formas de carregamento no rolamento.....	11
Figura 2.2 – Carregamento em rolamento sem folga.....	12
Figura 2.3 – Carregamento em rolamento com folga axial.....	15
Figura 2.4 – Carregamento no anel interno do rolamento.....	17
Figura 2.5 – Surgimento da falha na superfície de um rolamento.....	18
Figura 2.6 – Freqüências, Dimensões e Ângulo de contato do Rolamento.....	19
Figura 2.7 – Velocidades nos elementos do rolamento.....	20
Figura 2.8 – Impulsos gerados pela passagem de esferas no defeito na pista estacionária....	24
Figura 2.9 – Impulsos gerados pela passagem de esferas no defeito na pista girante.....	25
Figura 3.1 – média, valor rms e pico.....	28
Figura 3.2 – Pico e valor de rms para um rolamento com defeito.....	29
Figura 3.3 – (a) pico e valor rms (b) fator de crista.....	29
Figura 3.4 – Fator K.....	30
Figura 3.5 – Valor de curtose para alguns sinais.....	31
Figura 3.6 – Valores de assimetria de uma distribuição.....	32
Figura 3.7 – Energia residual.....	34
Figura 3.8 – Espectro de Freqüência de um Sinal AM.....	37
Figura 3.9 – (a) sinal portador; (b) sinal modulador; (c) sinal modulado; (d) fft do sinal modulado.....	38
Figura 3.10 – sinal causal (a) sinal causal; (b) função par; (c) função impar.....	39
Figura 3.11 – Demodulação de um sinal; (a) sinal portador; (b) sinal modulador; (c) sinal modulado; (d) envelope do sinal modulado.....	42
Figura 3.12 – Procedimento adotados na técnica de Envelope.....	43
Figura 3.13 – Filtragem de um sinal com ruído.....	44
Figura 3.14 – Diagrama representativo de um filtro adaptativo.....	45
Figura 3.15– Erro quadrático médio.....	46

Figura 3.16 – Diagrama representativo de um filtro adaptativo com entrada única.....	48
Figura 4.1 – Frequência central de ressonância.....	52
Figura 4.2 – Sinal de defeito na pista interna do rolamento.....	53
Figura 4.3 – Sinal de defeito na pista externa do rolamento.....	54
Figura 4.4 – Sinal de defeito na esfera do rolamento.....	55
Figura 4.5 – Rolamento com diferentes níveis de ralação sinal-ruído.....	56
Figura 4.6 – Variação de parâmetros estatísticos em ralação a velocidade e tamanho da falha, (a) Índice RMS; (b) Valor de Pico; (c) Fator de Crista; (d) Fator K.....	57
Figura 4.7– Variação de parâmetros estatísticos em ralação a velocidade e tamanho da falha, (a) Média; (b) Variância; (c) Assimetria; (d) Curtose e (e) Momento de Sexta ordem.....	58
Figura 4.8 – Variação de parâmetros estatísticos em ralação a velocidade e tamanho da falha, (a) Índice RMS; (b) Valor de Pico; (c) Fator de Crista; (d) Fator K.....	59
Figura 4.9 – Variação de parâmetros estatísticos em ralação a velocidade e tamanho da falha, (a) Média; (b) Variância; (c) Assimetria; (d) Curtose e (e) Momento de Sexta ordem.....	60
Figura 4.10 – Variação de parâmetros estatísticos em ralação a velocidade e tamanho da falha, (a) Índice RMS; (b) Valor de Pico; (c) Fator de Crista; (d) Fator K....	61
Figura 4.11 – Variação de parâmetros estatísticos em ralação a velocidade e tamanho da falha,(a) Média; (b) Variância; (c) Assimetria; (d) Curtose e (e) Momento e Sexta ordem.....	62
Figura 4.12 – Energia Residual de Rolamentos com Defeito nas Pistas Interna e Externa e Esfera.....	64
Figura 4.13 – Aplicação da técnica de envelope em um rolamento com defeito na pista Interna.....	65
Figura 4.14 – Aplicação da técnica de envelope em um rolamento com defeito na pista Externa.....	66
Figura 4.14 – Aplicação da técnica de envelope em um rolamento com defeito na esfera..	67
Figura 4.16 – Aplicação do Cepstrum ao sinal de defeito na pista interna.....	68
Figura 4.17 – Aplicação do Cepstrum ao sinal de defeito na pista externa.....	68
Figura 4.18 – Aplicação do Cepstrum ao sinal de defeito na esfera.....	69
Figura 5.1 – Esquema da bancada de ensaios.....	72
Figura 5.2 – Variação de parâmetros estatísticos em ralação a velocidade e tamanho da falha, (a) Índice RMS; (b) Valor de Pico; (c) Fator de Crista; (d) Fator K.....	73

Figura 5.3 – Variação de parâmetros estatísticos em ralação a velocidade e tamanho da falha, (a) Média; (b) Variância; (c) Assimetria; (d) Curtose e (e) Momento de Sexta ordem.....	74
Figura 5.4 – Variação de parâmetros estatísticos em ralação a velocidade e tamanho da falha, (a) Índice RMS; (b) Valor de Pico; (c) Fator de Crista; (d) Fator K.....	75
Figura 5.5 – Variação de parâmetros estatísticos em ralação a velocidade e tamanho da falha , (a) Média; (b) Variância; (c) Assimetria; (d) Curtose e (e) Momento de Sexta ordem.....	76
Figura 5.6 – Variação de parâmetros estatísticos em ralação a velocidade e tamanho da falha, (a) Índice RMS; (b) Valor de Pico; (c) Fator de Crista; (d) Fator K....	77
Figura 5.7 – Variação de parâmetros estatísticos em ralação a velocidade e tamanho da falha, (a) Média; (b) Variância; (c) Assimetria; (d) Curtose e (e) Momento de Sexta ordem.....	78
Figura 5.8 – Variação de parâmetros estatísticos em ralação a velocidade e Tamanho da falha, (a) Índice RMS; (b) Valor de Pico; (c) Fator de Crista; (d) Fator K.....	79
Figura 5.9 – Variação de parâmetros estatísticos em ralação a velocidade e tamanho da falha, (a) Média; (b) Variância; (c) Assimetria; (d) Curtose e (e) Momento de Sexta ordem.....	80
Figura 5.10 – Energia residual de rolamentos com falha, (a) pista interna com falha; (b) pista externa com falha; (c) esfera com falha; (d) gaiola com falha.....	82
Figura 5.11– Aplicação do Filtro do Envelope a um Rolamento com Defeito na Pista Interna.....	83
Figura 5.12– Aplicação do Filtro do Envelope a um Rolamento com Defeito na Pista Externa.....	84
Figura 5.13– Aplicação do Filtro do Envelope a um Rolamento com Defeito na Esfera...	84
Figura 5.14 – Aplicação do Filtro do Envelope a um Rolamento com Defeito na Gaiola.....	85
Figura 5.15 – Aplicação do Filtro do Envelope a um Rolamento com dois defeitos na pista interna.....	86
Figura 5.16 – Aplicação do Filtro do Envelope a um Rolamento com dois defeitos na pista externa.....	87
Figura 5.17 – Aplicação do Filtro do Envelope a um Rolamento com Defeito severo na Pista Interna.....	87
Figura 5.18– Aplicação do Filtro do Envelope a um Rolamento com Defeito severo na Pista Externa.....	88
Figura 5.19– Cepstrum de um sinal de defeito na pista Interna.....	88
Figura 5.20 – Cepstrum de um sinal de defeito na pista externa.....	89

Figura 5.21 – Cepstrum de um sinal de defeito na esfera.....	89
Figura 5.22 – Cepstrum de um sinal de defeito na gaiola.....	90
Figura 5.23 – Cepstrum de um sinal de dois defeitos na pista Interna.....	91
Figura 5.24 – Cepstrum de um sinal de dois defeitos na pista externa.....	91
Figura 5.25 – Cepstrum de um sinal de defeito severo na pista Interna.....	92
Figura 5.26 – Cepstrum de um sinal de defeito severo na pista Interna.....	92
Figura 6.1 – Foto da bancada de ensaios.....	95
Figura 6.2 – Montagem dos acelerômetros e posições.....	96
Figura 6.3 – Pista interna de um rolamento com desgasta normal.....	98
Figura 6.4 – Pista externa, esfera e gaiola de um rolamento com desgasta normal.....	98
Figura 6.5 – Parâmetros estatísticos para rolamento que não apresentaram defeito durante O Ensaio.....	99
Figura 6.6 – Parâmetros estatísticos para rolamento que não apresentaram defeito durante o ensaio.....	100
Figura 6.7 – Energia residual de um rolamento sem defeito.....	101
Figura 6.8 – Envelope de um rolamento sem defeito.....	102
Figura 6.9 – Cepstrum de um rolamento sem defeito.....	102
Figura 6.10 – Pista interna de um rolamento com endentações.....	103
Figura 6.11 – Pista interna e externa de Após impregnação de material de fusão da gaiola.	104
Figura 6.12 – Esfera e gaiola do rolamento após fusão da gaiola.....	104
Figura 6.13 – Parâmetros estatísticos para rolamento que ocorreu fusão da gaiola.....	105
Figura 6.14 – Parâmetros estatísticos para rolamento que não apresentaram defeito durante o ensaio.....	105
Figura 6.15 – Energia residual de um rolamento com endentação na pista interna.....	106
Figura 6.16 – Envelope de um rolamento que apresenta de desgaste com endentações.....	106
Figura 6.17 – FFT dos segundo e trigésimo nono dia de ensaio.....	107
Figura 6.18 – Cepstrum de um rolamento que apresenta de desgaste com endentações.....	107
Figura 6.19 – Pista interna de um rolamento com um ponto de amassamento.....	108
Figura 6.20 – Pista interna de um rolamento com descascamento.....	109
Figura 6.21 –Esfera e gaiola de um rolamento após fusão de parte da gaiola.....	109
Figura 6.22 – Parâmetros estatísticos de um rolamento com amassamento na pista interna	110

Figura 6.23 – Parâmetros estatísticos de um rolamento com amassamento na pista interna e desgaste com endentação.....	110
Figura 6.24 – Energia residual de um rolamento de um rolamento com amassamento na pista interna e desgaste com endentação.....	111
Figura 6.25 – Envelope de um rolamento de um rolamento de um rolamento com amassamento na pista interna e desgaste com endentação.....	111
Figura 6.26 – Envelope do rolamento com amassamento.....	112
Figura 6.27 – Envelope e FFT do sinal próximo à falha do rolamento.....	112
Figura 6.28 – Cepstrum de um rolamento de um rolamento de um rolamento com amassamento na pista interna e desgaste com endentação.....	113
Figura 6.29 – Pista interna de um rolamento com descascamento e mudança de trajetória da esfera.....	113
Figura 6.30 – Esfera e gaiola de um rolamento após fusão de parte da gaiola.....	114
Figura 6.31 – Parâmetros estatísticos para rolamento com amassamento na pista interna..	114
Figura 6.32 – Parâmetros estatísticos para rolamento que não apresentaram defeito durante o ensaio.....	115
Figura 6.33 – Energia residual de um rolamento com defeito na pista interna.....	115
Figura 6.34 – Envelope de um rolamento com defeito na pista interna seguido de quebra da gaiola.....	116
Figura 6.35 – Envelope de rolamento com defeito na pista interna e gaiola.....	116
Figura 6.36 – Cepstrum de um rolamento com defeito na pista interna seguido de quebra da gaiola.....	117
Figura A1.1 – Rolamento e gaiola.....	131
Figura A2.1 – Obtenção das falhas induzidas nos rolamentos.....	132

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Frequências características de defeito nos elemento do rolamento.....	23
Tabela 4.1 – Parâmetros utilizados para obtenção dos modelos matemáticos.....	51
Tabela 4.2. Tendências dos parâmetros estatísticos.....	63
Tabela 5.1 – Falhas induzidas em rolamento.....	71
Tabela 5.2 – Tendência de variação dos Parâmetros estatísticos em relação à velocidade e tamanho da falha.....	81
Tabela 7.1 – Frequências de defeitos do rolamento.....	97

Nomenclatura

Letras Latinas

F_R	Carga aplicada ao rolamento.
Q_0	Carga na posição de ângulo 0
Q_ψ	Carga na posição ψ ;
E_1	Modulo de elasticidade da pista
E_2	Modulo de elasticidade da esfera
R_1	Raio da pista
R_2	Raio da esfera
N_e	Numero de esferas
P_d	Folga diametral.
D	Diâmetro da esfera;
d	Diâmetro primitivo;
d_{pi}	Diâmetro da pista interna;
d_{pe}	Diâmetro da pista externa;
r_g	Raio da gaiola;
r_{pi}	Raio da pista interna;
r_{pe}	Raio da pista externa
V_{pe}	Velocidade da pista externa;
V_g	Velocidade da gaiola;
V_{pi}	Velocidade da pista interna.
f_r	Frequência de Rotação da Pista Girante
f_{pe}	Frequência da pista externa;

f_{pi}	Frequência da pista interna;
f_e	Frequência da esfera;
f_g	Frequência da gaiola;
f_{dpe}	Frequência de defeito da pista externa;
f_{dpi}	Frequência de defeito da pista interna;
f_{de}	Frequência de defeito da esfera;
f_{dg}	Frequência de defeito da gaiola;
df	Resolução em frequência
F_{cr}	Fator de crista
X_{rms}	Valor do RMS
X_{med}	Média
X_{pic}	Valor de pico
A	Amplitude
A_p	Amplitude da portadora
X_k	Sinal de entrada do filtro
Y_k	Saída do filtro
d_k	Saída desejada
$H_k(Z)$	Função transferência do filtro
$S_r(t)$	Sinal do rolamento
$S_p(t)$	Sinal da portadora
$n(t)$	Parcela de normalidade do sinal
$d_{ef}(t)$	Parcela de defeito do sinal
M	Índice de modulação
$x_s(t)$	Função causal
$x_{par}(t)$	Função par
$x_{imp}(t)$	Função ímpar
$sgn(t)$	Função sinal
A_p	Amplitude da portadora
S_{AM}	Sinal modulado em amplitude

N	Numero de pontos no Tempo
R_n	Relação sinal-ruído
\mathbf{B}_k	Vetor do coeficiente

Letras Gregas

ψ	Representa a posição da esfera, submetida ao carregamento, em relação a força aplicada;
δ_R	Deslocamento do carregamento sobre as linhas de carregamento;
δ_0	Deformação elástica total na direção de carga máxima;
δ_ψ	Deformação elástica total na direção do ângulo ψ ;
δ	Deformação
ε	fator de distribuição de carga.
β	Ângulo de contato;
γ_3	Assimetria
γ_4	Curtose
γ_6	Momento de sexta ordem
ω_p	Frequência da portadora
μ	Média
σ	Desvio Padrão
∇_k	Gradiente

Siglas

DEP(S_p)	Densidade Espectral de Potencia do sinal padrão
DEP(S)	Densidade Espectral de Potencia de um sinal
PM	Modulação em fase
AM	Modulação em amplitude
FM	Modulação em frequência

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Introdução

Com uma economia de mercados globalizada a concorrência entre as indústrias, cada dia aumenta, obrigando uma busca na diminuição dos custos dos produtos associada ao aumento da qualidade, o que leva a trabalharem com máquinas de forma ininterrupta e submetidas a grandes velocidades. Com esse alto grau de produtividade, as paradas causam grandes prejuízos. Portanto, é de grande importância que ocorra uma melhoria no uso das técnicas de manutenção, pois uma manutenção de qualidade significa menos tempo de horas paradas.

Esta posição de relevância ocupada pela manutenção vem aumentando a cada dia, buscando diminuir custos e melhorar as técnicas de detecção de falhas. Com isso, cada vez mais, vão surgindo novas técnicas e procedimentos que buscam possibilitar uma detecção rápida e confiável das falhas de componentes, diminuindo o tempo de hora parada dos equipamentos.

As máquinas que têm maior velocidade, em geral, utilizam mancais de rolamento que são grandes responsáveis por paradas não planejadas quando sua falha não é detectada a tempo. Assim, para contribuir na melhoria da qualidade da manutenção, serão exploradas, nesse trabalho, as técnicas de detecção de falhas em rolamentos

ensaiados em condições próximas as de funcionamento, e verificados o comportamento de cada técnica em relação aos diversos defeitos obtidos.

1.2 Revisão Bibliográfica

Um dos componentes críticos das máquinas são os rolamentos. Os defeitos desses componentes podem ser causados durante o processo de fabricação ou uso. Caso essas falhas não sejam detectadas a tempo, podem levar a um mau funcionamento da máquina e até comprometer outros componentes, podendo inutilizá-la. A pesquisa de técnicas adequadas para o monitoramento das falhas em rolamentos mostra-se, portanto, imprescindível.

Em sua revisão sobre detecção de falhas em rolamentos, Tandon (1999) faz uma divisão das técnicas de acordo com a grandeza física usada para aquisição do sinal, quais sejam: medidas de vibração, de pressão acústica, de temperatura, e, análise de desgaste. Os métodos que envolvem medidas de vibração são os mais usados. Esses métodos são subdivididos em: técnicas no domínio do tempo, da frequência e no domínio tempo-frequência.

1.2.1 Técnicas no Domínio do Tempo

Segundo Tandon (1999), dos diversos métodos de detecção de falhas, no domínio do tempo, os mais simples são o nível RMS e fator de crista, que é a razão entre o valor de pico e o valor RMS de aceleração. Estes métodos têm sucesso limitado na detecção de falhas em rolamentos.

Mitchell (1993) afirma que o fator de crista é mais eficiente que o nível RMS na detecção de falhas incipientes, pois à medida que a falha propaga-se pela superfície da pista o valor de pico permanece praticamente inalterado, enquanto o RMS cresce. Com isso, haverá uma diminuição do fator de crista. Assim o autor propõe o uso do fator K que é o produto do RMS e valor de pico.

Além destes métodos, no domínio do tempo, existem outros que estão relacionados com parâmetros estatísticos.

Dyer e Stewart (1978) desenvolveram um trabalho onde utilizam a curtose para detecção de falhas em rolamentos de rolos. Em seu artigo, os autores afirmam que os seis primeiros momentos estatísticos podem ser utilizados para a detecção de falhas em rolamentos. Outra observação feita pelos autores refere-se ao fato dos momentos de

ordem ímpar tenderem a zero, quando há uma distribuição de aceleração simétrica, enquanto os momentos pares, média, curtose e momento de sexta ordem, tendem para valores diferentes de zero e são mais sensíveis a sinais com pulso, que estão associados a defeitos dos rolamentos.

Um dos motivos, segundo os autores, de optarem pela curtose, está no fato da curtose não depender da carga e da velocidade aplicada ao rolamento. Um rolamento sem defeito tem o sinal de aceleração que é uma distribuição gaussiana, e o valor de curtose é $3 \pm 8\%$. Ao final do trabalho os autores concluem que a curtose é capaz de indicar a presença da falha e o tamanho da mesma. Para isso, é necessária a aplicação de um filtro passa banda ao sinal antes de aplicar a curtose no mesmo.

Martin e Honarvar (1995) utilizam em seu trabalho a curtose e a assimetria para detecção de falhas em rolamentos. Com o uso da curtose os autores constroem um mapa, com o objetivo de indicar o grau de defeito do rolamento através do valor da curtose.

Samanta e Al-Blaluchi (2001) desenvolvem um trabalho onde são utilizados cinco parâmetros estatísticos: RMS, assimetria, variância, curtose e momento de sexta ordem – utilizados na entrada de uma rede neural, para detectar a presença de defeitos em rolamentos. Antes de serem obtidos os parâmetros, o sinal é submetido ao conjunto de filtros passa banda e também são feitos estudos onde os autores utilizam a wavelet de Daubechies aplicando-as aos sinais e, em seguida, são calculados os parâmetros estatísticos. Ao final, os autores observam que os melhores resultados são obtidos quando o sinal é submetido a um filtro passa banda com frequências inicial de 4,6Hz e final de 20kHz ou para os sinais onde foi aplicada a função de Daubichie de segunda ordem.

Muitas vezes, o RMS, a curtose e a assimetria são usadas como níveis de alarme, porém em um estudo apresentado por Almeida et al (2001) foi proposto um novo nível de alarme denominado método da energia residual. Ao final do trabalho os autores concluem que o método da energia residual apresenta melhores resultados que os demais parâmetros e aconselham, assim, sua utilização.

Segundo Tandon (1999), nos últimos anos, tem sido enfocada a interpretação automática de dados para diagnóstico de falhas em rolamentos. As técnicas de reconhecimento de padrão e redes neurais têm sido aplicadas em dados de vibração no domínio de tempo e de frequência.

1.2.2 Técnicas no Domínio da Frequência

Técnica de Envelope

McFadden e Smith (1984) fazem uma revisão da última década sobre as técnicas que utilizam envelope. Neste trabalho, alertam sobre algumas limitações apresentadas pela técnica de envelope. Falam sobre as características do sinal de um rolamento com defeito, ressaltando que o desalinhamento dos elementos do rolamento, acarretam flutuações nas frequências de defeito. Outro ponto tratado refere-se à faixa de frequências de filtragem do filtro passa banda, utilizado na técnica de envelope. Os autores aconselham o uso da aplicação da FFT ao sinal, a ser analisado, o que possibilita a identificação da faixa de ressonância. Em seguida, deve-se identificar a frequência central de ressonância f_c da faixa, a partir da qual são obtidas as frequências inicial e final do filtro. A largura de banda que tem sido usada frequentemente é de $\pm 5\%$ da frequência central. Os autores ainda afirmam que o sinal de defeito na esfera do rolamento é modulado pela frequência da gaiola.

No mesmo ano, McFadden e Smith apresentam um outro trabalho onde é proposto um modelo de defeito, para rolamentos com falha pontual em um de seus elementos. Mostram que, de acordo com a localização da falha os pulsos de excitação tem suas amplitudes modificadas. Apesar de sua simplicidade, o modelo possibilita incorporar, quantitativamente, o efeito da geometria do rolamento, da velocidade do seu elemento girante, da distribuição de carga no rolamento, da função transferência obtida entre a região de defeito e o transdutor e o decaimento exponencial de vibração.

McFadden e Smith (1986) neste trabalho propõem um modelo para rolamento com vários pontos de defeito. O modelo simples é tão versátil quanto o modelo apresentado para rolamento com defeito pontual.

Começa-se o envelope filtrando o sinal de aceleração para eliminar baixas frequências. Alguns estudiosos dizem que utilizando o filtro passa alta, pode-se obter um sinal filtrado com melhores condições de informação. Outros consideram que é vantajoso o uso de um filtro seletivo passa banda, por sua capacidade de conseguir o foco, isto é a informação de interesse. Em ambos os casos, um filtro que corte frequências de rotação; suas múltiplas de baixa ordem, além das fundamentais. Um construtor recomenda que o corte seja no mínimo de dez vezes a frequência de rotação (Mitchell, 1993).

Widrow et al (1975) desenvolvem um trabalho onde é apresentado o conceito de filtro adaptativo para cancelamento de ruído. Uma grande vantagem deste tipo de filtro está no fato de seus parâmetros poderem sofrer modificações ao longo do processo. Este tipo de filtro trabalha com duas entradas, sendo uma para o sinal principal corrompido pelo ruído, e uma para um sinal ruidoso. Ao longo do processo, o ruído de referência é filtrado de forma adaptativa com o objetivo de se obter um aumento da correlação com o ruído que contamina o sinal principal. Um dos problemas encontrados neste tipo de filtro está no fato do sinal de referência ter somente correlação com o ruído do sinal principal, caso contrário o sinal principal pode perder informações de interesse e em caso extremo, o mesmo corre o risco de ser eliminado.

Chaturvedi e Thomas (1982) utilizam em seu trabalho um filtro adaptativo para cancelamento de ruído. Neste trabalho, os autores aplicam a técnica em composição com a curtose para diagnóstico de falhas em rolamentos.

Ho e Randal (1999) fazem um estudo comparativo entre técnicas de envelope com e sem uso do filtro adaptativo. O filtro adaptativo utilizado neste trabalho é denominado “self adaptive noise cancelling” (SANC). Este filtro tem como vantagem principal eliminar a necessidade de um sinal de referência.

Randall e Antoni (2003) utilizam o SANC para separar sinais de rolamentos e de engrenagens de uma caixa de transmissão de helicóptero.

Antoni e Randal (2003) fazem um estudo sobre a técnica de SANC e os diversos algoritmos utilizados em sua implementação. Ao final deste trabalho, os autores comentam que, o principal problema encontrado na aplicação do SANC em sinais vibratórios reais é a necessidade de aplicá-lo a uma longa faixa de tempo, para que possa se eliminar os ruídos que interferem nas harmônicas.

Antoni e Randal (2003) apresentam uma continuação do trabalho anterior onde os autores apresentam um novo algoritmo para implementação do SANC, e fazem um estudo comparativo entre alguns algoritmos. Também apresentam um exemplo de separação do sinal de uma engrenagem e de um rolamento.

1.2.3 Técnicas no Domínio do Tempo-Frequência

Silva (1999) em seu trabalho faz um estudo comparativo entre diversas técnicas de detecção de falhas em rolamentos. Neste estudo, é dada maior ênfase às técnicas de envelope e tempo-frequência. A análise de sinais é feita por representação conjunta tempo-frequência utilizando a distribuição Pseudo-Wigner-Ville (PWVD), aplicada aos

sinais gerados no tempo, seguida da aplicação da transformada de Hilbert para obtenção de sinais analíticos. O autor conclui que a técnica de tempo-frequência, utilizada em seu trabalho, possibilita um diagnóstico mais confiável que a técnica de envelope. E, algumas vezes, a maior dificuldade na utilização da técnica de envelope está na determinação da faixa de filtragem.

Tse et al (2001) fazem um estudo comparativo entre a técnica de Wavelet e a técnica de envelope. O autor conclui que a técnica de Wavelet é mais eficiente que a técnica de envelope, na detecção de falhas em rolamentos. Na detecção da falha, pela técnica de Wavelet o autor dividiu-a em dois estágios; um primeiro que consiste em verificar a existência do defeito sem identificar a sua localização. Esta análise é feita em uma região de alta frequência, pois a presença do defeito no rolamento acarreta num aumento da energia nesta região. No segundo estágio, é feito e determinado o intervalo de tempo entre os impactos, o que possibilita a identificação e localização da falha.

1.2.4 Cepstrum

Segundo Randall (1987), a definição mais utilizada, atualmente, para cepstrum é o inverso da transformada de Fourier do logaritmo do espectro de potência. É uma técnica que possibilita detectar estruturas periódicas do espectro do logaritmo, tais como, famílias de bandas laterais com espaçamento uniforme. A escala logarítmica da amplitude enfatiza a estrutura harmônica do espectro e reduz a influência de qualquer caminho de transmissão aleatória, pelo qual o sinal vai do ponto de geração ao ponto de medida. O que distingue o cepstrum não é o fato de ser o espectro do espectro, mas sim, a conversão logarítmica do espectro original.

Barkov e Barkova (1995) apresentam um estudo sobre a avaliação da condição e previsão de vida de rolamentos, além de se analisar a utilização do cepstrum na identificação de falhas nos mesmos. Uma característica citada como vantajosa no uso do método de cepstrum é que cada máquina tem sua própria banda de frequências, onde os defeitos do rolamento se manifestam de maneira mais clara. Os autores concluem mostrando a viabilidade do uso desta técnica para identificação de falhas incipientes.

1.3 Motivação

O que motivou este trabalho foi o fato de não se ter conhecimento de estudos que acompanham o surgimento da falha em rolamentos quando submetidos a condições

próximas da realidade. Além disso, a maioria dos trabalhos utiliza rolamentos com falhas induzidas ou submete-os a condições extremas de funcionamento.

Outro fato relevante é que muitos trabalhos não tratam do surgimento da falha na gaiola, ou os parâmetros utilizados para detecção deste tipo de falha têm pouca eficiência em função da baixa energia desse tipo de falha. Optou-se, portanto, pela utilização de rolamentos com gaiola de nylon, cuja energia do sinal de falhas é bem menor que a energia do sinal de falhas em gaiolas feitas de materiais metálicos.

Antes da escolha de qual técnica seria destacada, testaram-se várias delas em rolamentos com falhas incipientes.

1.4 Objeto de Estudos

Nesse trabalho, o objeto de estudo são rolamentos desmontáveis, com gaiola de nylon, com dez esferas distribuídas em uma única carreira com retentores de ambos lados. As pistas interna e externa têm diâmetros de 35,32mm e 49,63mm, respectivamente. Os rolamentos obtidos eram de um mesmo lote. Em uma primeira etapa do trabalho, os rolamentos foram submetidos a falhas induzidas, e em seguida, colocados em bancada de ensaios. Ensaiou-se um outro conjunto de rolamentos sem falhas, em bancada que simula condições próximas as de trabalho. Durante o período de ensaios, os rolamentos eram monitorados por técnicas que utilizam análise de vibração. Alguns rolamentos previamente escolhidos foram desmontados para inspeção do desgaste dos seus componentes. E quando, um rolamento apresentava indício de falha, era desmontado para confirmar a ocorrência do defeito.

1.5 Objetivo do Trabalho

1.5.1 Geral

Tem-se como objetivo geral do trabalho, o monitoramento do surgimento das falhas nos rolamentos, por diversos parâmetros, para se verificar a eficiência e sensibilidade das mesmas. Busca-se analisar como se comporta algumas técnicas de detecção de falhas em rolamentos quando os ensaios são realizados próximos às condições reais. Além de verificar a eficiência da técnica de envelope com filtro adaptativo na detecção de falhas nos rolamentos.

1.5.2 Específico

Esse trabalho tem como objetivos específicos:

- Implementação das técnicas em uma plataforma MATLAB;
- Simulação de modelo de falhas, de acordo com proposto por McFadden, e aplicação das técnicas implementadas;
- Aplicação das técnicas com falhas induzidas;
- Acompanhar o surgimento das falhas em rolamento;
- Verificar quais as técnicas são capazes de detectar o surgimento das falhas, quando se encontram incipientes;
- Acompanhar a evolução da falha em um rolamento até o seu colapso;
- Buscar detectar a falha na gaiola no momento de sua ruptura;
- Verificação da eficiência e sensibilidade da técnica de envelope com filtro adaptativo, na detecção de falhas incipientes e falhas na gaiola.

1.6 Descrição do Trabalho

A revisão bibliográfica foi feita nesse capítulo e tem como objetivo mostrar a evolução das técnicas de detecção de falhas ao longo do tempo, além de trabalhos mais recentes que tratam da detecção de falhas em rolamentos por meio da análise de vibração.

No segundo capítulo, é mostrada a região de carga em um rolamento, quando submetido a trabalho. São vistas as alterações sofridas pela região de carregamento à medida que o rolamento sofre desgaste, o processo de surgimento de falha por fadiga, as frequências de falha do rolamento e a influência da região de carga do rolamento sobre o sinal de falha do rolamento.

Diversas técnicas de detecção de falhas nos rolamentos são apresentadas no capítulo três; primeiro tratou-se das técnicas no domínio do tempo, depois, no domínio da frequência, em seguida, cepstrum e, por último, uma técnica no domínio tempo-frequência.

Os modelos matemáticos das falhas nas pistas interna e externa, e também na esfera são desenvolvidos no quarto capítulo. E ainda, pode ser vista a aplicação, nesses modelos, das técnicas apresentadas no capítulo anterior. Também é feito um estudo do comportamento dos valores dos parâmetros quando a velocidade e o tamanho da falha do rolamento aumentam.

No quinto capítulo, as técnicas utilizadas nos modelos matemáticos são aplicadas a rolamentos com falhas induzidas de diferentes tamanhos e submetidos à variação de velocidade. Desta forma, possibilitou-se verificar a eficiência dos modelos, e verificar o comportamento das técnicas com relação à velocidade e tamanho das falhas.

Os resultados obtidos durante o período de ensaios são mostrados no capítulo seis, sendo divididos em grupos de falhas semelhantes, e, para cada grupo, apresentados os resultados obtidos para os diversos parâmetros.

A conclusão está no sétimo capítulo, além de se destacar a contribuição obtida a partir dos resultados e de serem feitas sugestões para trabalhos futuros nessa área.

CAPÍTULO 2

FALHAS EM ROLAMENTOS

2.1 Introdução

Mesmo geometricamente perfeitos, os rolamentos podem gerar vibrações devido a variações de conformidade, ou, dos esforços entre seus componentes no tempo. As variações dos esforços estão diretamente relacionadas ao número de elementos girantes, esferas ou rolos. Ao longo do tempo, esses esforços tendem a causar fadiga nos componentes do rolamento. Serão vistas as diferentes formas de esforços nos componentes dos rolamentos, as falhas oriundas destes esforços e as frequências que estão diretamente relacionadas com os defeitos. As falhas causadas por fabricação ou erro de montagem, não serão abordadas nesse capítulo.

2.2 Distribuição de Cargas nos Rolamentos

Em geral, os rolamentos estão submetidos a cargas radiais que geram um campo de carga, Figura 2.1. À medida que os elementos girantes entram e saem da região de carga surgem vibrações no rolamento, mesmo estando o rolamento em perfeito estado. Este sinal ruidoso é bem visível quando o sinal de um rolamento em perfeito estado é observado no domínio do tempo.

A região de carregamento está diretamente relacionada com a geometria do rolamento, o tipo de material utilizado na confecção de seus elementos, o tipo de montagem (com ou sem pré-carga), com a espessura dos anéis do rolamento, com a folga existente no rolamento e com as características do lubrificante utilizado. A Figura 2.1 apresenta diferentes situações de carregamento que podem ocorrer em rolamentos. Na Figura 2.1(a), observa-se um rolamento, sem folga, submetido a uma montagem normal, ou seja, sem pré-carga. Na Figura 2.1(b), observa-se o mesmo rolamento sujeito a uma montagem com pré-carga. O rolamento da Figura 2.1(c), representa a região de carga de um rolamento com folga entre seus elementos.

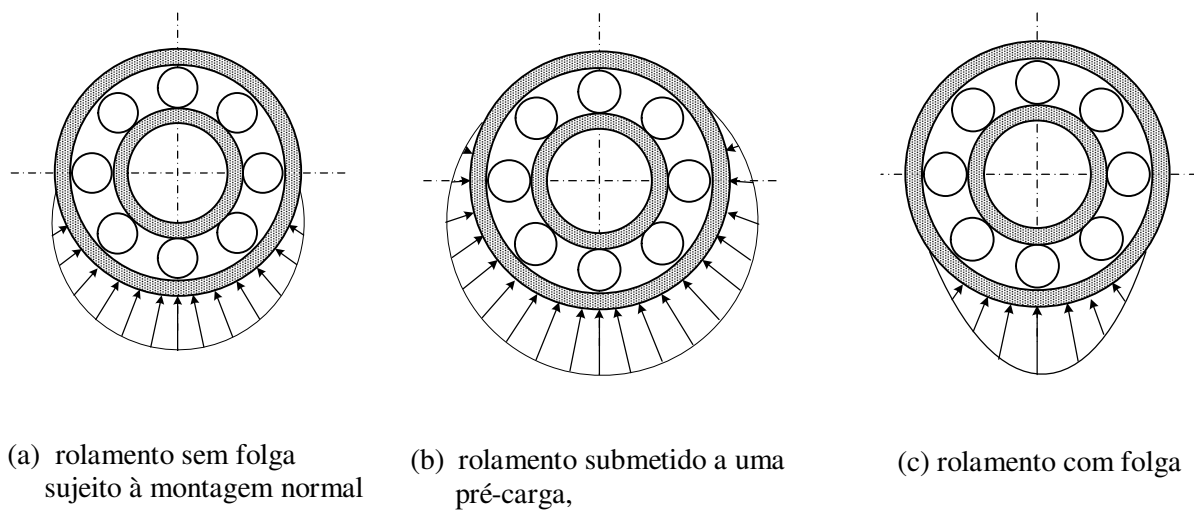


Figura 2.1 – Formas de carregamentos em rolamentos.

Com o tempo os rolamentos sofrem desgastes que causarão folga e desta forma, a região de carga sofrerá uma diminuição, ou seja, as situações de carregamento representadas nos itens (a) e (b) da Figura 2.1 tendem para o carregamento mostrado no item (c).

2.3 Relação entre o Carregamento Estático e a Deformação

Para o cálculo da relação entre o carregamento estático e a deformação será, inicialmente, considerado um rolamento sem folga entre seus elementos. Em seguida, a relação entre o carregamento estático e a deformação será obtida para o rolamento que apresentar folga entre seus elementos.

A Figura 2.2 representa um rolamento com dez esferas, onde a região de carregamento abrange somente o hemisfério inferior do rolamento.

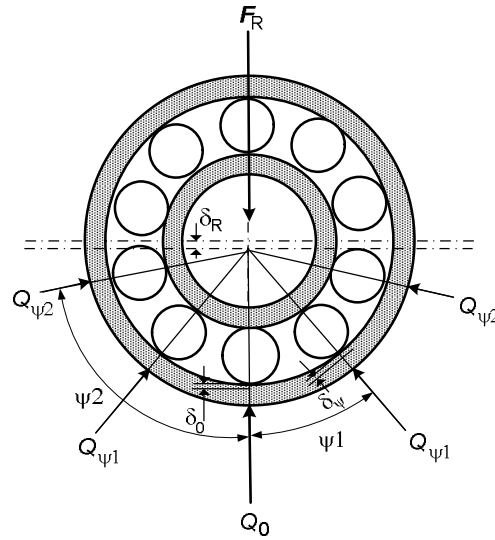


Figura 2.2 - Carregamento em rolamento sem folga.

Onde:

ψi = representa a posição da esfera, submetida ao carregamento, em relação a força aplicada;

δ_R = deslocamento do carregamento sobre a linha de carregamento;

δ_0 = deformação elástica total na direção de carga máxima;

$\delta_{\psi i}$ = deformação elástica total na direção do ângulo ψi ;

$Q_{\psi i}$ = carga na posição ψi ;

F_R = carga aplicada ao rolamento.

Considerando o rolamento da Figura 2.2 onde somente as cinco esferas do hemisfério inferior estão sujeitas ao carregamento (Figura 2.2), obtém-se a seguinte relação para os referidos esforços (Spotts, 1964; Cahngsen, 1987):

$$F_R = Q_0 + 2Q_{\psi 1} \cos(\psi 1) + 2Q_{\psi 2} \cos(2\psi 1) \quad (2.1)$$

Considerando-se que o rolamento é de esferas, tem-se a seguinte relação entre a carga e a deformação sofrida pela esfera e pista (Spotts, 1964; Cahngsen, 1987):

$$\delta_{\psi i} = 0,775 \sqrt[3]{Q_{\psi i}^2 \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)^2 \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)}, \quad (2.2)$$

onde, a região de contato tem foram elíptica, E_1 e R_1 são o coeficiente de elasticidade e o raio da esfera, respectivamente, e E_2 é o coeficiente de elasticidade da pista, R_2 é o raio da pista. Como as esferas têm as mesmas dimensões e são feitas de mesmo material, pode-se simplificar a relação de deformação entre esfera e pista, obtendo-se a seguinte relação:

$$\delta_{\psi i} = Q_{\psi i}^{2/3} K, \quad (2.3)$$

onde,

$$K = 0,775 \sqrt[3]{\left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right)^2 \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)}.$$

Rearranjando a expressão 2.3, pode-se chegar a seguinte relação:

$$Q_{\psi i} = \left(\frac{\delta_{\psi i}}{K} \right)^{3/2}, \quad (2.4)$$

que representa a relação da carga aplicada em cada esfera e a deformação ocorrida entre a pista e a esfera. Existe uma relação entre a deformação em cada posição da esfera ψi com a principal δ_0 , que é expressa da seguinte foram (Spotts, 1964; Cahngsen, 1987):

$$\delta_{\psi i} = \delta_0 \cos(\psi i). \quad (2.5)$$

A partir das Equações (2.4) e (2.5), obtém-se:

$$Q_{\psi i} = \left(\frac{(\delta_0 \cos(\psi i))}{K} \right)^{3/2} \quad (2.6)$$

Considerando-se a carga na posição Q_0 e a carga na posição $Q_{\psi i}$, pode-se chegar a seguinte relação:

$$\frac{Q_{\psi i}}{Q_0} = \frac{(\delta_0 \cos(\psi i))^{3/2}}{\delta_0^{3/2}}, \quad (2.7)$$

ou seja:

$$Q_{\psi i} = Q_0 \cos(\psi i)^{3/2}.$$

Substituindo-se a Equação (2.7) em (2.1) obtém-se:

$$F_R = Q_0 + 2Q_0 (\cos(\psi 1))^{3/2} \cos(\psi 1) + 2Q_0 (\cos(2\psi 1))^{3/2} \cos(2\psi 1), \quad (2.8)$$

então,

$$F_R = Q_0 (1 + 2(\cos(\psi 1))^{5/2} + 2(\cos(2\psi 1))^{5/2}). \quad (2.9)$$

Fazendo:

$$M = (1 + 2(\cos(\psi 1))^{5/2} + 2(\cos(2\psi 1))^{5/2}), \quad (2.10)$$

obtém-se:

$$F_R = Q_0 M. \quad (2.11)$$

Considerando-se um rolamento com dez esferas, com carregamento somente no hemisfério inferior, tem-se $\psi 1 = 36^\circ$, portanto:

$$M = 2,2836.$$

Como os ângulos de contato estão diretamente relacionados ao número de esferas N_e pode-se então obter a seguinte relação:

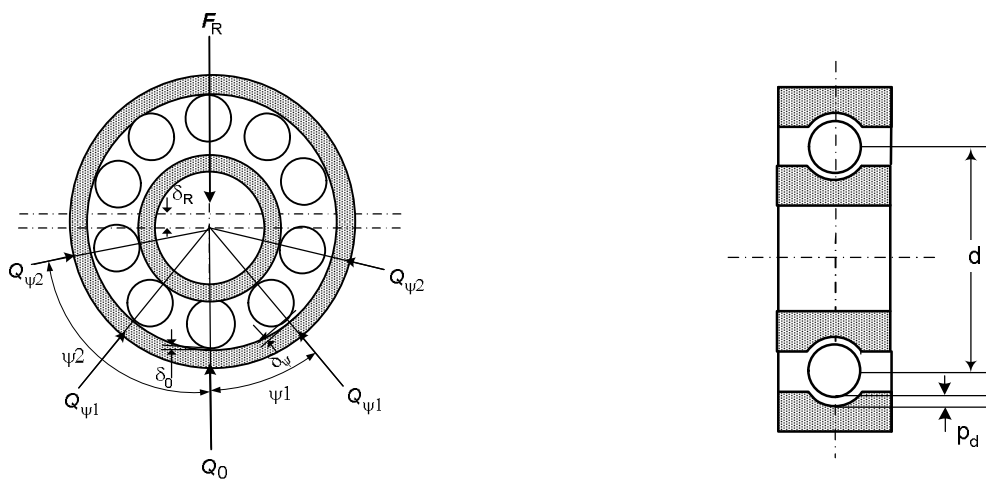
$$\frac{N_e}{M} = \frac{10}{2,2836} = 4,38 \quad (2.12)$$

Substituindo a Equação (2.12) na Equação (2.11), obtém-se então:

$$Q_0 = \frac{4,38 F_R}{N_e} \quad (2.13)$$

Até o momento, os rolamentos analisados não tinham folgas radiais, o que não retrata muito bem o que acontece com os rolamentos. À medida que os rolamentos são submetidos ao trabalho, ocorrem desgastes em seus componentes, gerando folgas que têm uma grande importância na distribuição de cargas do rolamento. De uma forma geral, quanto maior a folga no rolamento, menor será o ângulo de atuação de carga (Harris, 1991; Cahngsen, 1987). Contudo, esta redução no tamanho da região de carregamento não afetará as frequências de defeito do rolamento (McFadden, 1984; Braun, 1986), como será visto mais adiante.

Na Figura 2.3, o rolamento mostrado apresenta uma folga radial. Para obtenção da expressão da distribuição de carga, pode-se seguir o mesmo raciocínio adotado anteriormente, porém as folgas serão levadas em consideração.



(a) Cargas e deformações

(b) Folgas

Figura 2.3 - Carregamento em rolamento com folga axial.

A deformação δ_{ψ_i} ocorrida na posição ψ_i será:

$$\delta_{\psi_i} = \left(\delta_0 + \frac{P_d}{2} \right) \cos(\psi_i) - \frac{P_d}{2}, \quad (2.14)$$

onde:

ψ_i = representa a posição da esfera, submetida ao carregamento, em relação a força aplicada;

δ_R = deslocamento do carregamento sobre a linha de carregamento;

δ_0 = deformação elástica total na direção de carga máxima;

δ_{ψ_i} = deformação elástica total na direção do ângulo ψ_i ;

P_d = folga diametral.

A Equação (2.14) pode ser rearranjada da seguinte forma:

$$\delta_{\psi_i} = \delta_0 \left[1 - \frac{1}{2\varepsilon} (1 - \cos(\psi_i)) \right], \quad (2.15)$$

onde:

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{P_d}{2\delta_R} \right), \quad (2.16)$$

que é conhecido como fator de distribuição de carga.

Da Equação (2.7) tem-se que:

$$\frac{Q_{\psi_i}}{Q_0} = \left(\frac{\delta_{\psi_i}}{\delta_0} \right)^n. \quad (2.17)$$

A partir das Equações (2.15) e (2.17) obtém-se:

$$Q_{\psi_i} = Q_0 \left[1 - \frac{1}{2\varepsilon} (1 - \cos\psi_i) \right]^n, \quad (2.18)$$

que afetará a forma dos impulsos gerados pelo defeito do rolamento, quando o defeito tem deslocamento em relação ao carregamento. O expoente n será $3/2$ para os rolamentos de esferas e $10/9$ para os rolamentos de rolos (McFadden, 1984).

Na Figura 2.4, são apresentadas as três possíveis formas de carregamento radial do anel interno do rolamento, em relação ao fator de distribuição de carga (Harris, 1991; Cahngsen, 1987).

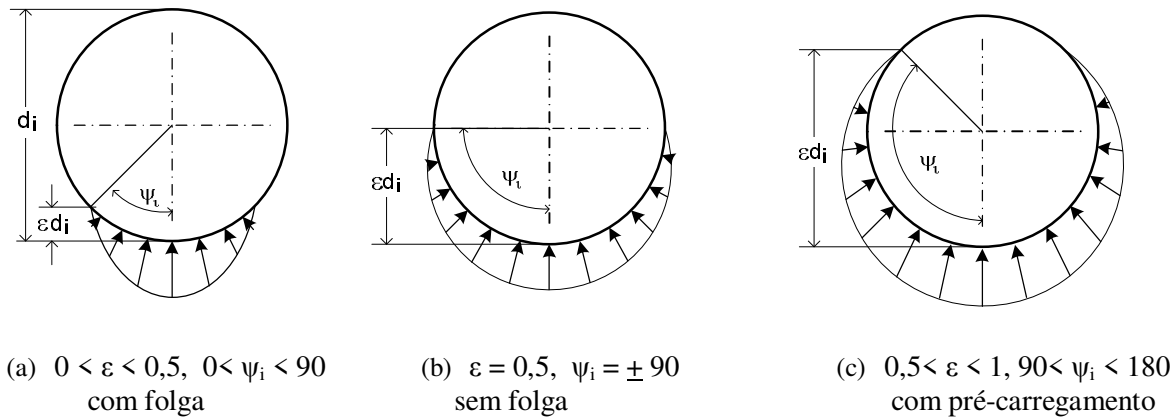


Figura 2.4 - Carregamento no anel interno do rolamento.

2.4 Falhas Comuns em Rolamentos

Como qualquer peça ou componente, os rolamentos apresentam deterioração com o uso; o desgaste é inevitável. Entretanto, um rolamento pode apresentar falha prematura por uma série de razões (Nepomuceno, 1999). Dentre as diversas causas de falhas, em rolamentos, pode-se destacar:

- **Lubrificação inadequada:** O lubrificante tornou-se, gradualmente, escasso permitindo o contato entre os componentes do rolamento, ou, ocorreu a perda das propriedades lubrificantes, ou, em último caso, o lubrificante era inadequado.
- **Montagem incorreta:** Pressão para montagem no anel inadequada, deslocamento excessivo em assento cônico, sobrecarga enquanto o rolamento não gira, etc.
- **Retentores inadequados:** Retentores que permitem a passagem de partículas para dentro do rolamento ou que se deterioram e contaminam o rolamento.
- **Desalinhamento:** Rolamentos martelados em seu assento, corpos estranhos entre o anel e o assento, eixo torto ou envergado, etc.

- **Passagem de corrente elétrica:** Para que este tipo de dano ocorra, não é necessária uma diferença de potencial muito grande entre as pistas e os elementos girantes dos rolamentos.
- **Vibrações Externas:** Rolamentos quando parados são submetidos a vibrações vindas de outros sistemas.
- **Defeitos de Fabricação:** Defeitos provenientes do processo de fabricação nas pistas, esferas ou gaiola do rolamento.
- **Fadiga:** Proveniente do rolamento de um elemento sobre outro após um certo número de ciclos.

Mesmo não ocorrendo erro de montagem, de lubrificação, ou não havendo a contaminação, os rolamentos estão sujeitos a falhas por fadiga natural. Para uma melhor compreensão do surgimento deste tipo de falha em um rolamento, será considerada que a região de carregamento do rolamento não se movimenta e que uma das pistas é estacionária. Desta forma, à medida que os elementos girantes se deslocam ao longo da pista passarão por esta região, provocando tensões cíclicas de cisalhamento na camada abaixo da pista.

As tensões cíclicas de cisalhamento trazem, como consequência micro fissuras que, em sua maioria, surgem em pontos de pouca resistência, ou onde o material é anisotrópico ou em pontos onde ocorrem inclusões de materiais não metálicos. Com o passar do tempo, as micro-fissuras evoluem para a superfície da pista onde surgirão micro-trincas que evoluem gradativamente (Harris, 1991; Juvinall e Marshek, 1991).

Com a passagem contínua dos elementos rolantes na trinca, que atingiu a superfície da pista, ocorrerá a formação de covas (pits) e/ou descascamento (spalls) que evoluirá, gradualmente, até que o rolamento sofra uma falha que impossibilite o seu uso (Juvinall e Marshek, 1991). Na Figura 2.5, pode-se observar o surgimento de uma falha no anel externo de um rolamento.

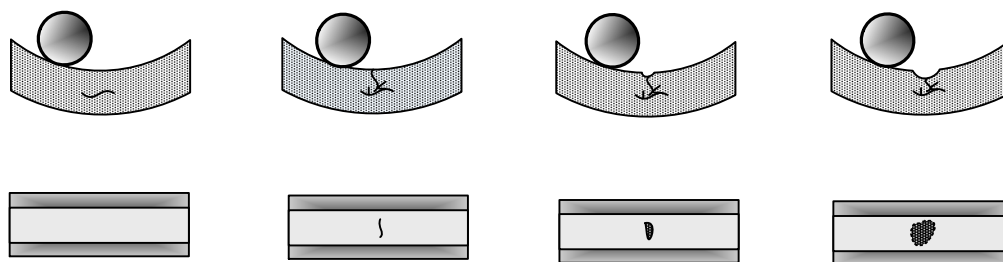


Figura 2.5 - Surgimento da falha na superfície de um rolamento

Este processo pode ocorrer em qualquer elemento do rolamento que sofre carregamento alternado (anéis interno e externo e elementos girantes).

2.5 Sinais e Frequências Características de Falhas nos Rolamentos

Quando uma superfície com defeito de um elemento do rolamento entra em contato com outra superfície do rolamento, este choque produz um impulso que excita ressonâncias no rolamento e na máquina. Estes impulsos irão ocorrer periodicamente com uma frequência que é determinada, unicamente, pela localização do defeito, sendo ele na pista interna, na pista externa ou no elemento girante (MacFadden, 1984). Estas frequências de defeitos poderão ser obtidas a partir do procedimento exposto a seguir.

Observando-se a Figura 2.6, onde estão representadas as dimensões do rolamento, que serão usadas para obtenção das frequências dos componentes do rolamento.

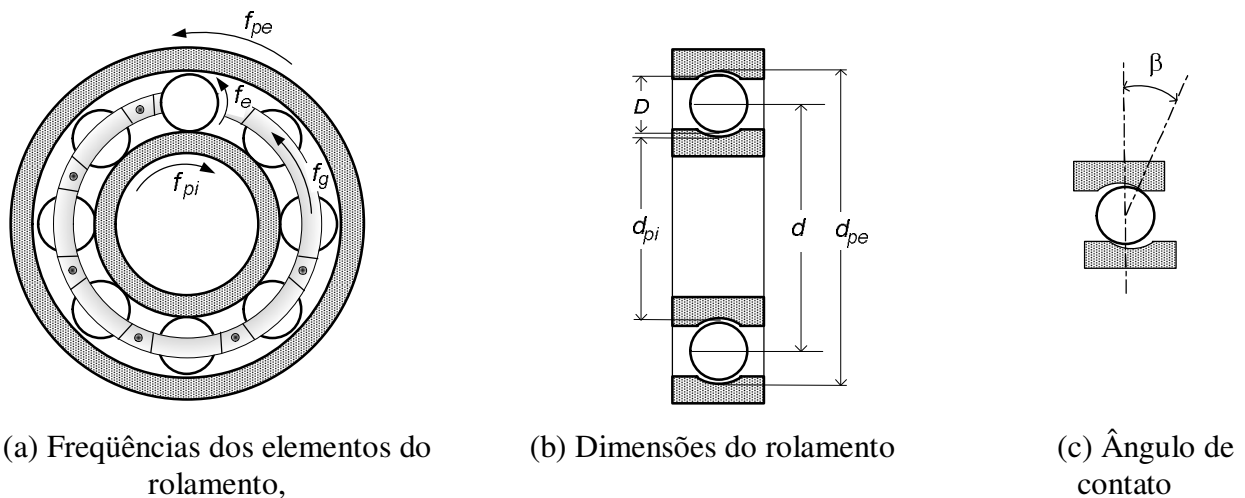


Figura 2.6 – Frequências, Dimensões e Ângulo de contato do Rolamento.

Onde:

D = diâmetro da esfera;

d = diâmetro primitivo;

d_{pi} = diâmetro da pista interna;

d_{pe} = diâmetro da pista externa;

β = ângulo de contato;

r_g = raio da gaiola ($r_g = d/2$);

r_{pi} = raio da pista interna ($r_{pi} = d_{pi}/2$);

r_{pe} = raio da pista externa ($r_{pe} = d_{pe}/2$).

Algumas relações entre as velocidades de rotação dos elementos do rolamento podem ser obtidas a partir das velocidades tangenciais dos elementos (Figura 2.7).

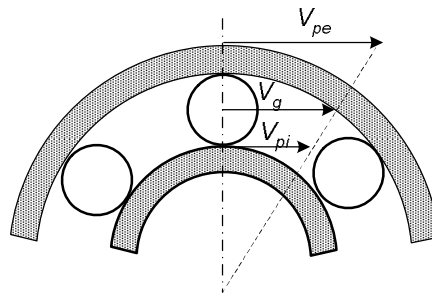


Figura 2.7 – Velocidades nos elementos do rolamento.

Considerando-se as seguintes velocidades:

V_{pe} = velocidade da pista externa;

V_g = velocidade da gaiola;

V_{pi} = velocidade da pista interna.

Frequência Característica da Gaiola

A partir da análise cinemática dos elementos mostrados na Figura 2.7 pode-se obter a seguinte relação:

$$V_g = \frac{V_{pi} + V_{pe}}{2} \quad (2.19)$$

que será usada para obtenção da frequência característica da gaiola:

$$f_g = \frac{V_g}{r_g} \quad (2.20)$$

Substituindo a Equação (2.19) em (2.20) tem-se como resultado:

$$f_g = \frac{V_{pi} + V_{pe}}{2r_g}, \quad (2.21)$$

ou,

$$f_g = \frac{V_{pi} + V_{pe}}{d}. \quad (2.22)$$

Tem-se ainda:

$$V_{pi} = r_{pi} f_{pi} \quad \text{e} \quad V_{pe} = r_{pe} f_{pe}.$$

Rearranjando a Equação (2.22), obtém-se:

$$f_g = \frac{r_{pi} f_{pi} + r_{pe} f_{pe}}{d}. \quad (2.23)$$

Nas relações obtidas até o momento, não foram considerados os ângulos de contato. Para ângulos de contato diferentes de zero, obtém-se:

$$r_{pi} = \frac{d - D \cos \beta}{2}, \quad (2.24)$$

e

$$r_{pe} = \frac{d + D \cos \beta}{2} \quad (2.25)$$

Substituindo as Equações (2.24) e (2.25) na Equação (2.23) obtém-se:

$$f_g = \frac{1}{d} \left(\frac{d - D \cos \beta}{2} f_{pi} + \frac{d + D \cos \beta}{2} f_{pe} \right) \quad (2.26)$$

Frequência Característica de Defeito na Pista Interna

A frequência com que a esfera passa pelo defeito na pista interna é obtida a partir da frequência relativa da gaiola e pista interna multiplicada pelo número de esferas N_e . Ou seja:

$$f_{dpi} = N_e \left| f_g - f_{pi} \right| \quad (2.27)$$

Substituindo a Equação (2.26) na Equação (2.27), obtém-se:

$$f_{dpi} = N_e \left| \frac{1}{d} \left(\frac{d - D \cos \beta}{2} f_{pi} + \frac{d + D \cos \beta}{2} f_{pe} \right) - f_{pi} \right|. \quad (2.28)$$

Rearranjando a Equação (2.28) obtém-se a frequência característica de defeito na pista interna:

$$f_{dpi} = \frac{N_e}{2d} \left[\left| f_{pe} - f_{pi} \right| (d + D \cos \beta) \right]. \quad (2.29)$$

Frequência Característica de Defeito na Pista Externa

Para obtenção da frequência de defeito da pista externa foi adotado o mesmo raciocínio usado na obtenção da frequência de defeito na pista interna, ou seja:

$$f_{dpe} = N_e \left| f_g - f_{pe} \right| \quad (2.30)$$

Após substituições da Equação (2.26) na Equação (2.30) e fazendo os rearranjos necessários, obtém-se:

$$f_{dpe} = \frac{N_e}{2d} \left[\left| f_{pi} - f_{pe} \right| (d - D \cos \beta) \right] \quad (2.31)$$

Frequência Característica de Defeito nas Esferas

Têm-se as seguintes relações para a frequência da esfera:

$$f_{de} D = f_{pi} d_{pi} = f_{pe} d_{pe} \quad (2.32)$$

A partir da substituição da Equação (2.31), sem o termo do número de esferas, e da Equação (2.24), obtém-se:

$$f_{de} = \frac{d}{2D} \left[(f_{pi} - f_{pe}) \left(1 - \frac{D^2 \cos^2 \beta}{d} \right) \right] \quad (2.33)$$

Vale ressaltar, que a frequência de defeito na esfera pode sofrer alterações ou em alguns casos não aparecer em uma aquisição devido o seu caráter não determinístico.

Neste trabalho, serão usados rolamentos, cuja pista externa é a pista girante e a pista interna é a estacionária. De posse das Equações (2.26), (2.29), (2.31) e (2.33) e com a eliminação das frequências de rotação da pista interna, $f_{pi} = 0$, obtém-se as equações indicadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1- Frequências características de defeito nos elementos dos rolamentos estudados.

<i>Frequências</i>	<i>Equações</i>
<i>Frequência da Gaiola</i>	$f_g = \frac{f_{pe}}{2} \left(1 + \frac{D \cos \beta}{d} \right)$
<i>Frequência de Defeito na Pista Interna</i>	$f_{dpi} = \frac{N_e f_{pe}}{2} \left(1 + \frac{D \cos \beta}{d} \right)$
<i>Frequência de Defeito na Pista Externa</i>	$f_{dpe} = \frac{N_e f_{pe}}{2} \left(1 - \frac{D \cos \beta}{d} \right)$
<i>Frequência de Defeito na Esfera</i>	$f_{de} = \frac{d f_{pe}}{2D} \left(1 + \frac{D^2 \cos^2 \beta}{d^2} \right)$

2.6 Vibrações Geradas por Defeitos Localizados

Defeito localizado em ponto que não tem movimento em relação à região de carregamento

Quando a falha em uma superfície do rolamento golpeia outra superfície, um impulso é gerado, o qual excita ressonâncias do rolamento e da máquina. Como o rolamento gira, estes

impulsos irão ocorrer periodicamente com uma frequência que depende unicamente da posição do defeito (MacFadden, 1984). A severidade e extensão do defeito podem influenciar na forma do pulso (Tando, 1997). Devido à pequena duração do impulso, na maioria das vezes, a sua forma é desprezada, podendo ser modelado por uma função de impulso $\delta(t)$, logo:

$$d(t) = d_0 \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t - kT_d) \tag{2.34}$$

onde, os impulsos são gerados em intervalos regulares T_d , e têm amplitude constante d_0 . A frequência do defeito é obtida pela expressão: $f_d = 1/T_d$. A função pode ser graficamente, representada pela Figura 2.8.

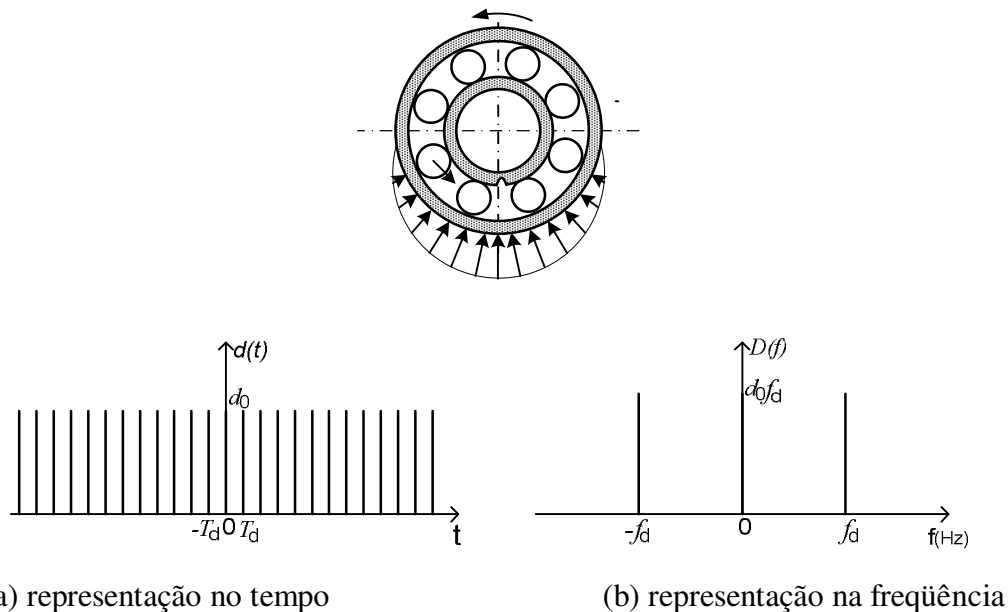


Figura 2.8 – Impulsos gerados pela passagem de esferas no defeito na pista estacionária.

Defeito localizado em ponto que tem movimento em relação à região de carregamento

Se o defeito está localizado em uma região do rolamento que tem movimento em relação à região de carga, seus impulsos sofrem uma modulação que será proporcional ao carregamento. Uma maneira de expressar a amplitude dos impulsos pode ser obtida pela multiplicação de uma série de impulsos $d(t)$, produzidos por um defeito que não tem movimento em relação à região de

carregamento, pela distribuição de carregamento $q(t)$, que pode ser obtida a partir da Equação (2.35), expressa da seguinte forma:

$$q(t) = \begin{cases} q_0 \left[1 - \frac{1}{2\varepsilon} (1 - \cos \psi) \right]^n & \text{para } \psi_{\min} \leq \psi \leq \psi_{\max} \\ 0 & \text{para região fora da faixa} \end{cases} \quad (2.35)$$

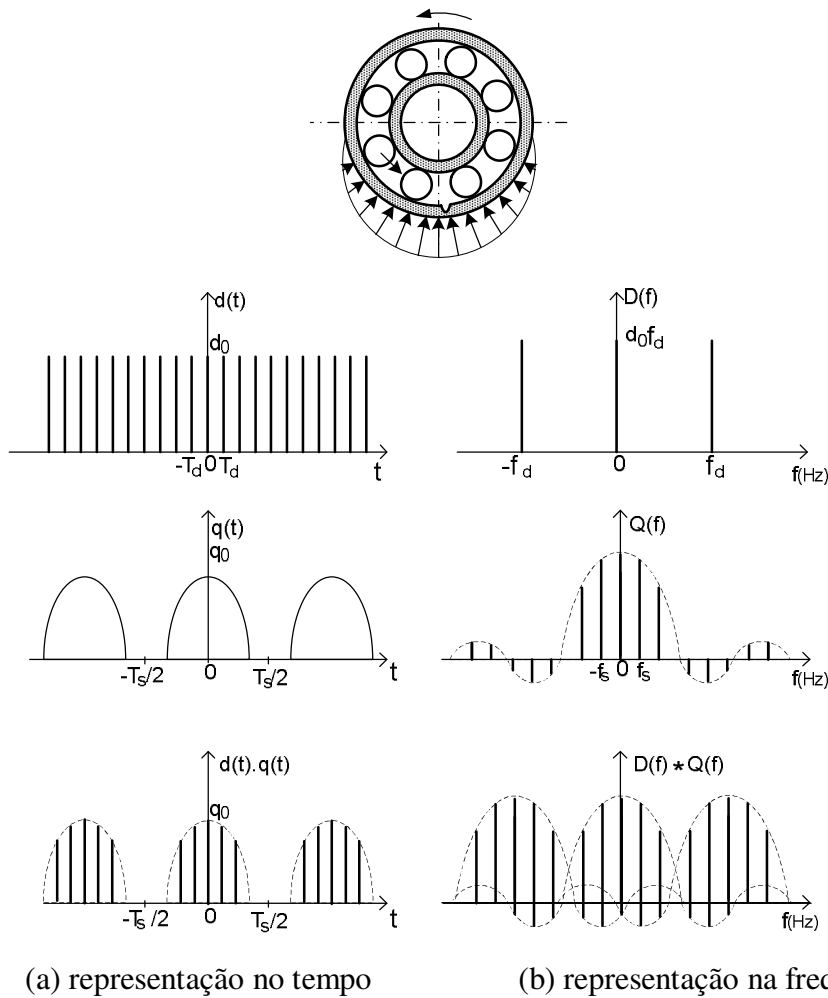


Figura 2.9 – Impulsos gerados pela passagem de esferas no defeito na pista girante.

A Figura 2.9 representa os impulsos modulados pela região de carga do rolamento. A modulação do impulso é obtida pelo produto direto $d(t).q(t)$, ambas reais e pares e suas transformadas de Fourier, é o produto de convolução, $D(f)*Q(f)$ são também reais e pares (McFadden, 1984).

CAPÍTULO 3

TÉCNICAS DE DETECÇÃO DE FALHAS EM ROLAMENTOS

3.1 Introdução

As técnicas que utilizam medidas de vibração são largamente utilizadas e podem ser classificadas em três grupos de acordo com o domínio em que o sinal é tratado. Têm-se os métodos no domínio do tempo, métodos no domínio da frequência e métodos no domínio tempo-frequência que são os mais recentes.

Os métodos no domínio do tempo são os mais simples. Destes métodos os mais difundidos são Nível Global RMS e Fator de Crista. Além destes, são usados os momentos de primeira, segunda, terceira, quarta e sexta ordem, que são conhecidos como média, variância, assimetria, curtose e momento de sexta ordem sendo os três últimos normalizados em relação ao desvio padrão (Dyer & Stewart, 1978; Tando & Nakra, 1992). Estes métodos são, em geral, qualitativos, ou seja, podem, em alguns casos, indicar a presença de falha, porém não permitem a identificação do tipo da falha.

Neste capítulo, será feito um estudo de técnicas de identificação de falhas no domínio do tempo e de técnicas no domínio da frequência.

3.2 Técnicas de Identificação de Falhas em Rolamentos por Monitoramento de Vibração no Domínio do Tempo.

Média, nível global rms, pico e fator de crista

Os métodos no domínio do tempo: média absoluta (X_{med}), nível global rms (X_{rms}) e fator de crista (Fcr) são os mais simples, sendo este último a razão do valor de pico (X_{pico}) pelo valor do X_{rms} . A média absoluta, o valor X_{rms} e o Fcr são dados pelas expressões:

$$X_{med} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |x_k|, \quad (3.1)$$

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k^2}, \quad (3.2)$$

$$Fcr = \frac{X_{pico}}{X_{rms}}. \quad (3.3)$$

O valor do X_{rms} dá uma estimativa do conteúdo de energia do sinal vibratório, ele é usado para estimar a severidade de vibração proveniente da estrutura de uma máquina ou de fatores externos, sendo mais usado que a média (Mitchell, 1993). Na Figura 3.1, pode-se observar a relação existente entre média, pico e valor rms e a amplitude de um sinal senoidal.

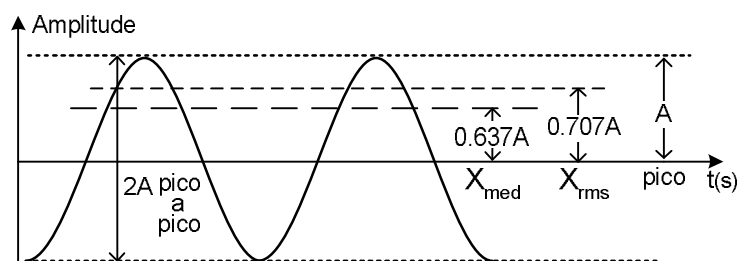


Figura 3.1– Média, valor rms e pico.

Na Figura 3.2, está representada um sinal de defeito na pista estacionária de um rolamento. Com o surgimento de uma pequena falha no rolamento, o valor de X_{pico} sofre uma elevação maior que o X_{rms} , como consequência o valor do F_{cr} sofre uma elevação.

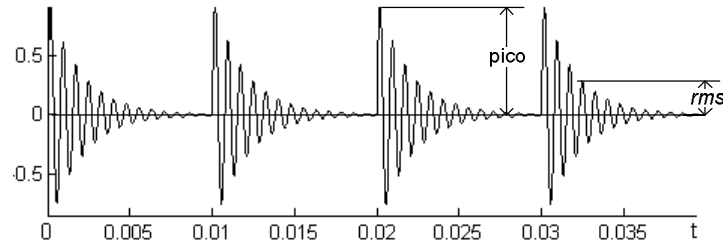


Figura 3.2 – Pico e valor de rms para um rolamento com defeito

Na Figura 3.3 (a), estão representados o valor de X_{pico} e o valor do X_{rms} para diferentes condições do rolamento. A Figura 3.3 (b) apresenta a variação do F_{cr} para as mesmas condições. Observa-se que, enquanto o defeito é incipiente, o X_{pico} e o F_{cr} conseguem indicar de forma clara o surgimento de uma falha na pista ou esfera do rolamento. Por outro lado, à medida que o defeito se espalha pela superfície do rolamento o nível de ruído aumenta, elevando o valor do X_{rms} mais rápido que o valor de pico. Logo, o F_{cr} sofre uma diminuição em seu valor. O que demonstra que o F_{cr} não é um bom indicador de falhas em um estágio de falha severa (Nepomuceno, 1999; Mitchell, 1993).

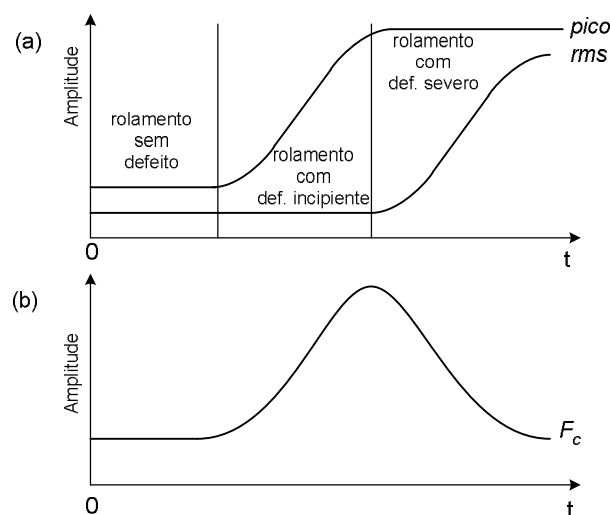


Figura 3.3 – (a) pico e valor rms (b) fator de crista

Uma forma encontrada de eliminar este problema foi a criação do Fator K (F_k). Que é o produto do X_{rms} e X_{pico} , ou seja:

$$F_k = X_{pico} X_{rms} \quad (3.4)$$

Na Figura 3.4, estão representados o fator K e o seu comportamento em relação à condição do rolamento.

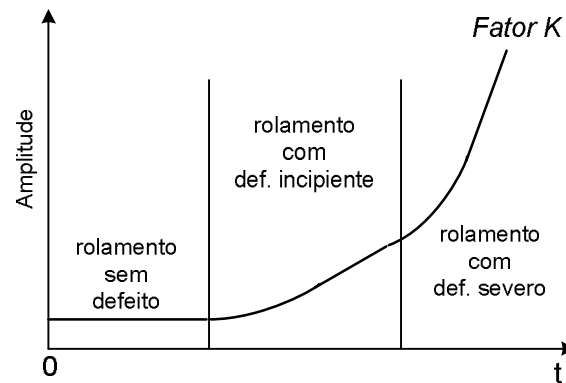


Figura 3.4 – Fator K

Outros fatores que vem sendo utilizados são fatores relacionados à densidade de probabilidade. Nos rolamentos sem falha, a densidade de probabilidade do sinal de aceleração de um rolamento tem uma distribuição Gaussiana, logo o valor de assimetria tende a 0 e o valor de curtose tende a $3 \pm 8\%$ (Dyer & Stewart, 1978; Martin & Honarvar, 1995). A variância (σ^2), assimetria ou “skewness” (γ_3) e curtose (γ_4) são parâmetros estatísticos que podem ser usados com o objetivo de auxiliar a detecção de falhas em rolamentos, pois com o surgimento da falha a densidade de probabilidade do sinal de aceleração, de um rolamento, não é mais uma distribuição Gaussiana ocasionando assim, mudanças na variância, assimetria e curtose (Dyer & Stewart, 1978; Tandon, 1999).

Pode-se calcular a variância, assimetria e curtose pelas seguintes expressões:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N}, \quad (3.5)$$

$$\gamma_3 = \frac{M_3}{\sigma^3}, \quad (3.6)$$

$$\gamma_4 = \frac{M_4}{\sigma^4}, \quad (3.7)$$

onde, momento de ordem γ_n é:

$$\gamma_n = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^n, \quad (3.8)$$

e:

μ = média;

σ = Desvio Padrão.

Com o surgimento de uma falha, no rolamento, o valor de curtose aumenta. À medida que a falha se espalha pela superfície da pista ou esfera o valor de curtose diminui podendo atingir valores iguais ou menores que três mascarando uma possível falha no rolamento (Tandon, 1999). Com o objetivo de evitar erros alguns pesquisadores aconselham o uso da curtose em bandas de frequências selecionadas (Dyer, 1978; Martin & Honarvar, 1995; Tandon, 1999).

A Figura 3.5 representa o valor de curtose para uma senoide, um sinal ruidoso de um rolamento sem defeito e um sinal de defeito na pista estacionária do rolamento.

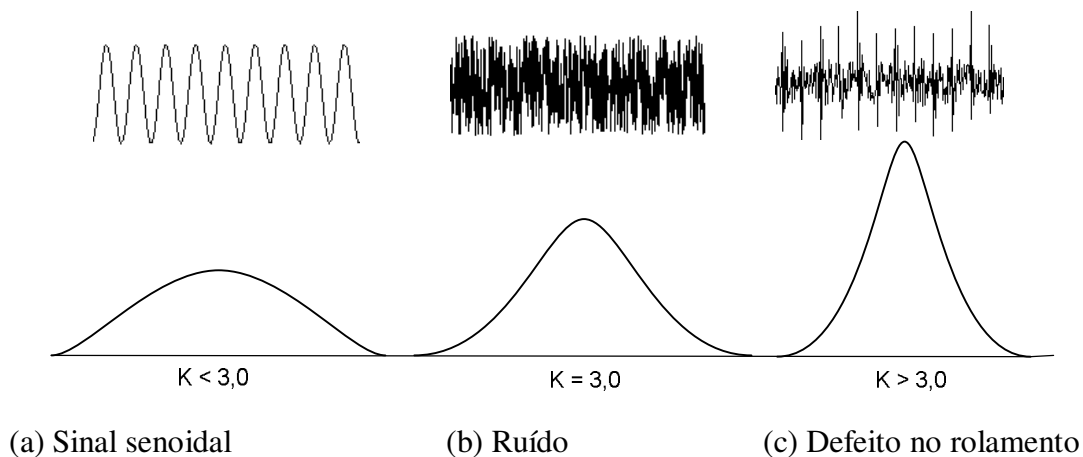


Figura 3.5 – Valor de curtose para alguns sinais.

Um fato interessante relativo aos parâmetros estatísticos é que os momentos estatísticos ímpares dão informações sobre a posição do pico da densidade de probabilidade em relação ao valor médio, enquanto os parâmetros relacionados a valores pares indicam a expansão ou achatamento da distribuição. Para uma perfeita normal, os momentos ímpares tendem a zero e os momentos pares têm valores finitos (Martin & Honarvar, 1995). Os valores destes parâmetros obtidos para o sinal de um rolamento sem defeito e de um rolamento com defeito são diferentes, o que demonstra que estes podem ser usados para indicar o surgimento de falha em um rolamento.

A Figura 3.6 representa a assimetria que é um momento estatístico de ordem ímpar.

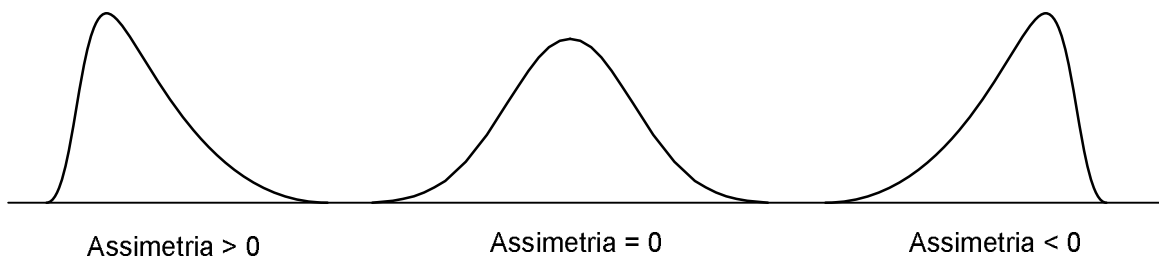


Figura 3.6 – Valores de assimetria de uma distribuição.

Um outro parâmetro estatístico que pode ser usado com o objetivo de fornecer informações sobre o estado do rolamento é o momento central de sexta ordem (γ_6) (Dyer, 1978; Samanta & Al-Blalushi, 2001). O momento de sexta ordem é obtido a partir da expressão:

$$\text{Momento central de sexta ordem} = \gamma_6 = \frac{M_6}{\sigma^6} \quad (3.9)$$

3.3 Técnicas de Identificação de Falhas em Rolamentos por Monitoramento de Vibração no Domínio da Frequência.

Os métodos apresentados no item anterior são métodos qualitativos, possibilitam verificar o surgimento de falhas, porém, não possibilitam identificar onde a falha ocorreu. Quando se deseja identificar onde ocorreu a falha, utilizam-se métodos no domínio da frequência ou no domínio tempo-frequência. Porém, é bom ressaltar que nem toda técnica que utiliza o domínio da frequência possibilita identificar o tipo de falha.

Das diversas técnicas no domínio da frequência serão enfocadas as técnicas de Densidade espectral de potência (Energia Residual), cepstrum e envelope com e sem uso de filtro adaptativo.

3.3.1 Método da Energia Residual

Este método é proposto como uma alternativa aos parâmetros utilizados como alarme de defeito. Consiste em obter o sinal do rolamento sem defeito e em seguida calcula-se a densidade espectral de potência do sinal que servirá de padrão $DEP(S_p)$. Quando se deseja saber a condição do rolamento, uma nova aquisição é feita e em seguida, calcula-se a sua densidade espectral de potência $DEP(S_r)$. A energia residual é o valor da área obtida a partir do módulo da diferença das duas densidades. Para obtenção das Densidades espectrais foi utilizado o método proposto por Welch (Proakis, 1996), Considerando um rolamento cujo sinal é composto seguinte forma:

$$S_r(t) = n(t) + d_{ef}(t), \quad (3.10)$$

onde:

$S_r(t)$ = sinal do rolamento;

$n(t)$ = é parcela de normalidade do sinal;

$d_{ef}(t)$ = é a parcela de defeito do sinal.

Caso o rolamento não apresente defeito, sua parcela de defeito será nula, ou seja: $d_{ef}(t) = 0$. Caso contrário esta parcela não será nula, logo a parcela do sinal referente ao defeito será obtida a partir da relação:

$$d_{ef}(t) = S_r(t) - n(t) . \quad (3.11)$$

A Figura 3.7 representa a energia residual obtida para um rolamento com defeito na pista interna. Na Figura 3.7 (a), estão representados os gráficos da densidade espectral de potência do rolamento sem defeito (linha vermelha contínua) e do mesmo rolamento após o surgimento de defeito na pista interna. A Figura 3.7 (b) apresenta o gráfico obtido a partir do módulo da diferença do sinal do rolamento com defeito e do sinal sem defeito. O valor obtido para energia residual foi de 65.3551.

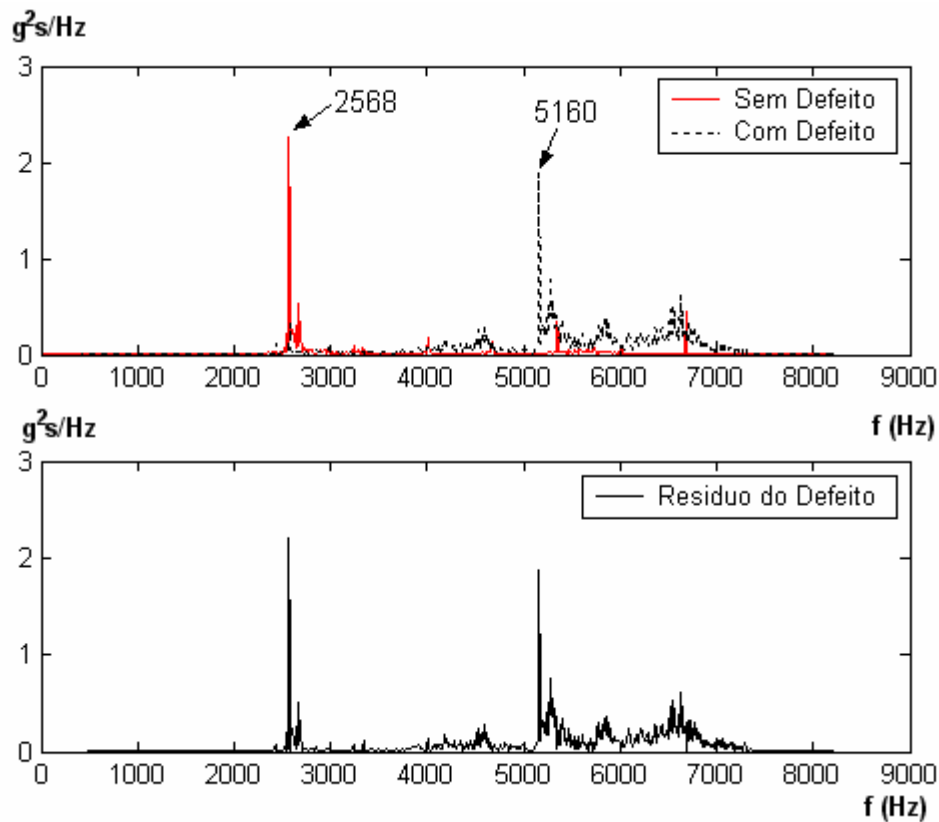


Figura 3.7 – Energia residual.

Este método se mostrou mais eficiente que os de variância, curtose e rms para a detecção de falhas em rolamentos, independente do carregamento e da velocidade (Almeida et al, 2001).

3.3.2 -Técnica de Envelope

Para que a técnica de envelope seja bem entendida é necessária a apresentação de alguns conceitos importantes: Modulação e Demodulação.

Modulação

Existem diversos tipos de modulação dos quais podemos destacar: modulação em amplitude (AM), em frequência (FM) e em fase (PM). Os rolamentos quando submetidos à velocidade constante, as falhas que ocorrem em pontos da pista ou esfera que se deslocam em relação à região de carga sofrem modulação em amplitude (McFadden, 1984; Braun, 1986; Mitchell, 1993).

Como foi visto no capítulo anterior, para que haja uma modulação em frequência no rolamento é necessário que a frequência de rotação do rolamento sofra variação durante o processo de aquisição. Durante os ensaios realizados para esse trabalho, a velocidade de rotação do rolamento foi mantida constante, logo se houver modulação em algum sinal de defeito, será em amplitude.

Para que haja modulação são necessárias duas ondas: uma moduladora e uma portadora. Na modulação em amplitude a portadora terá sua amplitude modificada proporcionalmente ao sinal modulante. A portadora é dada por:

$$S_p(t) = A_p \cos(\omega_p t), \quad (3.12)$$

onde,

$A_p =$ amplitude da portadora;

$\omega_p =$ frequência da portadora.

Considerando-se um sinal qualquer modulante $S_m(t)$ com frequência menor que a frequência do sinal portador. Variando-se a amplitude da portadora, proporcionalmente à moduladora $S_m(t)$ a amplitude instantânea será:

$$A(t) = A_p [1 + K S_m(t)], \quad (3.13)$$

onde K é uma constante conhecida como sensibilidade de amplitude.

Obtendo-se uma função modulada dada por:

$$S_{AM}(t) = A(t) \cos(\omega_p t) = A_p [1 + K S_m(t)] \cos(\omega_p t). \quad (3.14)$$

Considerando-se que o sinal modulador $S_m(t)$ é um sinal senoidal tem-se:

$$S_m(t) = A_m \cos(\omega_m t). \quad (3.15)$$

Substituindo-se a Eq. (3.15) na Eq. (3.14), obtém-se:

$$S_{AM}(t) = [A_p + KA_m \cos(\omega_m t)] \cos(\omega_p t). \quad (3.16)$$

Expandindo-se a Eq. (3.16), obtém-se a seguinte expressão:

$$S_{AM}(t) = \underbrace{A_p \cos(\omega_p t)}_{\text{Portadora}} + \underbrace{\frac{KA_m}{2} \cos(\omega_p - \omega_m)t}_{\text{Banda lateral Inferior}} + \underbrace{\frac{KA_m}{2} \cos(\omega_p + \omega_m)t}_{\text{Banda lateral Superior}}. \quad (3.17)$$

Um parâmetro importante na modulação é o *índice de modulação* (m), que pode ser obtido a partir da razão entre a maior amplitude do sinal modulador pela maior amplitude do sinal portador. Quando o índice de modulação atinge valor maior que a unidade, haverá distorção na modulação (Haykin, 1989; Haykin & Veen, 2001).

$$m = \frac{A_m}{A_p} \quad \therefore \quad m \begin{cases} < 1 \text{ não haverá distorção} \\ > 1 \text{ haverá distorção} \end{cases}$$

Com a substituição do termo A_m por $A_p m$ na Equação (3.17), obtém-se:

$$S_{AM}(t) = A_p \cos(\omega_p t) + \frac{Km A_p}{2} \cos(\omega_p - \omega_m)t + \frac{Km A_p}{2} \cos(\omega_p + \omega_m)t. \quad (3.18)$$

A Transformada de Fourier a um co-seno é dada por:

$$\mathfrak{F}[\cos(\omega_x t)] = \pi \delta(\omega - \omega_x) + \pi \delta(\omega + \omega_x), \quad (3.19)$$

Logo, aplicando-se a Transformada de Fourier à função modulada dada pela Equação (3.18), obtém-se:

$$\begin{aligned} \mathfrak{F}[S_{AM}(t)] = & A_p [\pi \delta(\omega - \omega_p) + \pi \delta(\omega + \omega_p)] + \\ & \frac{Km A_p}{2} [\pi \delta(\omega - (\omega_p - \omega_m)) + \pi \delta(\omega + \omega_p - \omega_m)] + \\ & \frac{Km A_p}{2} [\pi \delta(\omega - (\omega_p + \omega_m)) + \pi \delta(\omega + \omega_p + \omega_m)], \end{aligned} \quad (3.20)$$

onde, a Figura 3.8 representa o espectro obtido após a aplicação da transformada de Fourier.

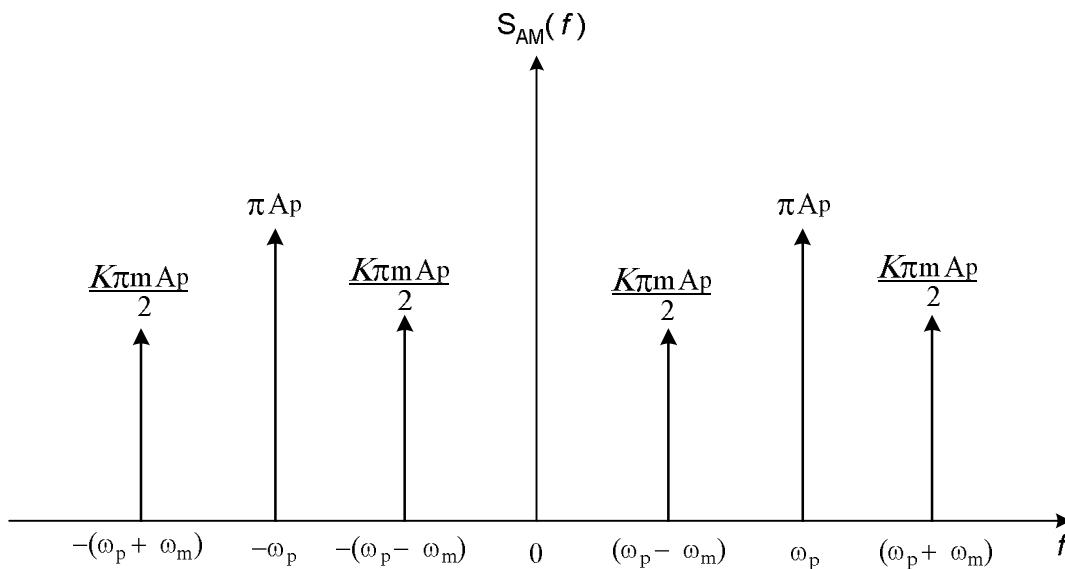


Figura 3.8 – Espectro de Frequência de um Sinal AM

Observando-se a Figura 3.8, pode-se verificar que quanto maior a amplitude da frequência portadora maiores serão as amplitudes do espectro. No caso de falhas em rolamentos, estas amplitudes estão diretamente relacionadas às amplitudes das cargas na região de carregamento.

Na Figura 3.9, estão representadas uma função portadora, uma função moduladora, a modulação e o espectro da função modulada. Verifica-se que no espectro da função modulada aparece a frequência do sinal portador ladeada por duas frequências espaçadas, da principal, de um valor igual à frequência do sinal de modulação.

Quando em um rolamento ocorre uma falha em uma ponta da pista que se movimenta, em relação à região de carga, haverá uma modulação cuja frequência é igual a do deslocamento do ponto de falha em relação à região de carregamento.

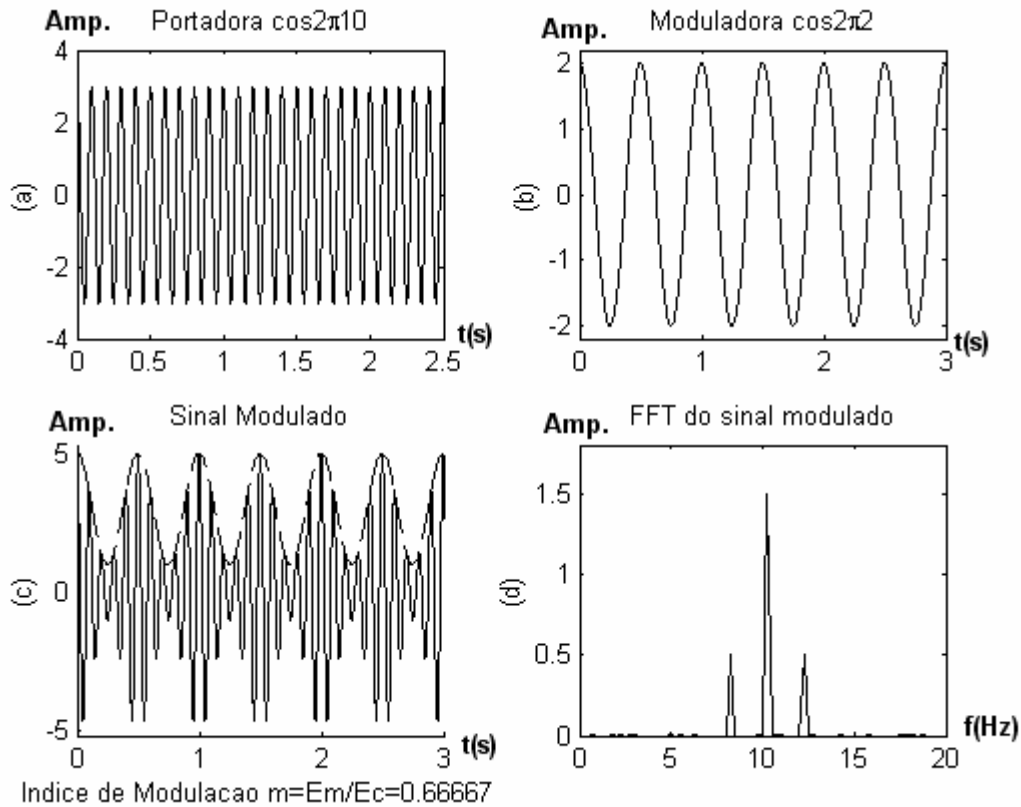


Figura 3.9 – (a) sinal portador; (b) sinal modulador; (c) sinal modulado; (d) fft do sinal modulado

Demodulação

Como visto na Figura 3.9 (c), após a modulação, obtém-se um sinal $S_{AM}(t)$ cujos picos encontram-se ligados por uma curva, representada pela linha tracejada, denominada de envelope. O processo de demodulação em amplitude consiste em extrair o envelope. Na obtenção do envelope, pode ser usado um processo analógico através de placas chamadas de “detector de envelope” ou digitalmente através da transformada de Hilbert (Haykin, 1989; Haykin & Veen, 2001).

Por ser um procedimento de fácil implementação e versátil, optou-se pela utilização da Transformada de Hilbert. A transformada de Hilbert expressa uma relação entre as componentes reais e imaginárias da transformada de Fourier de um sinal causal. Sinal causal é todo sinal que é nulo para o tempo negativo (Bendat & Piersol, 1986; Randal, 1987).

Todo sinal causal pode ser obtido pela relação entre um sinal par e um sinal ímpar. A Figura 3.10 (a), (b) e (c) representa um sinal causal e a função par e ímpar que adicionadas geram o sinal causal.

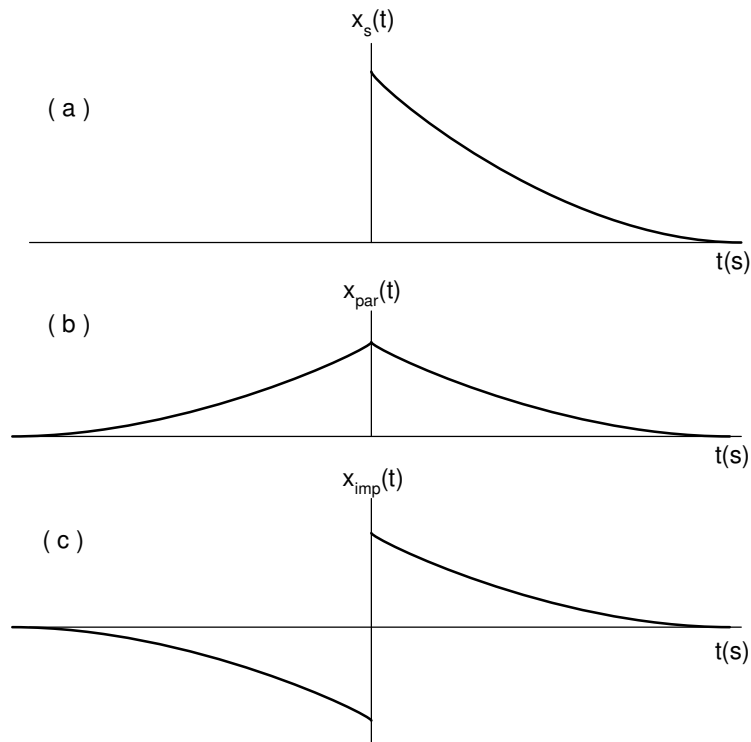


Figura 3.10 - sinal causal (a) sinal causal; (b) função par; (c) função ímpar.

Observando-se a Figura 3.10 pode-se ver que o sinal causal, pode ser obtido a partir da relação:

$$x_s(t) = x_{par}(t) + x_{imp}(t) \quad (3.21)$$

onde:

$$\begin{aligned}x_{par}(t) &= \text{função par;} \\x_{imp}(t) &= \text{função impar.}\end{aligned}$$

Usando-se uma função sinal $sgn(t)$, onde $sgn(t) = 1$ para $t > 0$ e $sgn(t) = -1$ para $t < 0$, a partir da qual as funções, par e impar podem ser expressas da seguinte forma:

$$\begin{aligned}x_{par}(t) &= x_{imp}(t) sgn(t) \\x_{imp}(t) &= x_{par}(t) sgn(t).\end{aligned}\tag{3.22}$$

A relação acima garante que os sinais pares e ímpares não são independentes. A partir destes conceitos iniciais, serão desenvolvidas algumas relações com a transformada de Fourier com o objetivo de relacionar as componentes pares e ímpares do sinal e as partes reais e imaginárias da transformada Fourier. Como a única diferença entre as transformadas direta e inversa de Fourier é o sinal da exponencial, algumas relações podem ser estabelecidas. De forma mais geral, as seguintes relações são válidas (Randal, 1987):

$$x(t) \xleftrightarrow{\mathfrak{F}} X(f) \xleftrightarrow{\mathfrak{F}} x(-t) \xleftrightarrow{\mathfrak{F}} X(-f) \xleftrightarrow{\mathfrak{F}} x(t)\tag{3.23}$$

Tem-se ainda, que para um sinal real a propriedade:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i2\pi ft} dt = X^*(-f),\tag{3.24}$$

é válida, onde $X^*(-f)$ é o conjugado de $X(f)$, logo:

$$\text{Re}(f) = \text{Re}(-f) \quad \text{e} \quad \text{Im}(f) = -\text{Im}(-f)\tag{3.25}$$

$$X(f) = \text{Re}(f) + i \text{Im}(f)\tag{3.26}$$

Pode-se concluir que a parte real da transformada de Fourier é uma função par e a parte imaginária é uma função ímpar. Da Equação 3.23, tem-se que para um sinal real e par $x(t)=x(-t)$, pode-se então concluir que $X(f) = X(-f)$. A partir da Equação 3.24 chega-se a:

$$\operatorname{Re}(f) + i\operatorname{Im}(f) = \operatorname{Re}(f) - i\operatorname{Im}(f) \quad (3.27)$$

Logo, para que a relação seja válida $\operatorname{Im}(f) = 0$. Seguindo-se o mesmo procedimento anterior, para um sinal real e ímpar, podemos afirmar que:

- Para um sinal real par o seu espectro é real par;
- Para um sinal real ímpar o seu espectro é imaginário e ímpar.

De posse das relações observadas anteriormente, volta-se as Equações 3.21 e 3.22, a fim de se estabelecerem algumas relações entre as componentes reais e imaginárias da transformada de Fourier do sinal, assim:

$$\mathfrak{S}\{x(t)\} = \mathfrak{S}\{x_{par}(t)\} + \mathfrak{S}\{x_{imp}(t)\} \quad (3.28)$$

$$\mathfrak{S}\{x(t)\} = X(f) = X_{Re}(f) + iX_{im}(f) \quad (3.29)$$

Levando-se em conta as relações estabelecidas anteriormente, tem-se:

$$X_{Re}(f) = \mathfrak{S}\{x_{par}(t)\} \quad (3.30)$$

e

$$iX_{im}(f) = \mathfrak{S}\{x_{imp}(t)\} \quad (3.31)$$

Como dito anteriormente, a transformada de Hilbert expressa a relação entre a parte real e imaginária da transformada de Fourier de um sinal, tem-se que:

$$X_{Re}(f) = \mathfrak{S}\{x_{par}(t)\} = \mathfrak{S}\{x_{imp} \operatorname{sgn}(t)\} \quad (3.32)$$

Pelo teorema da convolução, a relação acima pode ser reescrita da seguinte forma:

$$X_{Re}(f) = \mathfrak{S}\{x_{imp}\} * \mathfrak{S}\{\operatorname{sgn}(t)\} \quad (3.33)$$

Como $\mathfrak{I}\{\text{sgn}(t)\} = \frac{1}{i\pi f}$, a Equação 3.32 pode ser reescrita obtendo-se:

$$X_{\text{Re}}(f) = iX_{\text{im}}(f) \frac{1}{i\pi f} = X_{\text{im}}(f) \frac{1}{\pi f} \quad (3.34)$$

Logo, a transformada de Hilbert do sinal pode ser expressa por:

$$H\{x(t)\} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \frac{1}{t-\tau} = x(t) * \left(\frac{1}{\pi t} \right) \quad (3.35)$$

O gráfico (c) da Figura 3.11 representa um sinal que, após o processo de modulação, foi “envelopado”, e o gráfico (d), representa o envelope obtido após a aplicação da transformada de Hilbert.

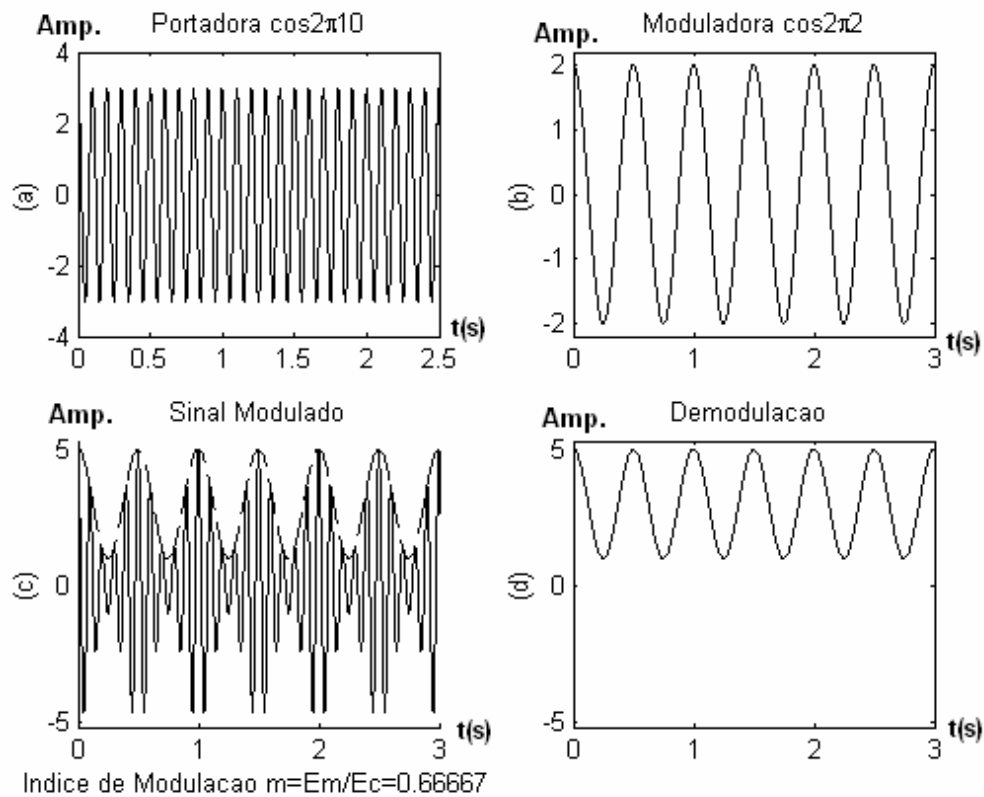


Figura 3.11 – Demodulação de um sinal; (a) sinal portador; (b) sinal modulador; (c) sinal modulado; (d) envelope do sinal modulado.

Técnica de Envelope

A técnica de envelope é composta de um conjunto de procedimentos aplicados ao sinal (Figura 3.12).

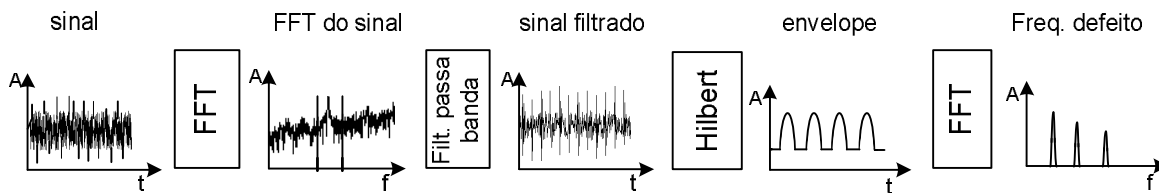


Figura 3.12 Procedimento adotados na técnica de Envelope

Aplicação da Transformada de Fourier ao Sinal

A transformada de Fourier do sinal de aceleração é o primeiro passo a ser tomado quando vai se usar a técnica de envelope. Após aplicação, o sinal obtido é analisado com o objetivo de se definir a faixa de filtragem.

O que se busca, nesta etapa, é localizar uma faixa de frequências onde houve elevação, em relação às medidas anteriores de picos de frequência. Esta elevação ocorre devido à excitação de frequências naturais características do rolamento ou estrutura, devido à falha no rolamento. Em muitos casos, quando não há dados anteriores ou quando a quantidade de energia do sinal de falha é pequena, há uma certa dificuldade em localizar esta faixa. Uma alternativa é usar um filtro com uma banda de filtragem maior (Mitchell, 1993).

Filtro Passa Banda

Nesta etapa, é aplicado ao sinal um filtro passa banda, cujo objetivo é eliminar baixas frequências de alta amplitude, que em geral, estão relacionadas ao desalinhamento e ao desbalanceamento. Nesta primeira etapa, um dos problemas encontrados é a definição do tamanho da banda do filtro, pois alguns especialistas aconselham que a banda de corte tem que estar em torno de uma região em que ocorreu excitação de frequências naturais características excitadas devido à falha. Muitas vezes, a definição desta faixa é difícil, principalmente, se a falha for incipiente que tem grau de energia baixo. Desta forma não haverá uma elevação, considerável, na região de excitação de frequências naturais. Por outro lado, outros especialistas

aconselham que região de filtragem pode ter uma banda maior desde que a frequência inicial do filtro seja no mínimo dez vezes a frequência de rotação da pista girante (Mitchell, 1993).

Pode-se observar que, se não há um conhecimento prévio das frequências de ressonância do rolamento ou estruturas, que serão excitadas pelo defeito, a escolha das bandas de filtragem passa a ser um método de tentativa e erro.

Aplicação da Transformada de Hilbert

A aplicação da transformada de Hilbert é um processo de demodulação, como foi visto anteriormente. O seu objetivo é a obtenção do envelope do sinal de defeito, que é um sinal de baixa frequência. Portanto, para cada tipo de defeito, o envelope traz informações características do defeito.

Aplicação da Transformada de Fourier ao Envelope

Esta é a última etapa do método de envelope. Após a aplicação da transformada de Fourier ao envelope do sinal, são obtidas as frequências dos defeitos. Se a frequência obtida é F_1 e tem como bandas laterais $2x F_1$, $3x F_1$, ... pode-se concluir que a falha ocorreu na pista parada em relação à região de carregamento. Caso a frequência principal obtida seja F_1 e as bandas laterais estejam espaçadas com valores de frequências igual à frequência de rotação, pode-se concluir que a falha está na pista girante em relação à região de carregamento. Se por outro lado à frequência principal tem como bandas laterais frequências com valores iguais à frequência da gaiola, pode-se concluir que o defeito é na esfera (McFadden, 1984).

Filtros Adaptativos

Na técnica de envelope, após o sinal passar pelo filtro passa banda, grande parte do ruído do sinal é eliminada. Porém, em alguns casos, a parcela de ruído restante no sinal compromete o desempenho da técnica de envelope. Este problema pode ser minimizado filtrando mais uma vez o sinal antes da aplicação da transformada de Hilbert. Uma alternativa seria usar um filtro de Kalmann, Figura 3.13.

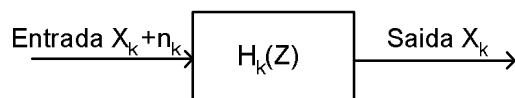


Figura 3.13 Filtragem de um sinal com ruído.

Onde, X_k é o sinal de entrada do filtro contaminado pelo ruído n_k , $H_k(Z)$ é a função transferência do filtro cujo objetivo é deixar passar somente o sinal X_k . Para que esta eliminação fosse feita de forma satisfatória seria necessário um conhecimento prévio do sistema e do sinal desejado, assim os parâmetros do filtro poderiam ser definidos (Widrow & Stearns, 1985).

Uma forma alternativa para retirada do ruído n_k é a utilização de um filtro adaptativo cujos parâmetros não são fixos e se ajustam de acordo com as características do sinal. O diagrama mostrado na Figura 3.14 representa um filtro adaptativo com seus componentes.

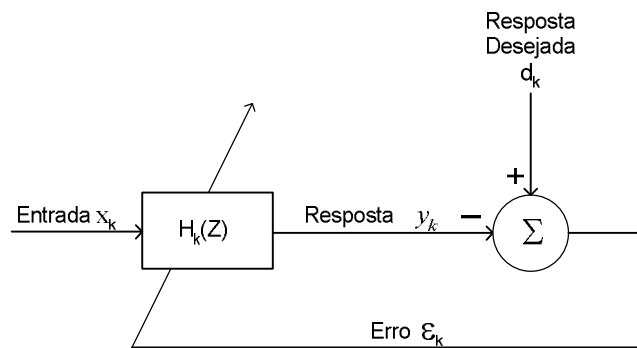


Figura 3.14- Diagrama representativo de um filtro adaptativo.

Onde X_k é o sinal de entrada do filtro, y_k é a saída do filtro, d_k é a saída desejada e $H_k(Z)$ é a função transferência do filtro que sofrerá modificação em seus parâmetros através de um algoritmo adaptativo, até que o erro seja minimizado. O erro é dado pela seguinte expressão:

$$\epsilon_k = d_k - y_k. \quad (3.36)$$

A representação vista na Figura 3.14 tem um significado ilustrativo, pois, não faz sentido a busca de uma saída desejada se a mesma já é conhecida. Um algoritmo que pode ser usado na implementação do filtro adaptativo é o Least-Mean Square (LMS) (Stearns, 1996).

Algorithm Least-Mean Square (LMS)

Este é o algoritmo mais usado na implementação de filtros adaptativos, pois além de ser simples de implementar é eficiente. Este filtro surgiu na literatura em 1960, e desde então tem

servido para um grande número de pesquisas, bem como suporte para evolução de muitos algoritmos adaptativos (Stearns,1996). A relação entre o sinal de entrada e sinal de saída é:

$$y_k = \sum_{n=0}^L b_n(k)x_{k-n} \quad (3.37)$$

onde, L números de coeficientes do filtro, $b_n(k)$ são os coeficientes do filtro que irão variar através da aplicação do algoritmo adaptativo. Como o algoritmo adaptativo está relacionado diretamente com a minimização do valor do erro quadrático médio $E[\varepsilon^2]$ e observando-se a Equação 3.37 verifica-se que os parâmetros do filtro estão relacionados com o erro, já que a saída y_k depende dos parâmetros $b_n(k)$. Portanto, há uma relação quadrática entre o erro e os parâmetros $b_n(k)$ no algoritmo adaptativo. A título de ilustração, considerando-se somente um coeficiente do filtro ($L=0$) tem-se um valor $b_0(0)$ que é a condição inicial do parâmetro, conforme Figura 3.15, à medida que o algoritmo vai sendo processado o parâmetro tende para um ponto de mínimo b_0^* , obtendo-se o ponto de mínimo do erro. Desta forma, o sinal de saída y_k está próximo do sinal de saída desejada d_k .

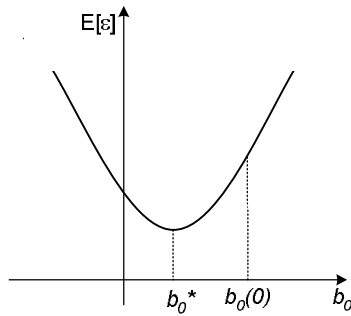


Figura 3.15- Erro quadrático médio.

A técnica utilizada pelo algoritmo LMS é baseada no método do passo descendente que usa a seguinte forma vetorial:

$$\mathbf{B}_{k+1} = \mathbf{B}_k - \mu \nabla_k \quad (3.38)$$

onde, \mathbf{B}_k é o vetor dos coeficientes do filtro, que pode ser expresso da seguinte forma:

$$\mathbf{B}_k = [b_0(k) \text{K} b_L(k)]^T,$$

e ∇_k é o vetor gradiente, dado pela seguinte expressão:

$$\text{Vetor gradiente: } \nabla_k = \frac{\partial E[\epsilon_k^2]}{\partial \mathbf{B}_k} = \left[\frac{\partial E[\epsilon_k^2]}{\partial b_0(k)} \mathbf{K} \frac{\partial E[\epsilon_k^2]}{\partial b_L(k)} \right]^T.$$

Na Equação 3.38, μ é taxa de convergência que está diretamente relacionada à velocidade de convergência do algoritmo e $-\nabla_k$ é o gradiente negativo da superfície gerada pelos coeficientes. Ao final do processamento $-\nabla_k$ tende para zero.

Na prática, a maior dificuldade encontrada no processo é estimar o gradiente da superfície, pois não se tem um conhecimento prévio da mesma. Esta dificuldade pode ser resolvida usando um gradiente que é estimado baseando-se no erro instantâneo quadrático.

$$\hat{\nabla}_k = \frac{\partial \epsilon_k^2}{\partial \mathbf{B}_k} = 2\epsilon_k \frac{\partial (d_k - y_k)}{\partial \mathbf{B}_k} \quad (3.39)$$

Como d_k independe dos coeficientes do filtro e y_k pode ser expressa em termos da entrada do filtro, a Equação 3.39 pode ser reescrita como:

$$\hat{\nabla}_k = -2\epsilon_k \mathbf{X}_k \quad (3.40)$$

onde, \mathbf{X}_k é um vetor de valores do sinal de entrada:

$$\mathbf{X}_k = [x_k \ x_{k-1} \ \dots \ x_{k-L}]^T.$$

A Equação 3.38 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\mathbf{B}_{k+1} = \mathbf{B}_k - 2\mu \epsilon \mathbf{X}_k \quad (3.41)$$

O esquema do filtro adaptativo utilizado está mostrado na Figura 3.16, onde o sinal de entrada é utilizado como sinal desejado. O sinal de entrada do filtro é o sinal de entrada com

atraso, que é escolhido de modo que a saída do filtro y_k deve ser igual à saída desejada d_k (Stearns,1996).

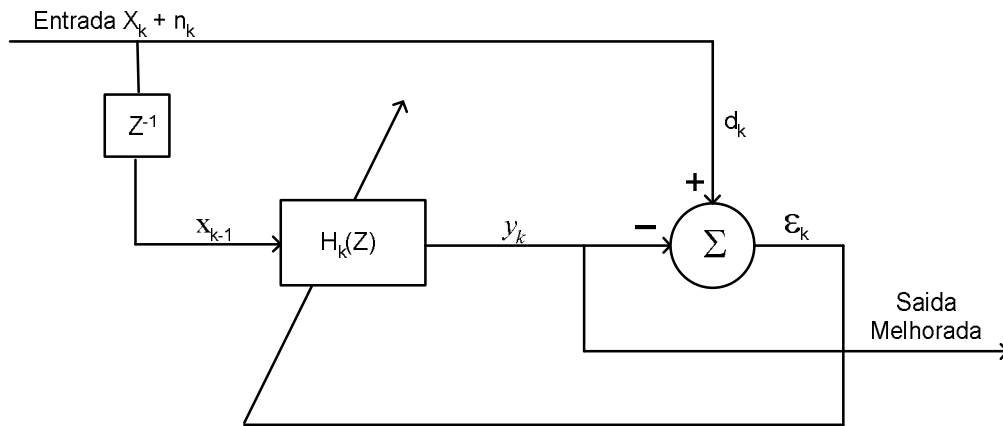


Figura 3.16- Diagrama representativo de um filtro adaptativo com entrada única.

A resposta desejada, $[d_k]$, contém componentes do sinal e ruído. Note que a sequência de entrada do filtro é simplesmente uma versão atrasada da resposta desejada. O atraso, Z^{-1} , é selecionado de tal forma que a componente de ruído em d_k e X_k não tenham correlação. Desta forma o *erro médio quadrático* é minimizado, quando o d_k e y_k são tão próximos quanto possível, durante o processo de adaptação os parâmetros do filtro são ajustados, a fim de passar as componentes do sinal e atenuar o ruído (Stearns,1996).

3.3.2- Cepstrum

Análise de cepstrum é o nome dado a um conjunto de técnicas que envolvem funções que podem ser consideradas como um "espectro do logaritmo de um espectro". Entretanto, atualmente a definição mais usual do cepstrum é a "Transformada Inversa do logaritmo do Espectro de Potência" (Randal, 1987). Que é obtido da seguinte forma:

$$C(x(t)) = \mathfrak{S}^{-1} \{ \log(G_{xx}(x(t))) \} \quad (3.42)$$

Esta análise possibilita a identificação de famílias de picos harmônicos presentes no espectro de frequência do sinal. A aplicação do logaritmo na amplitude enfatiza os picos harmônicos e reduz a influência de qualquer aleatoriedade imposta pelo caminho percorrido pelo sinal da falha até o ponto de aquisição do sinal (Randal, 1987). Quando a falha ocorre na pista girante do rolamento, aparecerá um pico cujo valor inverso do tempo ao qual o mesmo corresponde, é igual à frequência de rotação do eixo, que é moduladora do sinal. Se o defeito é na pista estacionária, aparecem vários picos com espaçamentos iguais. O valor inverso do tempo de espaçamento dos picos, é igual à frequência do defeito (Barkov & Barkova, 1995).

CAPÍTULO 4

APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS EM MODELOS MATEMÁTICOS

4.1 Introdução

Neste capítulo, são apresentados alguns modelos matemáticos de defeitos. Os defeitos apresentados representam falhas na pista interna, pista externa e esfera. Em seguida, é demonstrada a influência de velocidade de rotação e ruído nos parâmetros estatísticos. Também, são feitas comparações entre as técnicas de envelope com e sem uso do filtro adaptativo. Ao final do capítulo, será aplicada a técnica de Cepstrum aos diversos sinais de defeitos.

4.2 Modelo Matemático de Defeitos nos Rolamentos

No capítulo 2, foram apresentados os diversos tipos de carregamentos aos quais estão submetidos os rolamentos. Também foram mostradas as relações existentes entre as falhas e a região de carregamento. A seguir, são apresentados modelos que simulam as falhas tratadas no capítulo anterior, a partir das equações, nele propostas levando-se em conta que a pista interna é estacionária.

Aos modelos obtidos, serão aplicadas técnicas de análise de sinais para detecção de falhas buscando-se, assim, uma compreensão de como essas falhas são detectadas em cada técnica.

Os parâmetros usados na implementação dos modelos foram ajustados a partir de dados obtidos em ensaios de diversos tipos de falhas induzidas. Após a obtenção dos parâmetros, foram desenvolvidos modelos no MATLAB. Os parâmetros utilizados estão apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Parâmetros utilizados para implementação dos modelos matemáticos obtidos a partir de rolamentos com falhas induzidas.

<i>Significado</i>	<i>Parâmetro</i>	<i>Valor</i>
Número de pontos no Tempo	N	4096
Resolução em Frequência	df	4Hz
Período de análise no tempo	$T=1/df$	0,25s
Intervalo de Discretização	$dt=T/N$	6×10^{-5} s
Frequência de Rotação da Pista Girante	f_r	90Hz
Frequência de defeito na Pista Interna	$f_{pi}=6.0889 f_r$	548Hz
Frequência de defeito na Pista Externa	$f_{pe}=4.0444 f_r$	364Hz
Frequência de defeito na Esfera	$f_{es}=5.8670 f_r$	528Hz
Frequência central de Ressonância na Pista Interna	f_{cpi}	5400Hz
Frequência central de Ressonância na Pista Externa	f_{cpe}	5000Hz
Frequência central de Ressonância na Esfera	f_{ces}	2100Hz

Frequência Central de Ressonância

A frequência central característica f_c para um sinal de falhas está representada na Figura 4.1. Existe uma frequência central característica para cada tipo de defeito. Essa diferença entre as frequências está relacionada com o caminho percorrido pela excitação proveniente do defeito até

o ponto de aquisição do sinal. Esse fato pode ser observado através de aquisição dos sinais de defeito com falhas induzidas em diferentes pontos do rolamento.

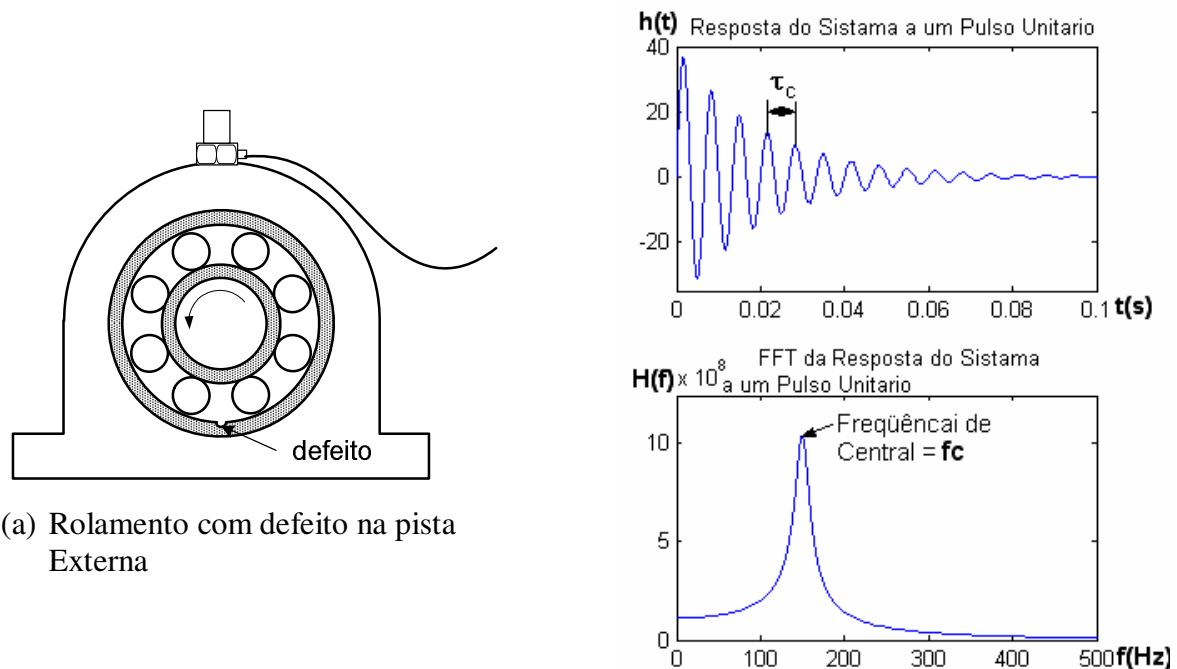


Figura 4.1 – Frequência central de ressonância

Modelo de Defeito na Pista Interna

Considerando-se que a pista interna encontra-se parada, os impulsos gerados pela passagem das esferas em um defeito localizado nessa pista são de mesma amplitude com espaçamento constante entre os impulsos, conforme Figura 2.8 do capítulo 2. Levando-se em consideração os parâmetros da Tabela 4.1, foi obtido um modelo que possibilita geração de um sinal de defeito na pista interna.

A Figura 4.2 (a) representa o modelo de um sinal no tempo do rolamento com defeito na pista interna. Os parâmetros usados para sua implementação foram: velocidade de rotação da pista externa de 45Hz e frequência central $f_c = 5400\text{Hz}$. Na Figura 4.2(b), está apresentado o gráfico obtido após a aplicação da FFT ao sinal.

Os impulsos têm um espaçamento constante de T_d . Logo, a frequência característica do defeito é $f_{dpi} = 1/T_d$.

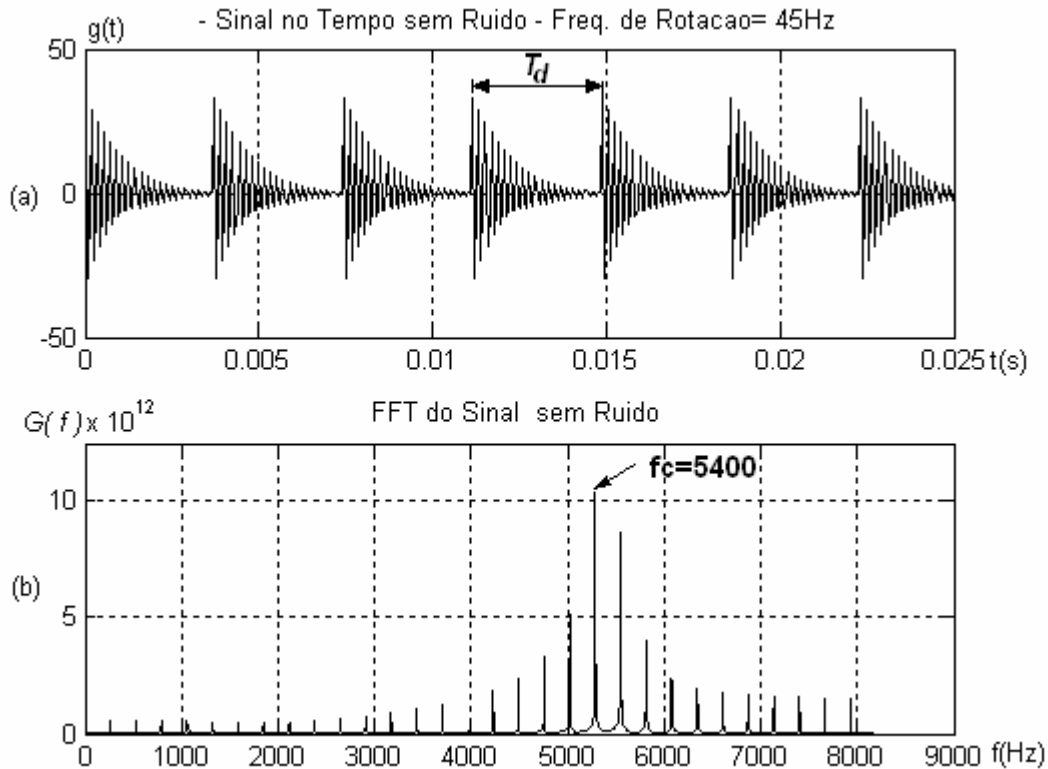


Figura 4.2 – Sinal de defeito na pista interna do rolamento

Modelo de Defeito na Pista Externa

Como a pista externa do rolamento é a pista girante, o defeito localizado nela tem um movimento em relação à região de carga. Desta forma, o sinal de defeito é representado por um sinal modulado cuja onda portadora é semelhante ao sinal de defeito na pista parada e, a onda moduladora tem frequência igual à de rotação da pista. Esta modulação causará o surgimento de bandas laterais à frequência de defeito e com espaçamento de valor igual à frequência de modulação.

O tamanho da região de carga definirá o número de impulsos contidos em cada modulação. A Figura 4.3 (a) representa o sinal de defeito do rolamento da pista externa, onde a frequência de rotação é de 45Hz e a frequência central é de 5000Hz, a partir dela tem-se que a frequência de

modulação é $f_{mod} = 1/T_m$ e a frequência de defeito é $f_{dpe} = 1/T_d$. A FFT do sinal do defeito está representada pela Figura 4.3(b).

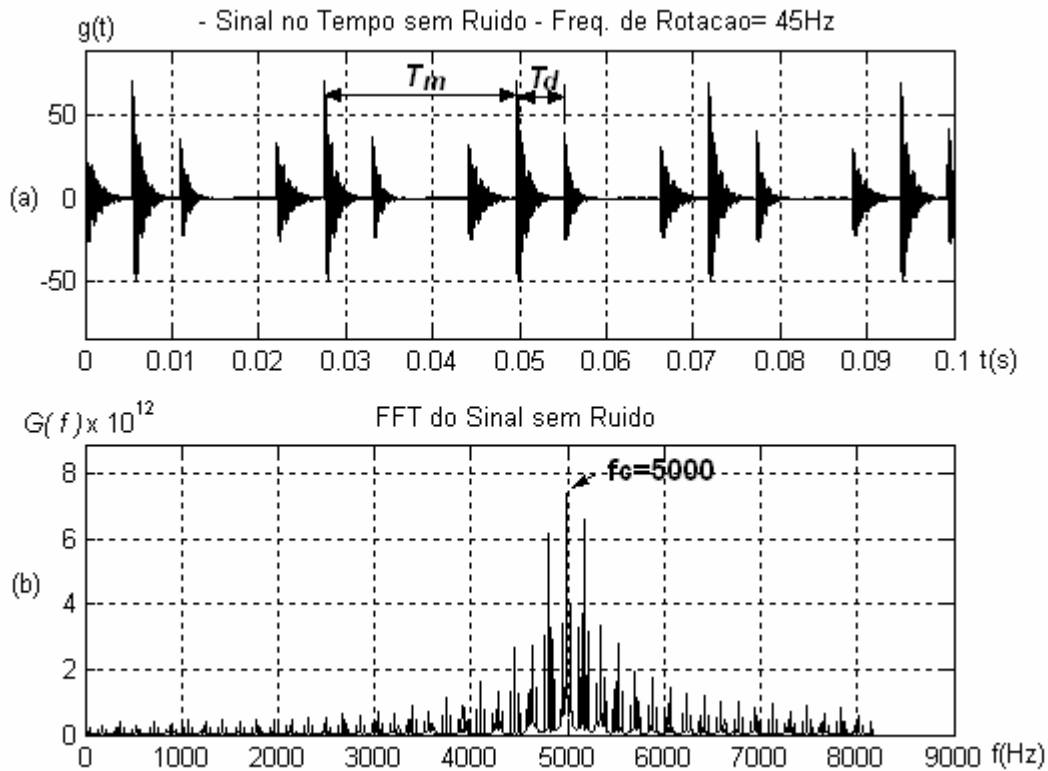


Figura 4.3 – Sinal de defeito na pista externa do rolamento

Frequência de defeito na Esfera

Em alguns casos, o sinal de defeito na esfera é modulado pela frequência da gaiola (McFadden, 1984). Muitas vezes, esta modulação não é bem visível, pois há uma diversidade muito grande de gaiolas não só na sua forma como no material utilizado na sua confecção. A Figura 4.4 (a) representa o sinal de defeito na esfera do rolamento submetido a uma velocidade de rotação de 45Hz, frequência de gaiola de 18Hz e $f_c = 2100\text{Hz}$, pode-se, ainda, verificar que a

frequência do defeito é $f_{es}=1/T_d$ e a frequência de modulação $f_{mod}=1/T_m$. A Figura 4.4 (b) representa o espectro de frequência obtido após a aplicação da FFT ao sinal de defeito.

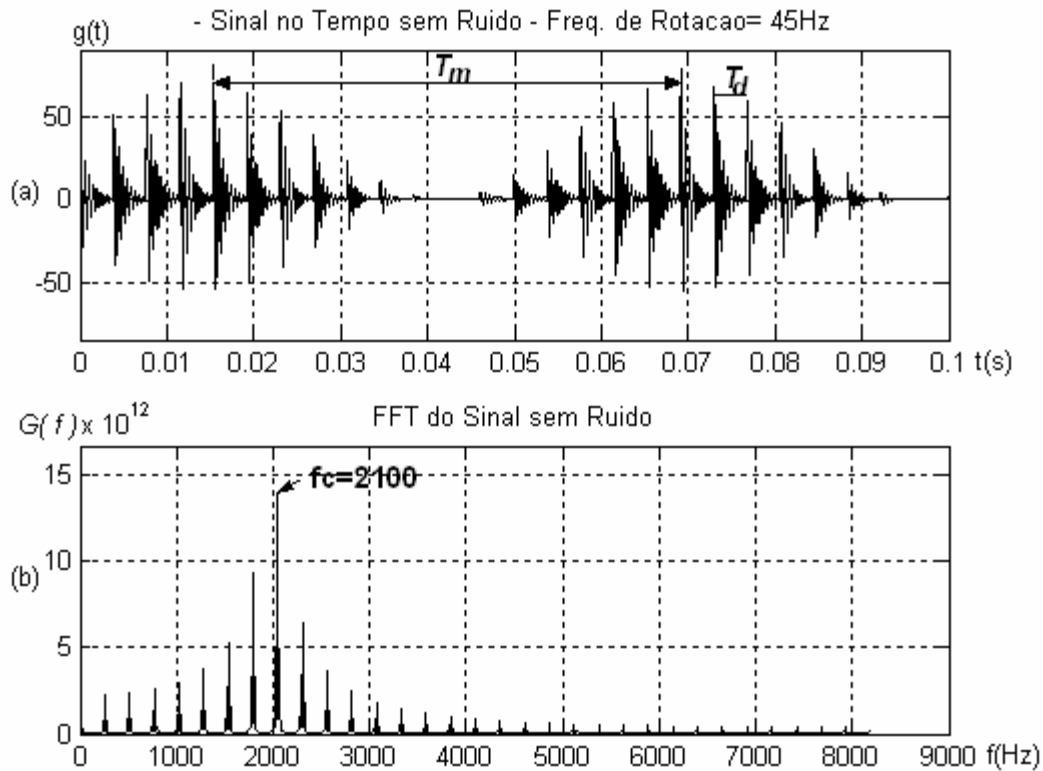


Figura 4.4 – Sinal de defeito na esfera do rolamento.

4.3 Influência da Velocidade de Rotação e Nível de Ruído nos Parâmetros Estatísticos

Alguns parâmetros estatísticos – RMS, pico máximo, fator de crista, fator K, média, variância, assimetria, curtose e momento de sexta ordem – podem ser usados para auxiliar ou detectar a presença de falhas em rolamentos. Para utilizá-los de forma segura, é necessário um conhecimento do seu comportamento em relação à variação de velocidade e ao tamanho da falha.

Nos rolamentos com descascamento, à medida que a falha aumenta, os picos característicos sofrem aumento de amplitude destacando-se claramente do ruído do sinal e, algumas vezes, tornam-se visíveis no sinal de aceleração do rolamento antes mesmo de serem tratados. Essas alterações nas características do sinal da falha acarretam mudanças nos parâmetros estatísticos.

Outro dado que pode trazer alterações nos parâmetros estatísticos é a velocidade. Com o objetivo de constatar como e quais parâmetros sofreram mudanças em relação à velocidade e ao tamanho da falha, foram utilizados modelos matemáticos que caracterizam diferentes tamanhos de falhas com diferentes velocidades. As velocidades de simulação foram as mesmas utilizadas na bancada de ensaios (que será apresentada posteriormente): $8,33Hz$, $20Hz$, $45Hz$, $75Hz$, e $116,66Hz$. Para simular vários tamanhos de falhas foram utilizados diferentes níveis de relação sinal-ruído (SNR), desde um nível de 0,20 que representa um rolamento com ruído alto, até uma relação de 0,80 que representa um rolamento com defeito severo (Figura 4.5).

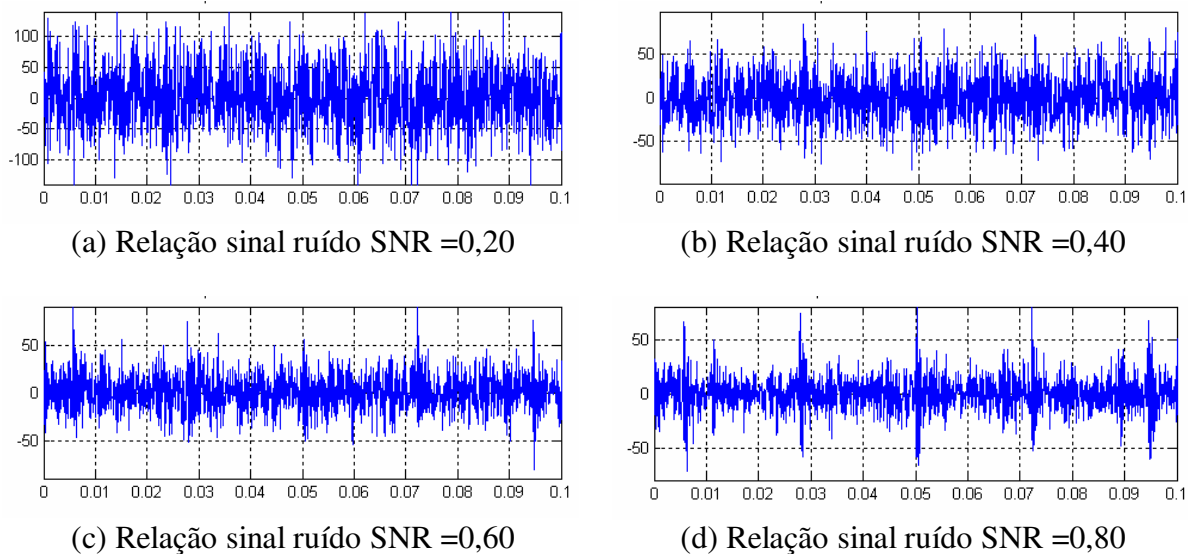


Figura 4.5 – Rolamento com diferentes níveis de relação sinal-ruído

Supondo-se que a relação sinal-ruído está correlacionada com o tamanho da falha, ou seja, quanto maior a reação sinal-ruído maior será o tamanho da falha. Os diferentes sinais apresentados na Figura 4.5 serão utilizados nas etapas seguintes.

Análise dos Resultados Obtidos Para Rolamentos Com Falha na Pista Interna

Na Figura 4.6, estão representados os gráficos obtidos para RMS, pico máximo, fator de crista e fator K, para rolamentos com defeito na pista interna. As falhas foram modeladas, com o objetivo de simular descascamento causado por fadiga, com diferentes tamanhos, desde um sinal com relação sinal-ruído $R1 = 0,20$ até $R4 = 0,80$. Observou-se que, à medida que o nível sinal-ruído aumenta, ou seja, que o tamanho da falha vai progredindo, o nível RMS, pico máximo e fator K crescem e o fator de crista decresce.

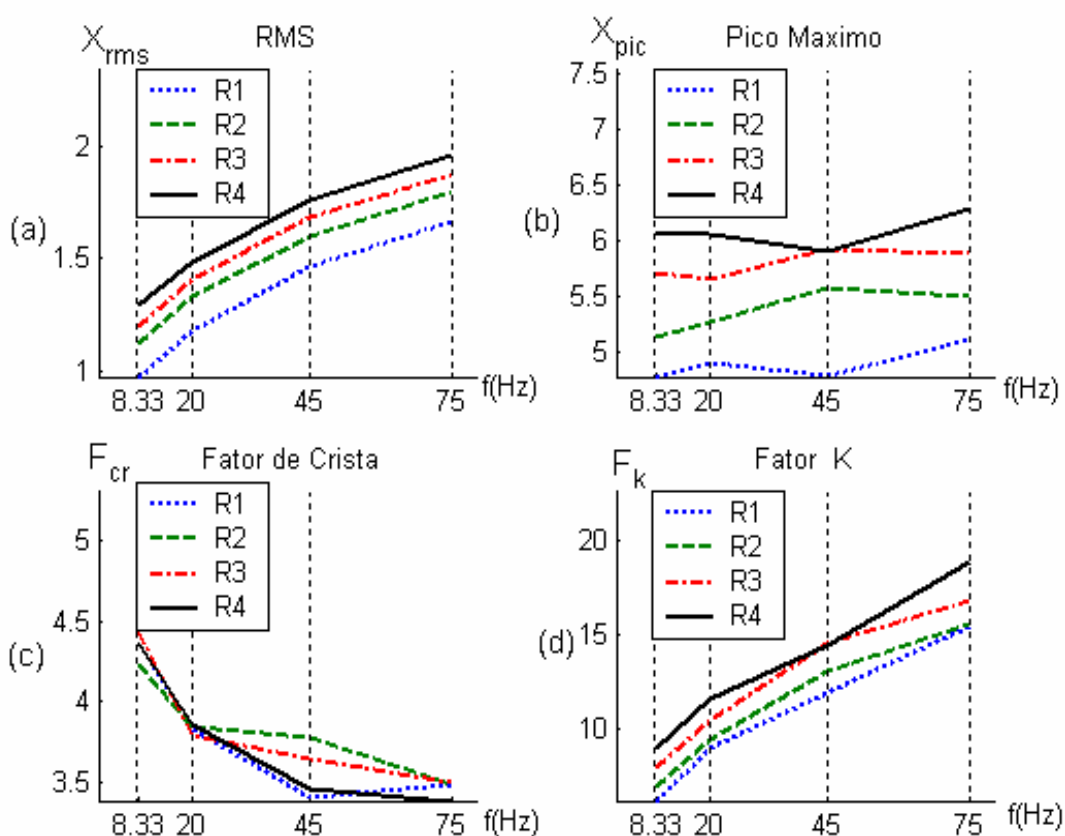


Figura 4.6 – Variação de parâmetros estatísticos em relação a velocidade e tamanho da Falha, (a) Índice RMS; (b) Valor de Pico; (c) Fator de Crista; (d) Fator K.

Os parâmetros estatísticos, média, variância, assimetria, curtose e o momento de sexta ordem estão representados na Figura 4.7, onde, pode-se observar que os valores da média e

variância crescem à medida que a velocidade e o tamanho da falha aumentam, enquanto os demais parâmetros diminuem. É interessante ressaltar, ainda, que a curtose tende para o valor 3 que representa um rolamento sem falha, havendo um mascaramento da falha no rolamento.

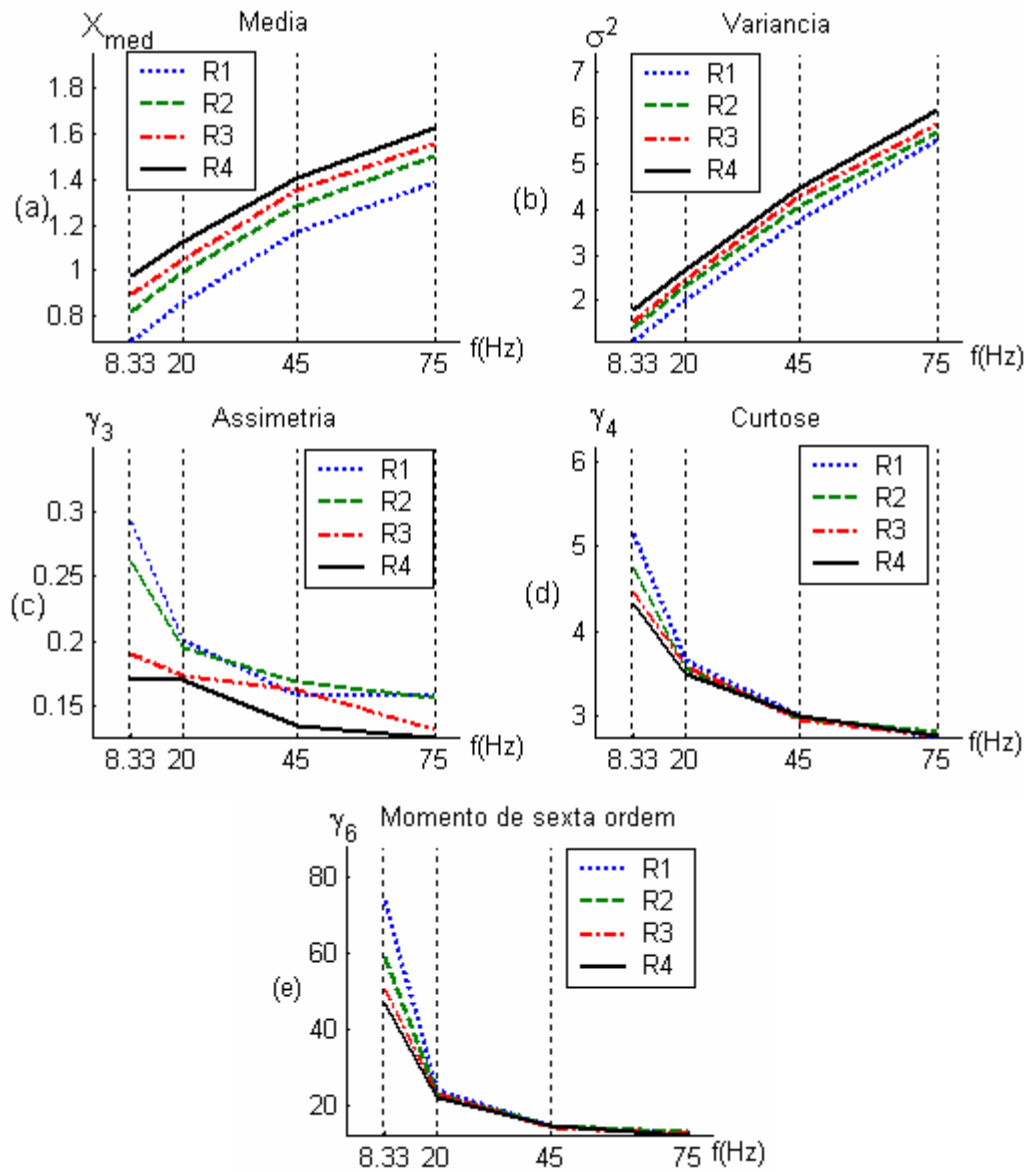


Figura 4.7– Variação de parâmetros estatísticos em relação à velocidade e tamanho da falha, (a) Média; (b) Variância; (c) Assimetria; (d) Curtose e (e) Momento de Sexta ordem.

Análise dos Resultados Obtidos Para Rolamentos Com Falha na Pista Externa

Os valores obtidos para os parâmetros estatísticos, RMS, pico máximo, fator de crista e fator K, para os rolamentos com defeitos na pista externa estão representados na Figura 4.8. As tendências observadas para rolamentos com falhas na pista externa são semelhantes às observadas para rolamento com falha na pista interna.

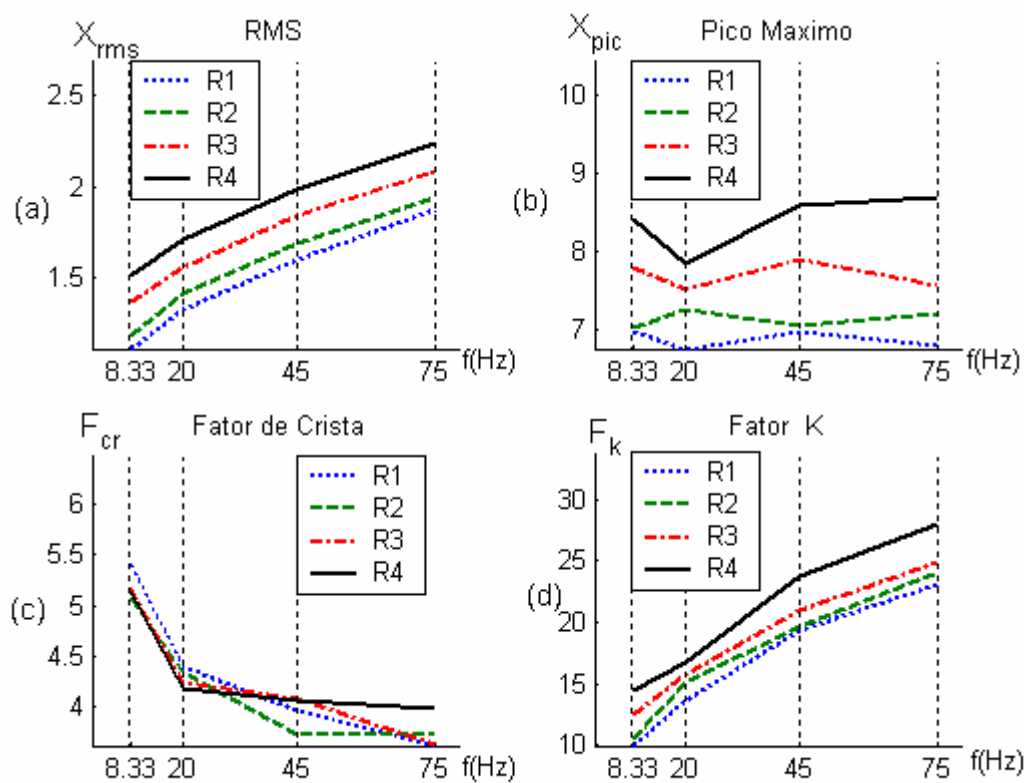


Figura 4.8 – Variação de parâmetros estatísticos em relação a velocidade e tamanho da Falha, (a) Índice RMS; (b) Valor de Pico; (c) Fator de Crista; (d) Fator K.

Os parâmetros de média, variância, assimetria, curtose e momento de sexta ordem podem ser analisados através da Figura 4.9. Como no caso anterior, as tendências obtidas para estes

parâmetros estatísticos são semelhantes aos para pista interna, exceto no caso da assimetria, onde os parâmetros não têm tendência definida.

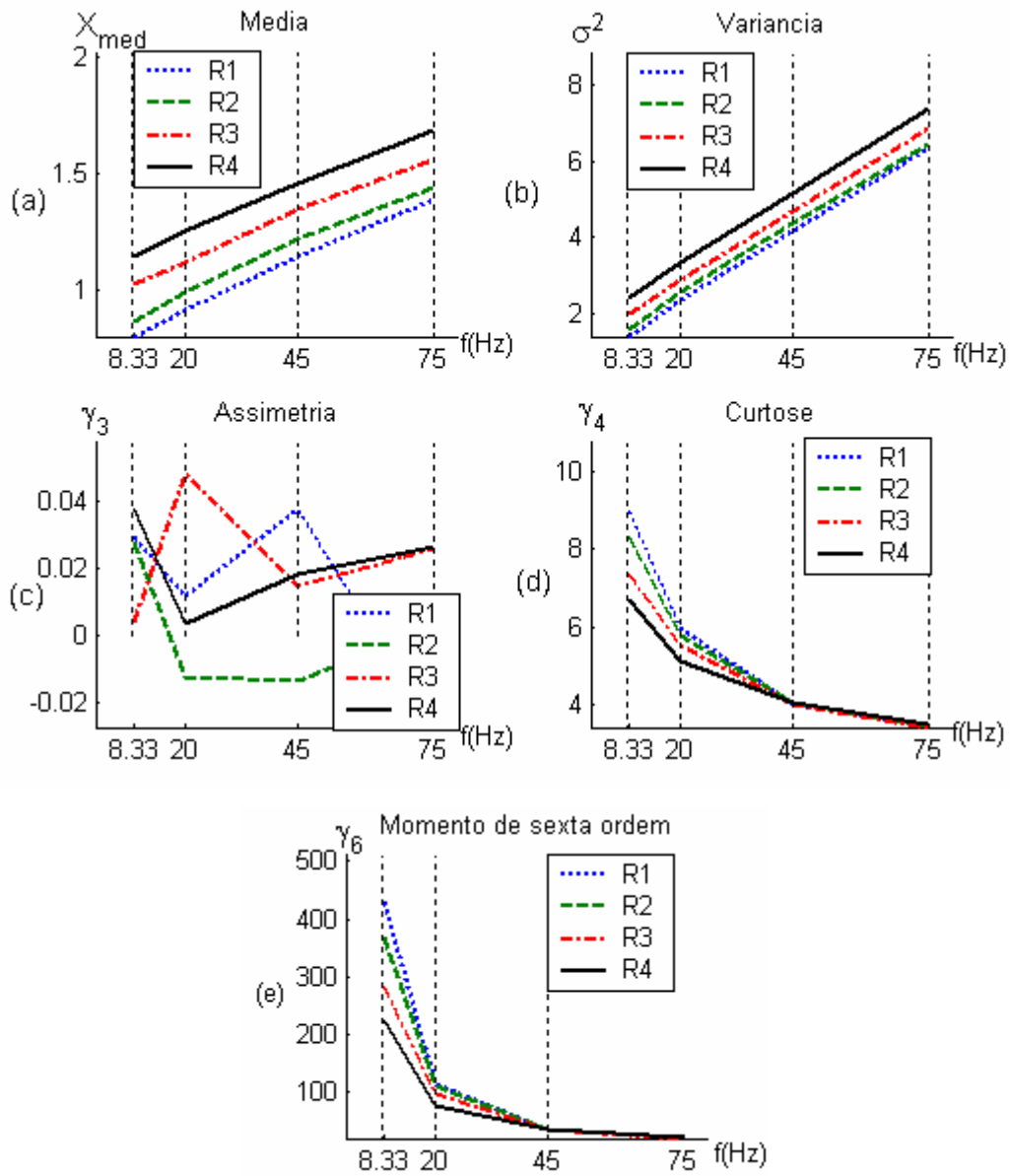


Figura 4.9 – Variação de parâmetros estatísticos em relação a velocidade e tamanho da Falha , (a) Média; (b) Variância; (c) Assimetria; (d) Curtose e (e) Momento de Sexta ordem.

Análise dos Resultados Obtidos Para Rolamentos Com Falha na Esfera

A tendência de crescimento dos parâmetros estatísticos, RMS, pico máximo, fator de crista e fator K (Figura 4.10), obtidos para os rolamentos com defeitos na esfera, é semelhante à tendência dos rolamentos com defeitos nas pistas interna e externa.

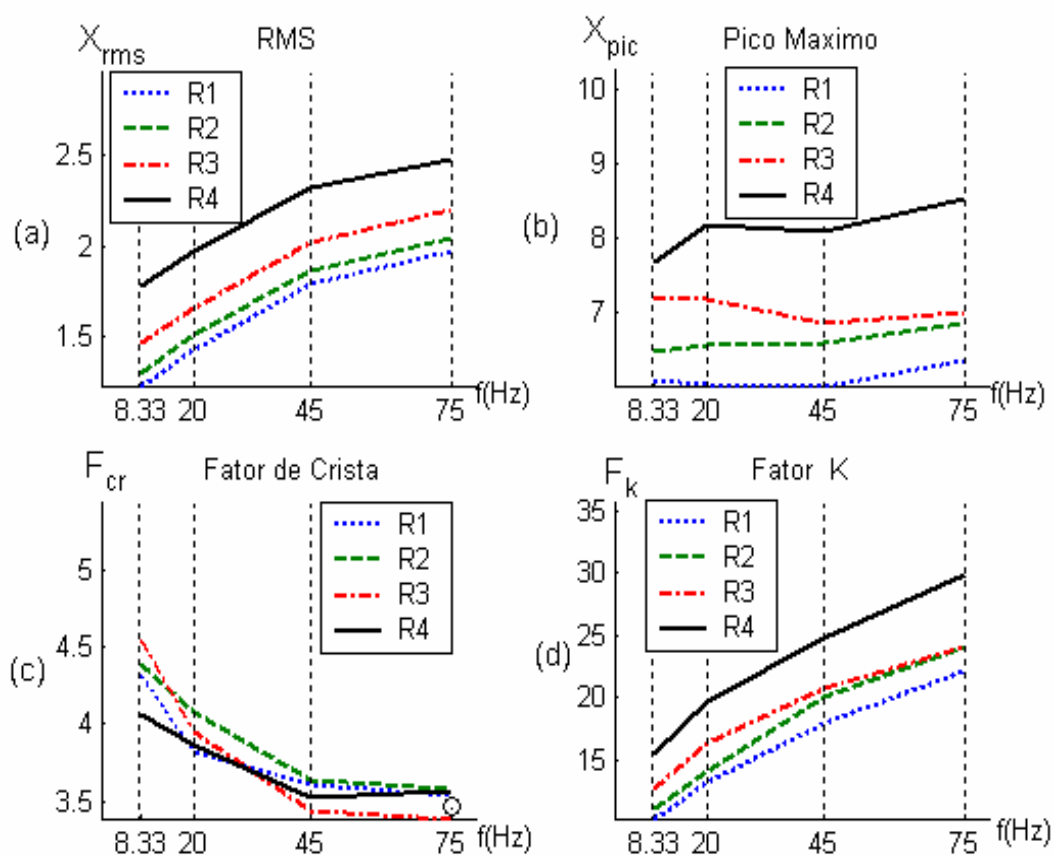


Figura 4.10 – Variação de parâmetros estatísticos em relação a velocidade e tamanho da Falha, (a) Índice RMS; (b) Valor de Pico; (c) Fator de Crista; (d) Fator K.

Na Figura 4.11, pode-se observar que os parâmetros estatísticos, média, variância, assimetria, curtose e momento de sexta têm tendências semelhantes às obtidas para os rolamentos

com defeito na pista interna e externa; e para a esfera, também, a assimetria não tem tendência definida sendo totalmente aleatória.

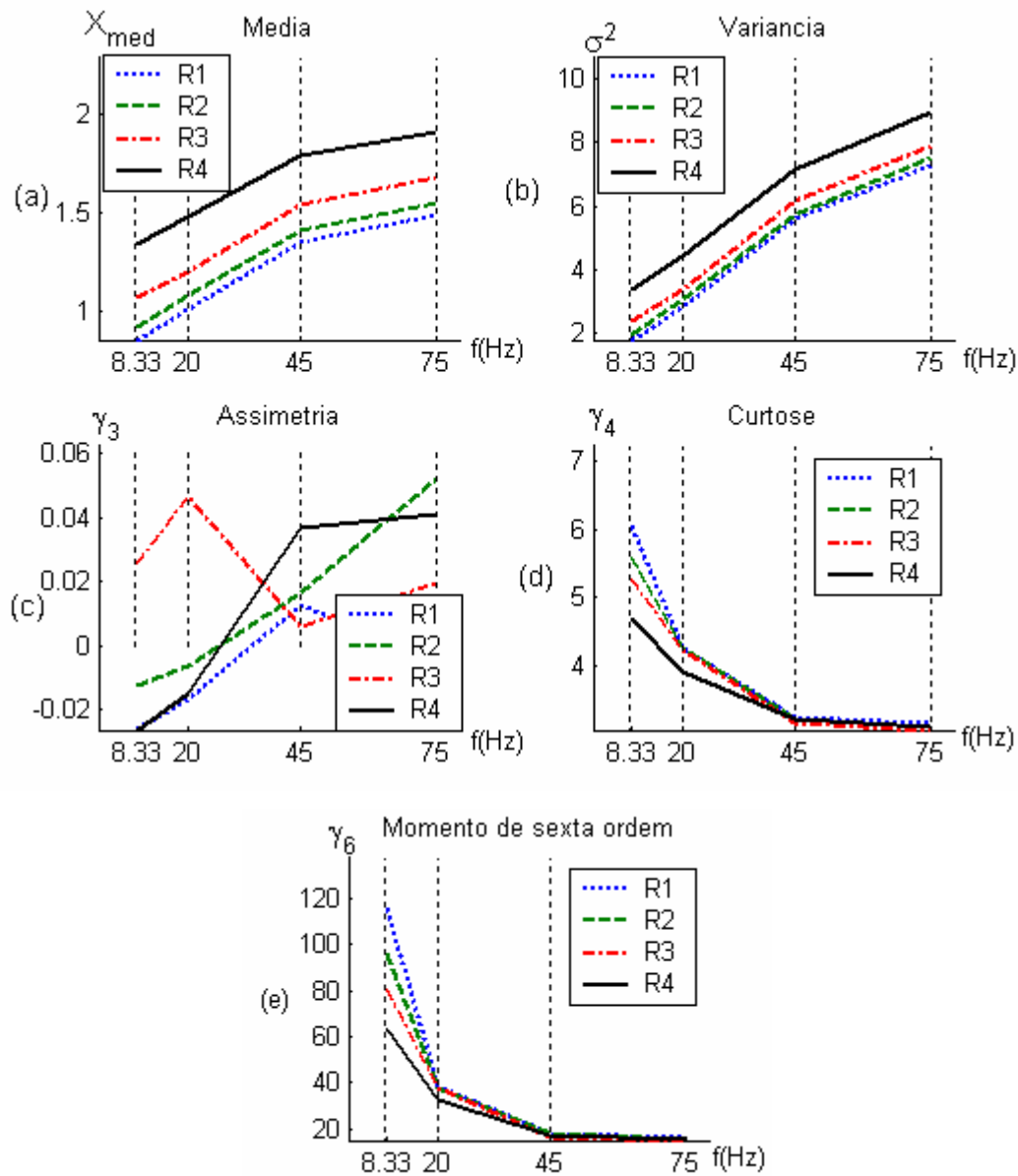











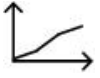












Figura 4.11 – Variação de parâmetros estatísticos em relação a velocidade e tamanho da falha, (a) Média; (b) Variância; (c) Assimetria; (d) Curtose e (e) Momento de Sexta ordem.

Na Tabela 4.2, estão dispostos os diversos parâmetros estatísticos para as falhas mostradas anteriormente, e suas tendências de variação são similares em relação à velocidade de rotação do rolamento e, ao tamanho da falha, exceto para falha na gaiola.

Tabela 4.2. Tendências dos parâmetros estatísticos.

Defeito na	Índice RMS	Pico máximo	Fator Crista	Fator k	Média	Curtose	Varian.	Assim.	M(6)
Pista Interna		sem tendência definida							
Pista Externa		sem tendência definida						sem tendência definida	
Esfera		sem tendência definida						sem tendência definida	

De uma forma geral, pode-se verificar que os parâmetros estatísticos mantiveram as mesmas tendências para os diferentes tipos de falhas. A assimetria teve uma tendência definida somente para falhas na pista interna nos demais casos o seu comportamento foi totalmente aleatório. Em todos os tipos de falha o pico máximo apresentou uma certa irregularidade o que impossibilitou verificar uma tendência bem definida.

Um fato interessante foi observado na curtose e no momento de sexta ordem, que possibilitavam uma diferenciação do tamanho das falhas somente em baixas velocidades. À medida que a velocidade aumentava não havia possibilidade de diferenciação.

4.4 Aplicação das Técnicas de Detecção de Falhas no Domínio da Frequência nos Modelos Matemáticas de Falhas em Rolamentos.

Técnicas de detecção de falhas no domínio da frequência são aplicadas aos diversos modelos de falhas. Inicialmente, foi aplicada a técnica da energia residual e, em seguida, utilizou-se à técnica de envelope sem e com uso do filtro adaptativo e, além dessas técnicas no domínio da frequência foi aplicada o cepstrum.

Método da Energia Residual

A energia residual de diversos tipos de falhas em rolamentos estão representados na Figura 4.12. A Figura 4.12(a) representa o gráfico da energia residual de um rolamento com defeito na pista interna. A energia cresce à medida que a velocidade e o tamanho da falha aumentam e as curvas obtidas para os diferentes tamanhos de falha, R1, R2, R3 e R4 ficam muito próximas a ponto de impossibilitar a diferenciação das mesmas.

A Figura 4.12(b) representa o gráfico da energia residual de um rolamento com defeito na pista externa. Neste caso, já há possibilidade, pequena, de diferenciação de cada curva de defeito.

Na Figura 4.12(c), tem-se o gráfico da energia residual de um rolamento com falha na esfera, já para este caso, as curvas de defeito encontram-se espaçadas uma da outra.

Foi observado que para todas as falhas, simuladas neste capítulo, a energia residual tem uma tendência de crescimento à medida que a velocidade e o tamanho da falha aumentam.

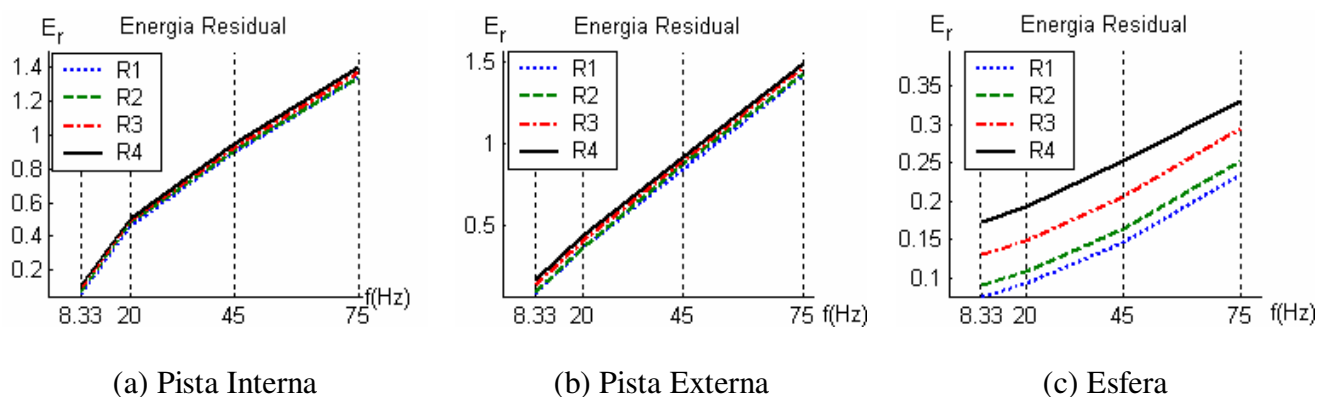


Figura 4.12 – Energia Residual de Rolamentos com Defeito nas Pistas Interna e Externa e Esfera

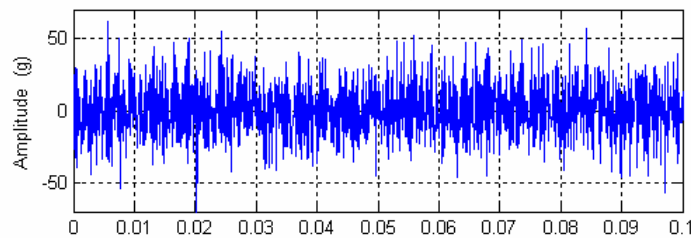
Aplicação da Técnica de Envelope

A técnica de envelope será aplicada aos modelos matemáticos de falhas nas pistas interna e externa e na esfera. Todos os sinais simulam rolamentos com velocidade de 90Hz com uma

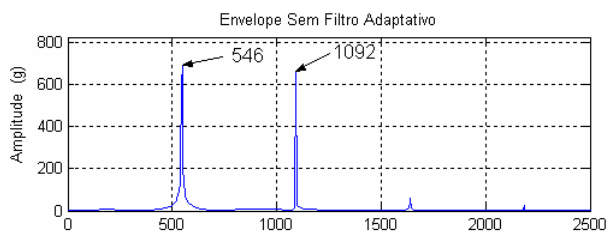
relação sinal-ruído de 0,60. Optou-se por apresentar um caso para cada tipo de falha, pois independente da velocidade e do tamanho da falha, os resultados obtidos eram semelhantes, não havendo assim, necessidade de apresentação de outros modelos.

Aplicação da Técnica de Envelope a Rolamentos com Falha na Pista Interna

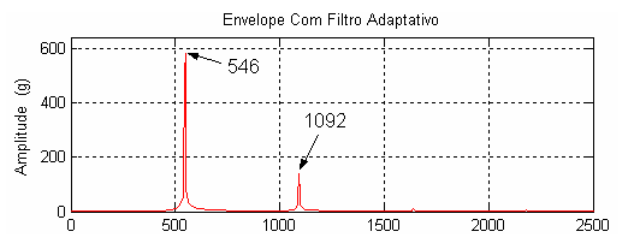
O sinal simulado para um rolamento com defeito na pista interna está representado pela Figura 4.13. A Figura 4.13(a) apresenta o sinal após a passagem pelo filtro passa banda. Na Figura 4.13(b) tem-se o espectro obtido pela técnica de envelope. A Figura 4.13 (c) apresenta o espectro do sinal obtido através da técnica de envelope com uso do filtro adaptativo. Pode-se observar que, a aplicação do filtro adaptativo evidencia somente o pico que representa a frequência do defeito.



(a) Sinal de defeito no tempo



(b) Envelope sem Filtro Adaptativo



(c) Envelope com Filtro Adaptativo

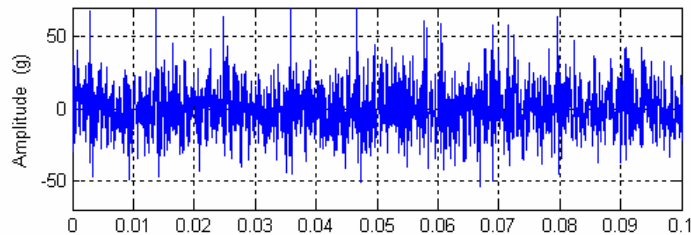
Figura 4.13 Aplicação da técnica de envelope em um rolamento com defeito na pista interna

Aplicação da Técnica de Envelope a Rolamentos com Falha na Pista Externa

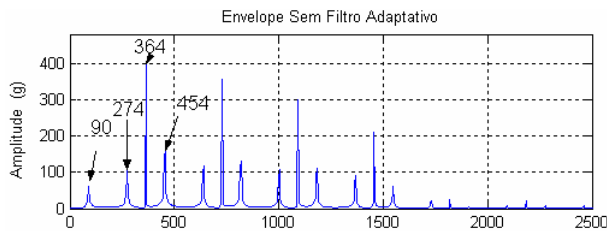
Na Figura 4.14, tem-se o modelo de um sinal de defeito na pista externa submetido a uma velocidade de 90Hz. A Figura 4.14 (a) apresenta o sinal simulado de um rolamento após a

aplicação de um filtro passa banda. Em seguida, foi obtido o espectro do sinal através da técnica de envelope sem filtro adaptativo (Figura 4.14 (b)). O espectro do sinal obtido através da técnica de envelope com uso do filtro adaptativo está representado na Figura 4.14 (c).

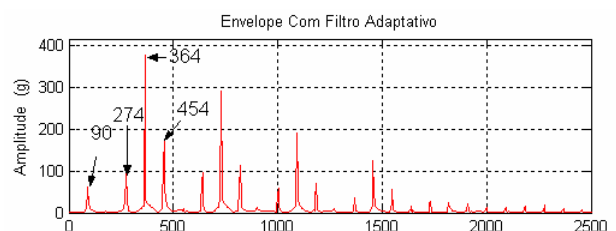
Observa-se, que o envelope com filtro adaptativo evidencia o pico de frequência e atenua seus múltiplos.



(a) Sinal de defeito no tempo



(b) Envelope sem Filtro Adaptativo

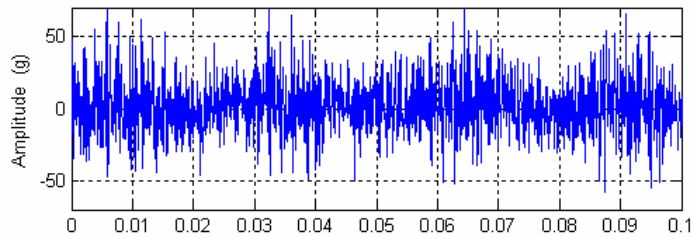


(c) Envelope com Filtro Adaptativo

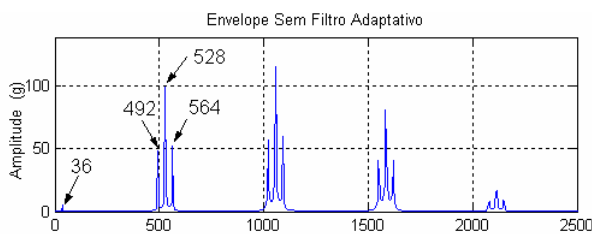
Figura 4.14 Aplicação da técnica de envelope em um rolamento com defeito na pista externa

Aplicação da Técnica de Envelope a Rolamentos com Falha na Esfera

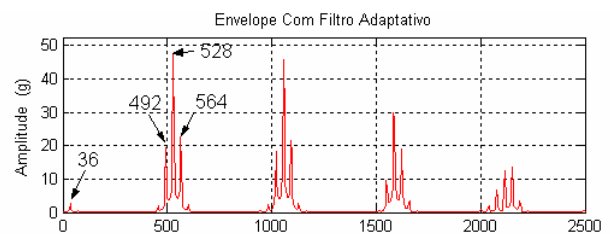
O modelo do sinal de um defeito na esfera está mostrado na Figura 4.15(a). O espectro do sinal, obtido através da técnica de envelope sem uso do filtro adaptativo, está mostrado na Figura 4.15 (b). A Figura 4.15 (c) apresenta o espectro do sinal obtido através da técnica de envelope com uso do filtro adaptativo. Há pouca diferença entre os espectros obtidos, a não ser no que se refere à amplitude. Onde para todos os casos, a aplicação do filtro adaptativo atenuou, significativamente, as amplitudes das frequências.



(a) Sinal de defeito no tempo



(b) Envelope sem Filtro Adaptativo



(c) Envelope com Filtro Adaptativo

Figura 4.15 Aplicação da técnica de envelope em um rolamento com defeito na esfera.

Aplicação do Cepstrum

O cepstrum será aplicado aos modelos matemáticos de rolamentos com falhas nas pistas externa e interna, e esfera. Os modelos utilizados na obtenção do cepstrum são semelhantes aos utilizados na técnica de envelope, ou seja, a relação sinal-ruído utilizada é de 0,60 e a velocidade para simulação de 90Hz.

Aplicação do Cepstrum a Rolamentos com Falha na Pista Interna

Para um sinal com frequência de defeito na pista interna de 546Hz foi aplicado o cepstrum. Através da Figura 4.16, pode-se determinar a frequência de defeito pelos picos evidenciados. Observa-se que entre os picos o espaçamento é de $1,8311 \times 10^{-3}$ s, cujo valor inverso é 546Hz, que é a frequência de defeito na pista estacionária.

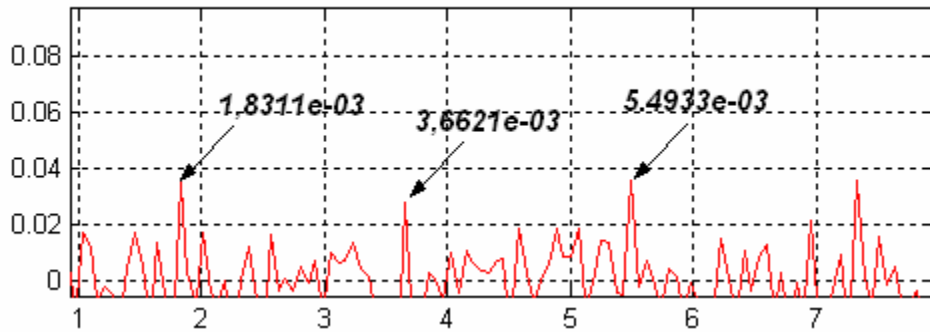


Figura 4.16 – Aplicação do Cepstrum ao sinal de defeito na pista interna.

Aplicação do Cepstrum a Rolamentos com Falha na Pista Externa

Na Figura 4.17, tem-se o cepstrum de um rolamento com defeito na pista externa. O primeiro pico de valor $2,747 \times 10^{-3}$ s tem valor inverso de 364Hz, isso corresponde à frequência do defeito e o segundo pico é de 0,011s, com valor inverso de 90Hz, que é coincidente com a frequência de modulação do sinal de defeito. Como foi visto anteriormente, se o defeito está localizado na pista que se movimenta em relação à região de carga, o sinal tem uma modulação que corresponde à frequência de rotação da pista.

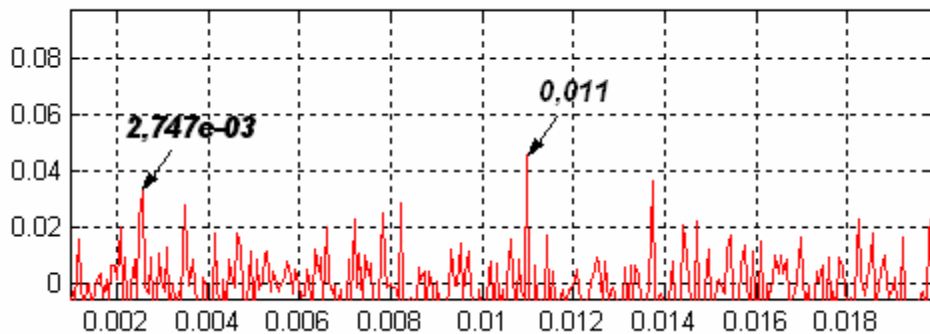


Figura 4.17 – Aplicação do Cepstrum ao sinal de defeito na pista externa

Aplicação do Cepstrum a Rolamentos com Falha na Esfera

O cepstrum, aplicado ao modelo matemático de um rolamento com defeito na esfera está representado na Figura 4.18. Pode-se observar que o pico de $1,8921 \times 10^{-3}$ s, cujo valor inverso é de

528Hz, tem valor igual à frequência principal de defeito da esfera, e, o pico 0,027s tem como valor inverso, 36Hz, que é a frequência de modulação, sendo igual à frequência da gaiola.

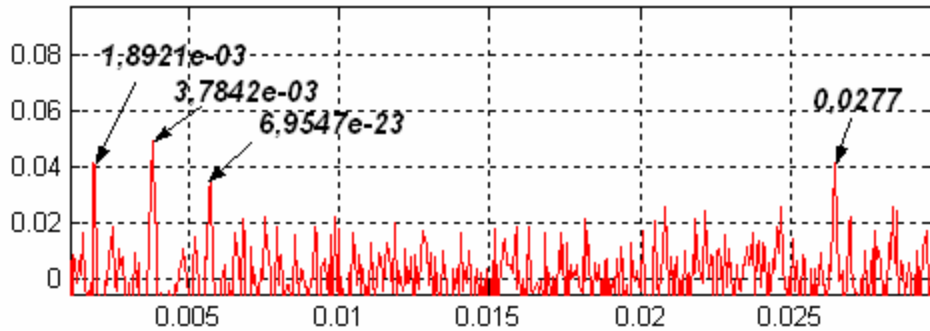


Figura 4.18 – Aplicação do Cepstrum ao sinal de defeito na esfera.

O cepstrum identifica e mostra ao analista as famílias de picos com espaçamentos iguais presentes no espectro de frequência de um sinal dinâmico. É uma ferramenta poderosa e uso simples na descoberta e identificação de processos de modulação. Se o analista conhece em suas máquinas os, possíveis, fatores moduladores, o cepstrum será de grande valia.

CAPÍTULO 5

APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS EM ROLAMENTO COM FALHAS INDUZIDAS

5.1 Introdução

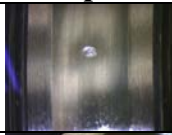







As técnicas aplicadas, no capítulo anterior, aos modelos matemáticos servirão como referência para as aplicações das técnicas ao conjunto de rolamentos com falhas induzidas. Além do objetivo da validação dos modelos matemáticos, usados no capítulo anterior; serão observadas quais as influências da velocidade e tamanho da falha sobre os parâmetros estatísticos, a influência do uso do filtro adaptativo na técnica de envelope e o uso do cepstrum na detecção de falhas. Um outro fator importante a ser observado é se por meio de alguma das técnicas propostas podem-se detectar falhas na gaiola do rolamento.

5.2 Falhas induzidas

Nesta etapa, foram utilizados catorze rolamentos do mesmo lote de fabricação. Todos os rolamentos tinham as seguintes dimensões: ângulo de contato $\beta=0^\circ$, diâmetro da esfera $D=7.144mm$, diâmetro principal $d=42,47mm$, número de esfera $N_e= 10$ e gaiola de nylon (Anexo 01).

Todas as falhas foram obtidas a partir da usinagem conforme mostrado no Anexo 2. As falhas são mostradas na Tabela 5.1. No processo de obtenção das falhas, foi utilizada uma micro retifica e uma ponta esférica diamantada.

Tabela 5.1 – Falhas induzidas em rolamento

Tipo	falha 01	falha 02	falha 03	Quant.
	3,10mm ²	3,50 mm ²	4,30 mm ²	3
	3,00 mm ²	3,50 mm ²	4,30 mm ²	3
	3,20 mm ²	4,00 mm ²	4.80 mm ²	3
	4,42 mm ²	4,98 mm ²	Distância entre centros 3,74mm	1
	4,30 mm ²	4,50 mm ²	Distância entre centros 6,42mm	1
	Foi induzida uma falha que simula desgaste severo na superfície da pista interna do rolamento.			1
	Foi induzida uma falha que simula desgaste severo na superfície da pista externa do rolamento.			1
	Foi induzida uma quebra na gaiola do rolamento.			1

5.3 Bancada

Todos os ensaios foram realizados à temperatura ambiente. A bancada (Figura 5.1) possibilitava variação de velocidade e carga aplicada ao rolamento. Para os ensaios, foi aplicada uma carga de 100N, obtida a partir do tensionamento da correia. À medida que os rolamentos

eram postos na bancada, a carga era aplicada e em seguida eram submetidos a cinco velocidades (500rpm, 1200rpm, 2700rpm, 4800rpm e 7000rpm).

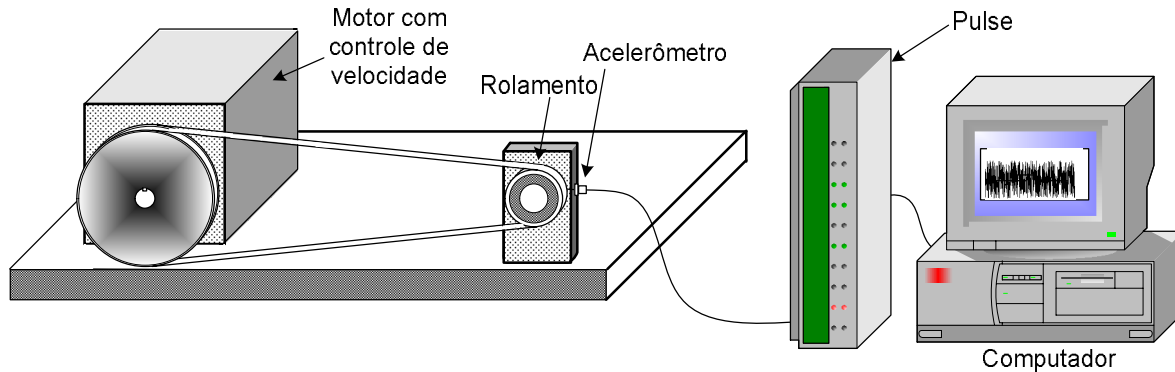


Figura 5.1 – Esquema da bancada de ensaios.

Os rolamentos foram montados na bancada com suas falhas na direção da carga máxima. Na obtenção dos dados, durante a fase de ensaios, um acelerômetro foi colocado na direção radial de maior carga. Desta forma, os sinais eram obtidos pelo acelerômetro e enviados para o analisador de sinais, Pulse da Bruel & Kjaer. Durante a fase de aquisição, foi utilizado um filtro anti-aliasing com frequência de corte de 10kHz. Para cada ensaio, foram obtidos 16484 pontos com um tempo total de 1s.

5.4 Influência da Velocidade de Rotação e do Tamanho das Falhas nos Valores dos Parâmetros Estatísticos

Como foi visto no capítulo 2, à medida que a velocidade de rotação do rolamento vai aumentando, a frequência de defeito aumenta, o que pode ser constatado facilmente pelo cálculo das frequências de defeito. Serão verificadas quais as consequências causadas aos parâmetros estatísticos.

Foram escolhidos dez rolamentos, três com defeitos na pista interna, três com defeitos na pista externa, três com defeitos na esfera e um com defeito na gaiola. Todos, os defeitos induzidos com diferentes tamanhos de falhas, a fim de se verificar a influência do tamanho da falha sobre os parâmetros estatísticos.

Procedimento dos Ensaio

Os rolamentos foram separados por tipo de falha e em seguida cada rolamento foi submetido a quatro rotações diferentes, 8.33Hz, 20Hz, 45Hz e 75Hz. Ao final dos ensaios, os sinais foram agrupados de forma a possibilitar uma análise conjunta da velocidade e tamanho da falha em relação aos parâmetros estatísticos. Os parâmetros estatísticos analisados foram: o índice RMS, pico máximo, fator de crista, fator k, média, curtose, variância, assimetria e momento de sexta ordem.

Análise dos resultados obtidos Para Rolamentos Com Falha na Pista Interna

Os gráficos para rolamentos com defeito na pista interna estão representados na Figura 5.2. As falhas foram induzidas com o objetivo de simular o descascamento causado por fadiga com diferentes tamanhos de área superficial, 3,10mm², 3,50mm² e 4,30mm². Além disso, foram obtidos os parâmetros estatísticos de um rolamento sem defeito (SD) para servir de fator comparativo. O diâmetros das falhas correspondem, respectivamente, a 13,90%, 14,77% e 16,37% do diâmetro da esfera.

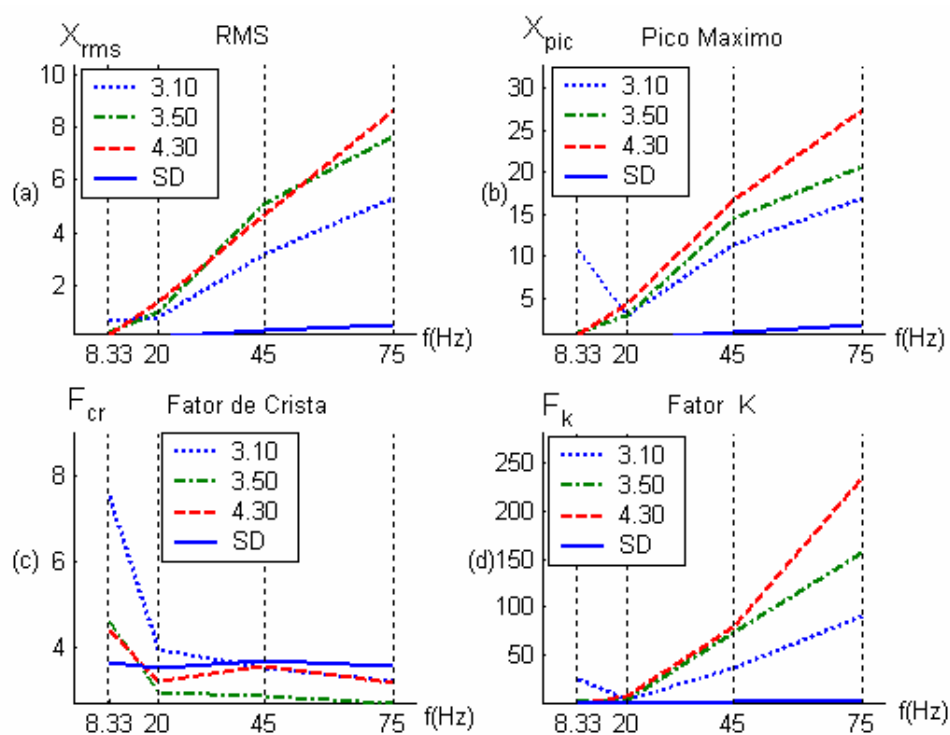


Figura 5.2 – Variação de parâmetros estatísticos em relação à velocidade e tamanho da Falha, (a) Índice RMS; (b) Valor de Pico; (c) Fator de Crista; (d) Fator K.

Pode-se verificar que, quanto maior a diferença entre os tamanhos das falhas nos rolamentos, com o mesmo tipo de defeito, maior será o afastamento entre os parâmetros estatísticos e, à medida que a velocidade vai sofrendo modificações, os parâmetros estatísticos também sofrem alterações, crescentes ou decrescentes.

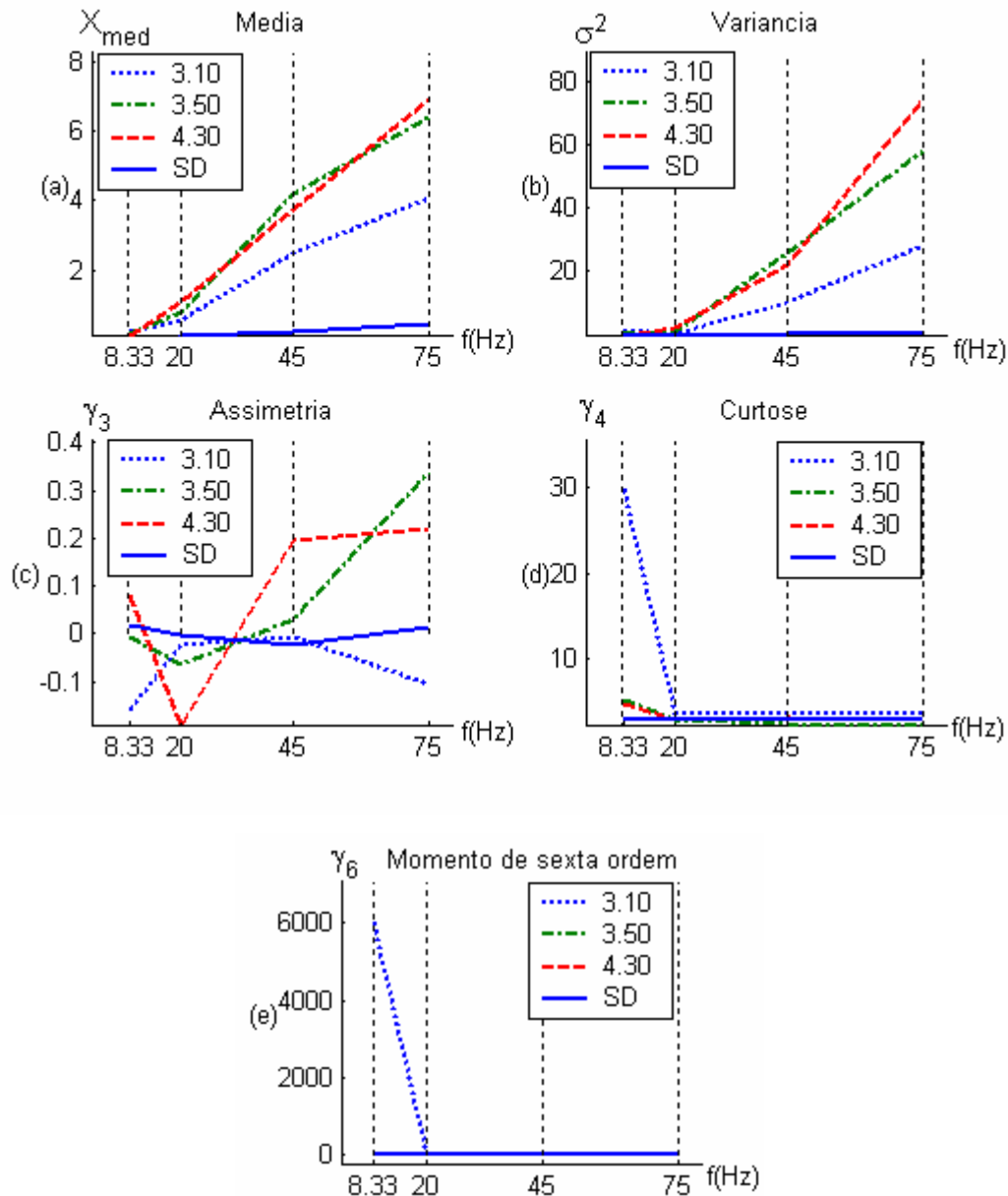


Figura 5.3 – Variação de parâmetros estatísticos em relação à velocidade e tamanho da Falha, (a) Média; (b) Variância; (c) Assimetria; (d) Curtose e (e) Momento de Sexta ordem.

Na Figura 5.3, estão representados os gráficos obtidos para média, variância, assimetria, curtose e momento de sexta ordem. Nos gráficos da média e da variância, observa-se uma tendência de crescimento à medida que a falha e a velocidade aumentam. Por outro lado, a curtose e o momento de sexta ordem têm tendência de queda. A curtose sofre um decréscimo que tende para três que é o valor da densidade de probabilidade gaussiana, indicando, de forma errada, que o rolamento não tem falha. Verificou-se que a curtose e o momento de sexta ordem não indicaram a presença da falha para valores de velocidade acima de 20Hz.

Análise dos resultados obtidos Para Rolamentos Com Falha na Pista Externa

Os valores obtidos para os parâmetros estatísticos, RMS, pico máximo, fator de crista e fator K, para os rolamentos com defeitos na pista externa têm tendências semelhantes as obtidas para rolamentos com defeitos na pista interna (Figura 5.4).

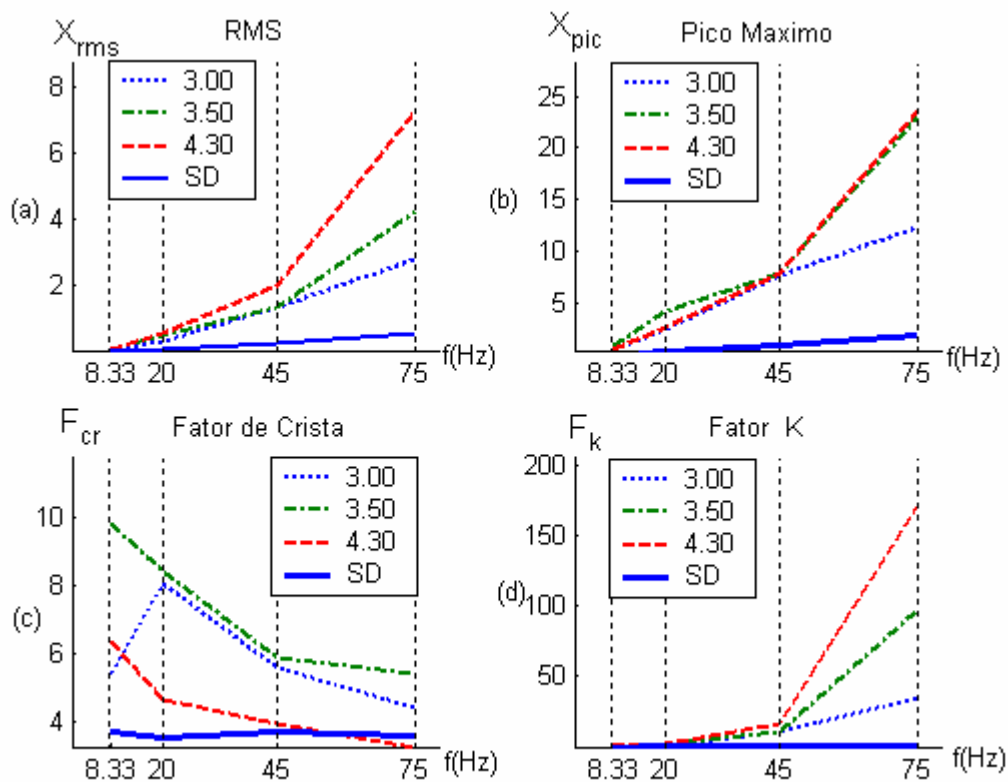


Figura 5.4 – Variação de parâmetros estatísticos em relação à velocidade e tamanho da Falha, (a) Índice RMS; (b) Valor de Pico; (c) Fator de Crista; (d) Fator K.

Pode-se observar, na Figura 5.5, que os parâmetros estatísticos, Média, Variância, Assimetria, Curtose e Momento de Sexta Ordem, também têm tendências semelhantes aos obtidos para os rolamentos com defeito na pista interna. Vale ressaltar que para a falha de 4.8mm^2 , o valor de curtose é de 2,8 que é um indicativo de ausência de falha no rolamento.

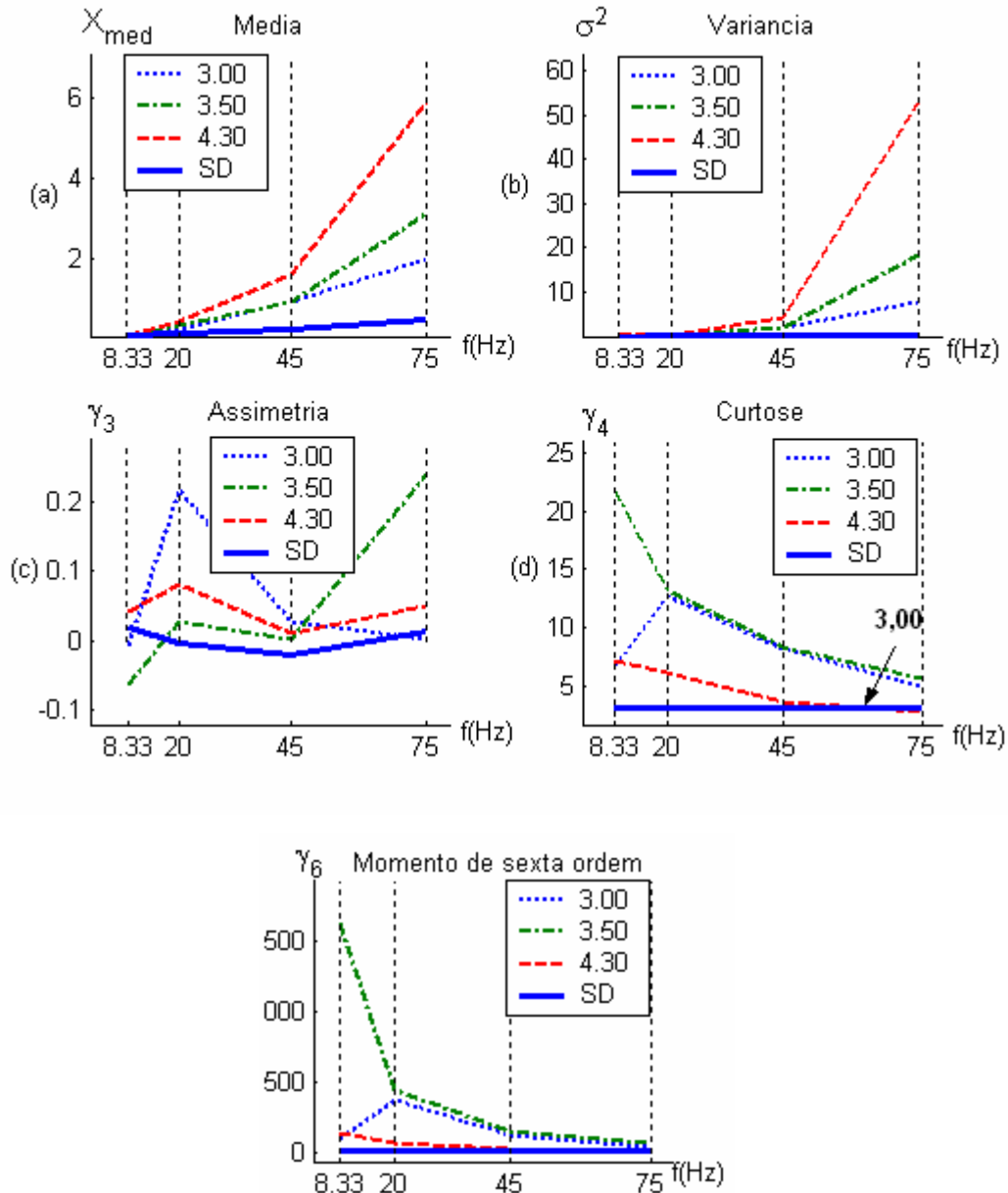


Figura 5.5 – Variação de parâmetros estatísticos em relação à velocidade e tamanho da Falha, (a) Média; (b) Variância; (c) Assimetria; (d) Curtose e (e) Momento de Sexta ordem.

Para este tipo de falha, os parâmetros conseguiram indicar a presença de falha, o único que não possibilitou a detecção da falha foi a assimetria.

Análise dos resultados obtidos Para Rolamentos Com Falha na Esfera

Os parâmetros estatísticos, RMS, pico máximo, fator de crista e fator K, obtidos para os rolamentos com defeitos na esfera têm tendências de elevação em relação à velocidade e o tamanho de falhas, semelhantes aos obtidos para rolamentos com defeitos nas pistas interna e externa (Figura 5.6). Porém, na região entre 20Hz e 45Hz há uma diferença de tendência, é possível que isso se dê em consequência da aleatoriedade de rotação da esfera.

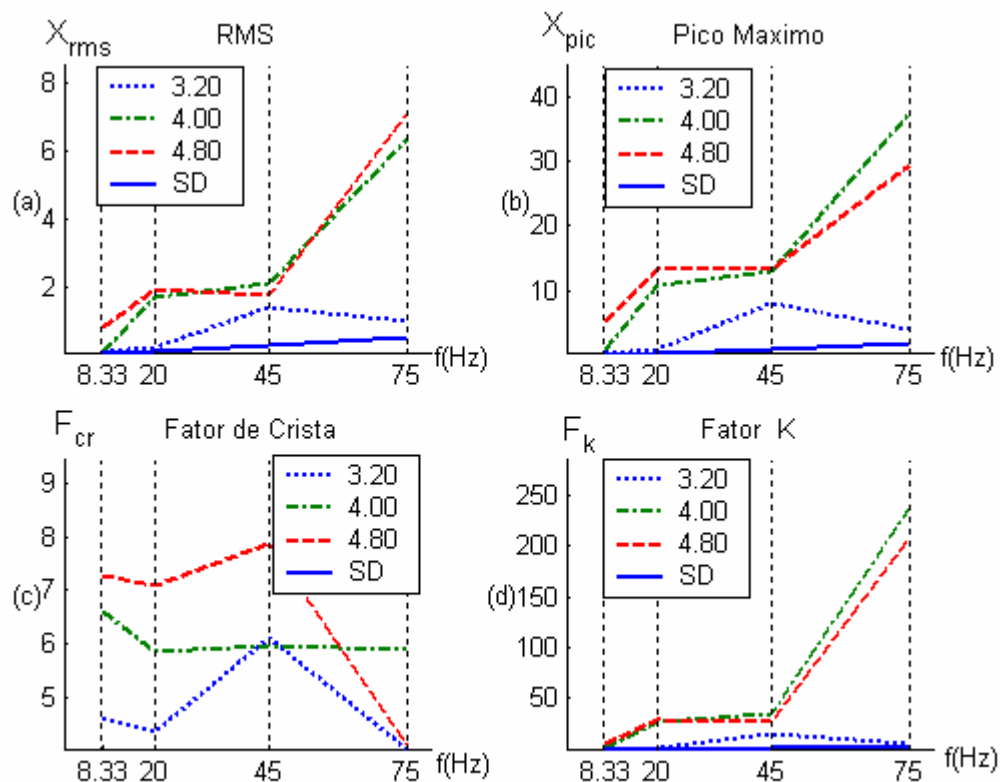


Figura 5.6 – Variação de parâmetros estatísticos em relação à velocidade e tamanho da Falha, (a) Índice RMS; (b) Valor de Pico; (c) Fator de Crista; (d) Fator K.

O mesmo é observado para os parâmetros estatísticos, média, variância, assimetria, curtose e momento de sexta ordem (Figura 5.7). As tendências são mantidas fora da região entre 20Hz e 45Hz, onde há uma tendência de decréscimo para as falhas com área de 4,00mm² e 4,80mm².

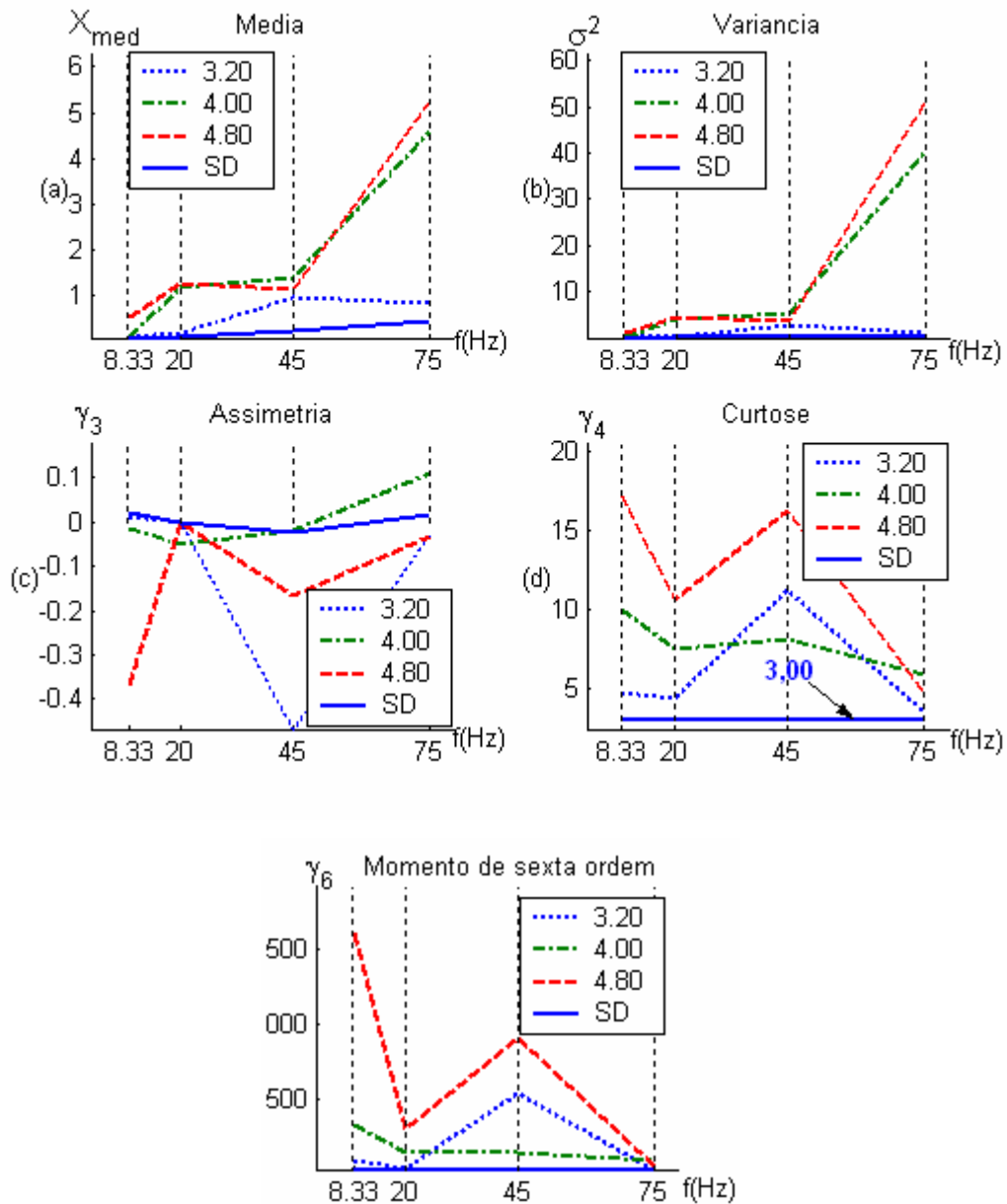


Figura 5.7 – Variação de parâmetros estatísticos em relação à velocidade e tamanho da falha, (a) Média; (b) Variância; (c) Assimetria; (d) Curtose e (e) Momento de Sexta ordem.

Análise dos resultados obtidos Para Rolamentos Com Falha na Gaiola

A falha que foi induzida na gaiola foi uma quebra na mesma. Desta forma, os dados obtidos variam somente em relação à velocidade. Foi seguida a mesma metodologia adotada para os defeitos anteriores, a fim de possibilitar uma comparação da evolução dos parâmetros obtidos para gaiola com os demais parâmetros obtidos para falhas nas pistas e esfera.

Na Figura 5.8, são apresentados os gráficos dos parâmetros estatísticos, RMS, pico máximo, fator de crista e fator K, obtidos para os rolamentos com defeitos na gaiola. Os mesmos têm tendências de evolução, em relação à velocidade, semelhantes às obtidas para rolamentos com defeito na pista interna.

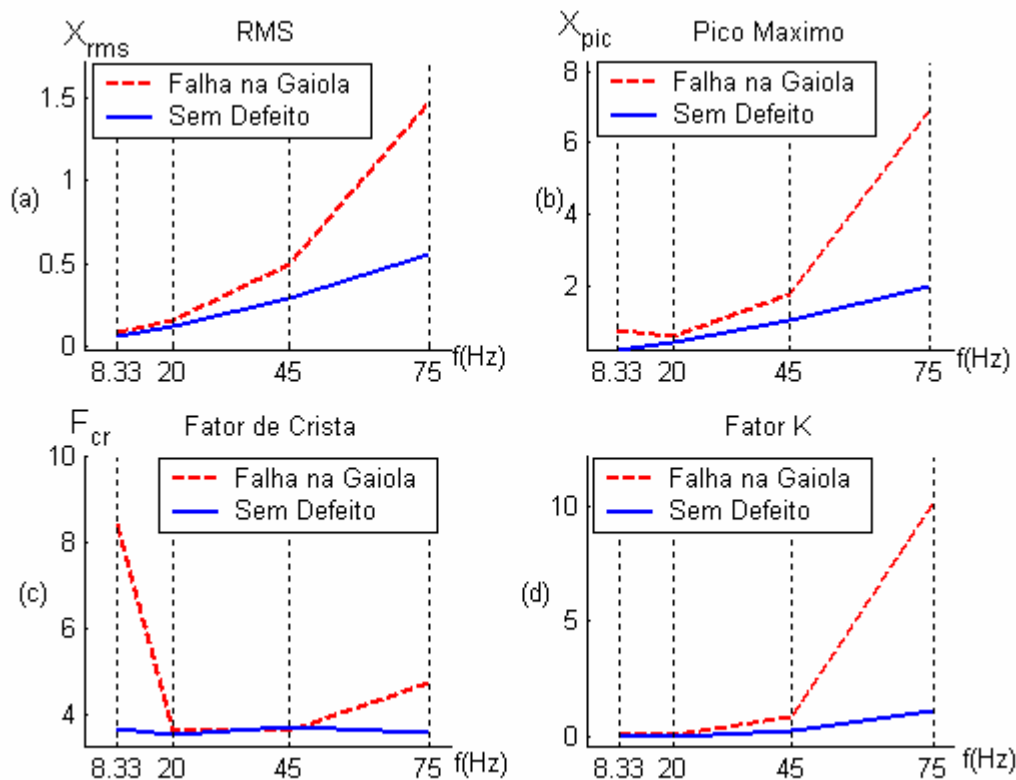


Figura 5.8 – Variação de parâmetros estatísticos em relação à velocidade e tamanho da falha, (a) Índice RMS; (b) Valor de Pico; (c) Fator de Crista; (d) Fator K.

Dos parâmetros apresentados, na Figura 5.9, somente a curtose tem tendência de evolução diferente dos demais. Na região de velocidade mais elevada a curva tende a crescer.

Vale ressaltar que os valores dos parâmetros para falhas nas gaiolas são bem menores que os obtidos para as falhas nas pistas e esfera, podendo em alguns casos onde o ruído de outros componentes da bancada é elevado, dificultar a detecção de falha no rolamento.

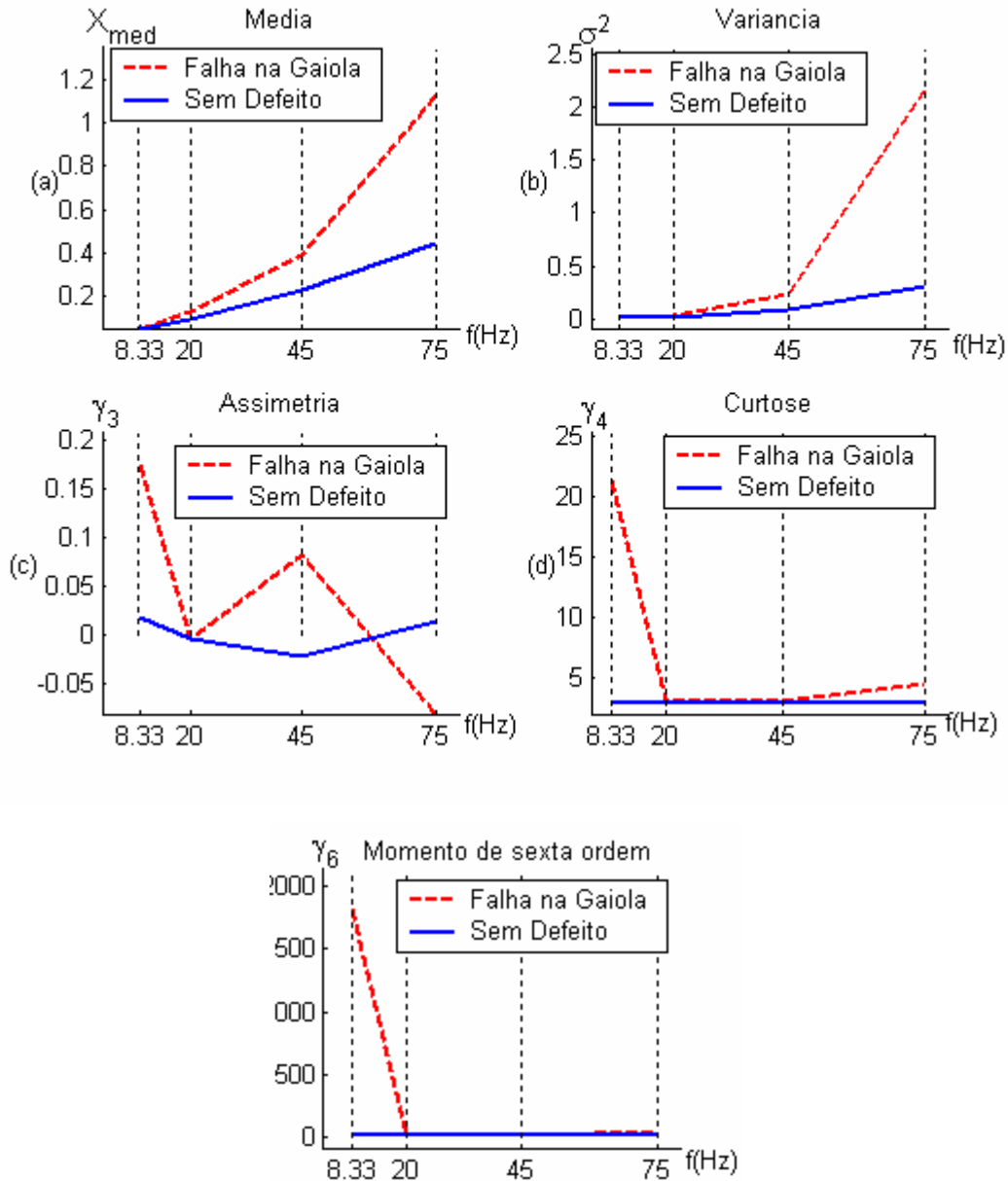


Figura 5.9 – Variação de parâmetros estatísticos em relação à velocidade e tamanho da Falha, (a) Média; (b) Variância; (c) Assimetria; (d) Curtose e (e) Momento de Sexta ordem.

Na Tabela 5.2, estão dispostos os diversos parâmetros estatísticos para as falhas mostradas anteriormente e suas tendências de variação são similares em relação à velocidade de rotação, do rolamento, e o tamanho da falha, exceto para falha na gaiola.

Tabela 5.2 Tendência de variação dos parâmetros estatísticos em relação à velocidade e tamanho da falha

Defeito na	Índice RMS	Pico máximo	Fator Crista	Fator k	Média	Curtose	Varian.	Assim.	M(5)
Pista Interna								sem tendência definida	
Pista Externa								sem tendência definida	
Esfera								sem tendência definida	
Gaiola								sem tendência definida	

5.5 Aplicação de Técnicas de Detecção de Falhas no Domínio da Frequência a Rolamentos com Falha Induzida.

Técnicas de detecção de falhas no domínio da frequência são aplicadas aos diversos rolamentos com falhas induzidas. Inicialmente, foi aplicada a técnica da Energia Residual e, em seguida, utilizou-se às técnicas de Envelope sem e com uso do filtro adaptativo e, por último, aplicou-se o Cepstrum.

Método da Energia Residual

Na Figura 5.10, estão apresentados os gráficos obtidos para energia residual de diversos tipos de falhas em rolamentos. A Figura 5.10(a) representa o gráfico da energia residual de um rolamento com defeito na pista interna. Observa-se que a medida que a falha e a velocidade aumentam há possibilidade de identificar, de forma mais clara, a presença de defeito no rolamento.

A Figura 5.10(b) representa o gráfico da energia residual de um rolamento com defeito na pista externa. A mesma observação feita para rolamento com defeito na pista interna se aplica a este caso. A Figura 5.10(c) representa o gráfico da energia residual de um rolamento com falha na esfera. Observa-se que, para falhas pequenas a energia residual não conseguiu determinar de forma clara a presença de falha na esfera do rolamento. A Figura 5.10(d) representa o gráfico da energia residual de um rolamento com defeito na gaiola. A energia residual para este tipo de defeito é muito baixa o que traz bastante dificuldade para a determinação de uma falha na gaiola do rolamento.

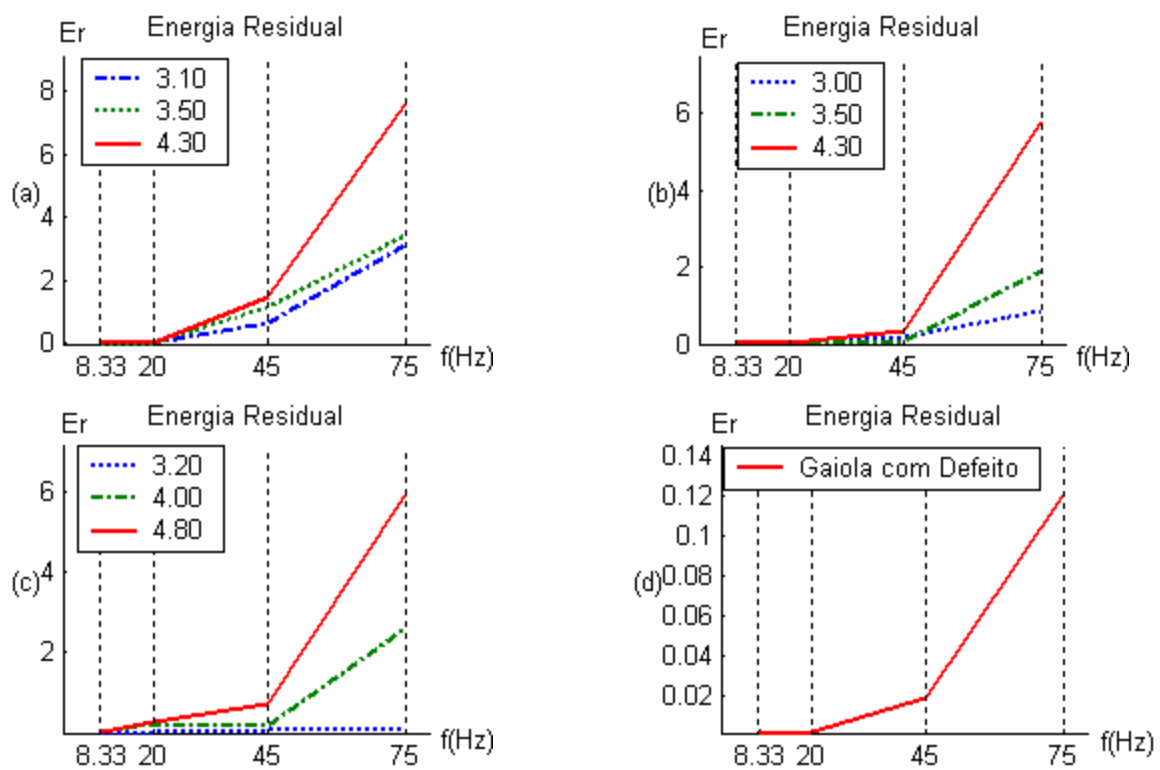


Figura 5.10 – Energia residual de rolamentos com falha, (a) pista interna com falha; (b) pista externa com falha; (c) esfera com falha; (d) gaiola com falha.

Aplicação da Técnica de Envelope

A técnica de envelope será aplicada a rolamentos com falhas nas pistas externa e interna, na esfera, a rolamentos com duas falhas na pista interna, duas falhas na pista externa e em rolamento

com falhas que simula desgaste severo nas pistas interna e externa. Vale ressaltar que a pista interna é a pista estacionária e a gaiola do rolamento é de nylon.

Aplicação da Técnica de Envelope a Rolamentos com falha na Pista Interna

A Figura 5.11 representa o sinal de um rolamento com defeito na pista interna. Na Figura 5.11(a), tem-se o sinal após a passagem pelo filtro passa banda e o espectro do sinal obtido pela técnica de envelope. A Figura 5.11(b) representa o sinal obtido a partir da aplicação do filtro adaptativo ao sinal anterior e o espectro do mesmo após a aplicação da técnica de envelope.

Pode-se observar, que a aplicação do filtro adaptativo possibilita a obtenção de um espectro mais “limpo”, ressaltando a frequência do defeito.

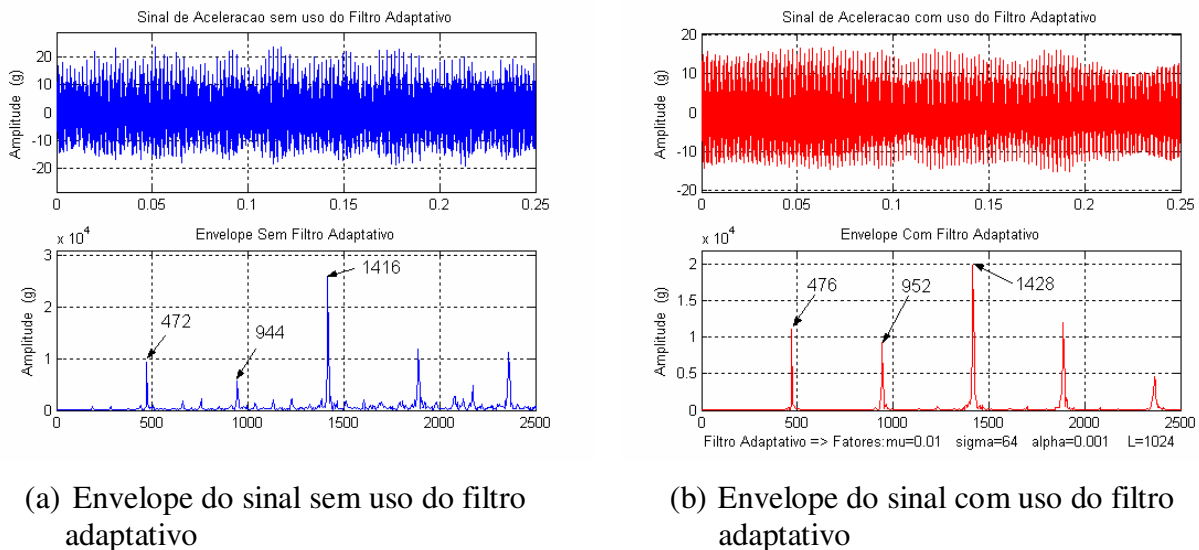
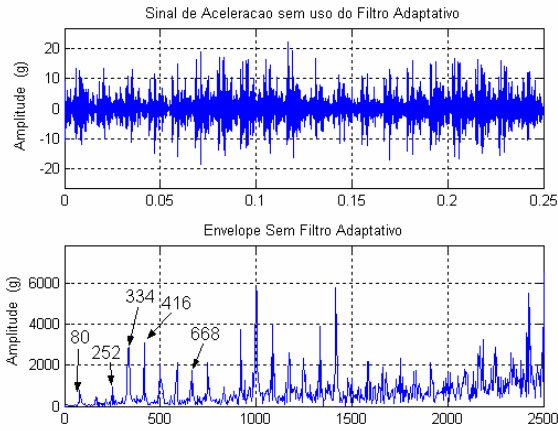


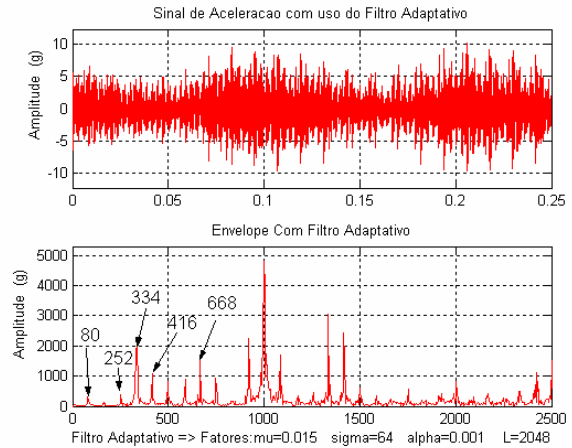
Figura 5.11- Aplicação da técnica de envelope a um rolamento com defeito na pista interna.

Aplicação da Técnica de Envelope a Rolamentos com falha na Pista Externa

Na Figura 5.12, tem-se o sinal de um rolamento com defeito na pista externa. Comparando os espectros obtidos dos sinais, observa-se que a aplicação do filtro adaptativo facilitou a detecção da falha, pois resalta a frequência do defeito.



(a) Envelope do sinal sem uso do filtro adaptativo

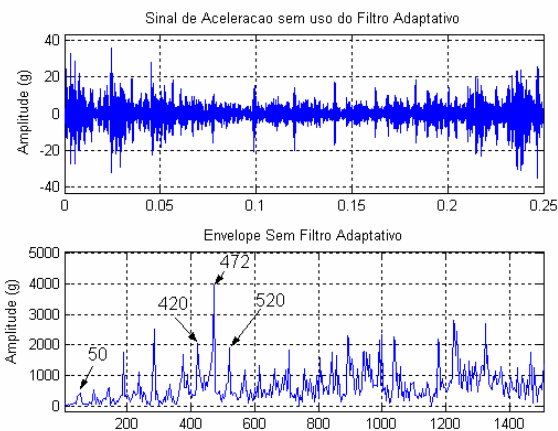


(b) Envelope do sinal com uso do filtro Adaptativo

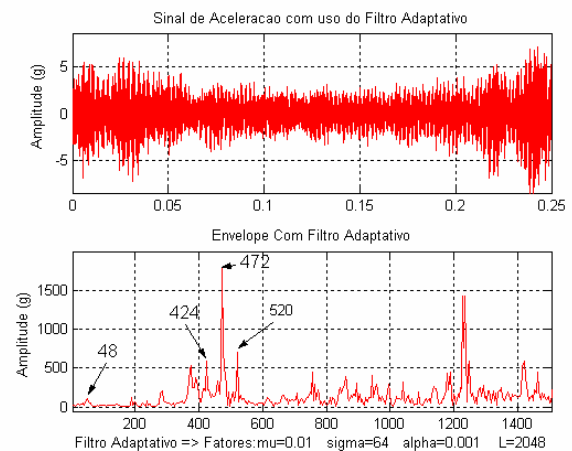
Figura 5.12- Aplicação da técnica de envelope a um rolamento com defeito na pista externa

Aplicação da Técnica de Envelope a Rolamentos com falha na Esfera

O sinal de um rolamento com defeito na esfera é representado pela Figura 5.13. Pode-se observar que o espectro obtido pela técnica de envelope não deixa claro qual é a frequência principal do defeito que é de 424Hz , pois sua amplitude é menor que a da frequência de 472Hz , que é uma banda lateral da modulação. Este problema não ocorre quando o filtro adaptativo é aplicado. A frequência da gaiola que modula o sinal de defeito da esfera é de 48Hz , pode ser vista no espectro de frequência do sinal.



(a) Envelope do sinal sem uso do filtro adaptativo

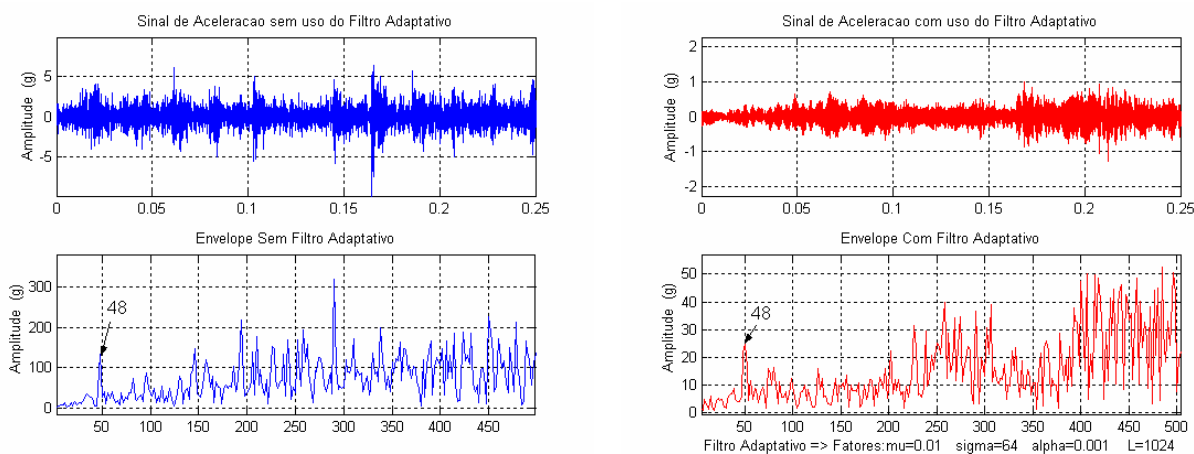


(b) Envelope do sinal com uso do filtro Adaptativo

Figura 5.13- Aplicação da técnica de envelope a um rolamento com defeito na esfera

Aplicação da Técnica de Envelope a Rolamentos com falha na Gaiola

A Figura 5.14 representa o sinal de um rolamento com defeito na gaiola. Este defeito é bastante difícil de ser identificado. Com a aplicação do filtro adaptativo a amplitude da frequência do defeito torna-se mais elevada. Esta dificuldade sempre acontece porque a análise espectral é feita em uma faixa de frequência bem acima da faixa do defeito na gaiola. Contudo, quando se faz uma análise de uma falha em gaiola é aconselhável “um olhar atento” em uma faixa de frequência que vai de zero a, aproximadamente, dez vezes a frequência de defeito da gaiola, pois o defeito pode não estar ressaltado, porém através de um “zoom” nesta região ele pode ser detectado.



(a) Envelope do sinal sem uso do filtro adaptativo

(b) Envelope do sinal com uso do filtro Adaptativo

Figura 5.14- Aplicação da técnica de envelope a um rolamento com defeito na gaiola.

Aplicação da Técnica de Envelope a Rolamentos com duas falhas na Pista Interna

Na Figura 5.15, tem-se o sinal de um rolamento com duas falhas na pista interna, como mostrada na foto da Tabela 6.1. Ambas as técnicas conseguem identificar as falhas, sendo que o uso do filtro adaptativo mostra um sinal mais limpo, portanto, facilita a detecção da falha. Um fato interessante a ser destacado é que a primeira frequência de amplitude elevada, 952Hz, corresponde a duas vezes a frequência de defeito, ou seja, 476Hz. Tal fato não acarreta

difficuldade na identificação da falha, pois os picos de frequência encontram-se espaçados com valores correspondentes à frequência de defeito na pista interna.

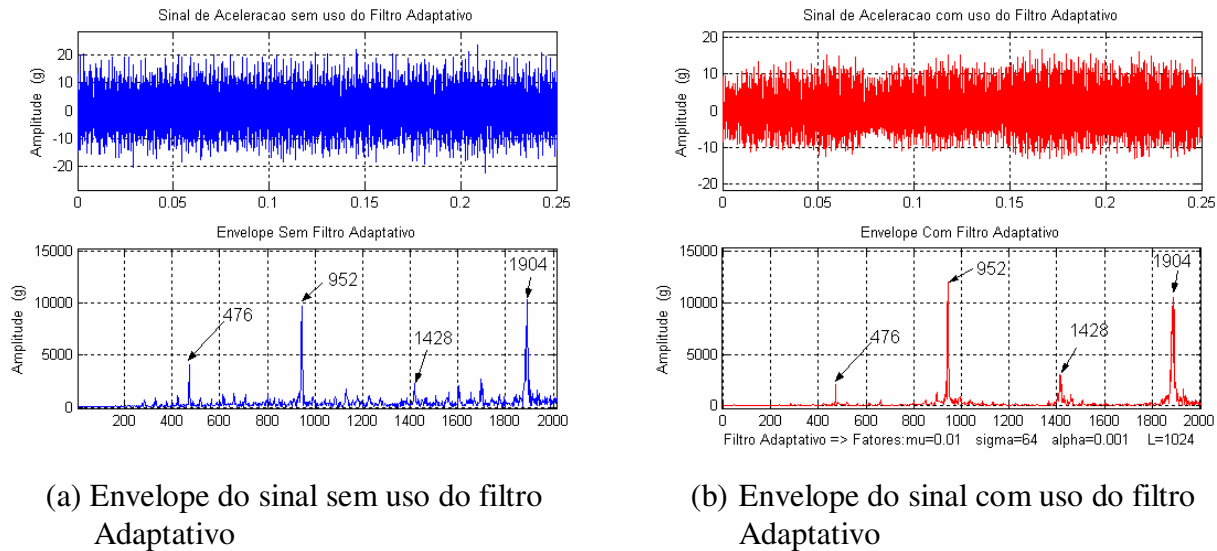


Figura 5.15- Aplicação da técnica de envelope a um rolamento com dois defeitos na pista interna.

Aplicação da Técnica de Envelope em Rolamentos com duas falhas na Pista Externa

O sinal de um rolamento com duas falhas na pista externa encontra-se representado na Figura 5.16. Comparando-se os espectros obtidos, observa-se que o uso do filtro adaptativo eleva a amplitude da frequência do defeito em relação as demais frequências contidas no espectro do sinal.

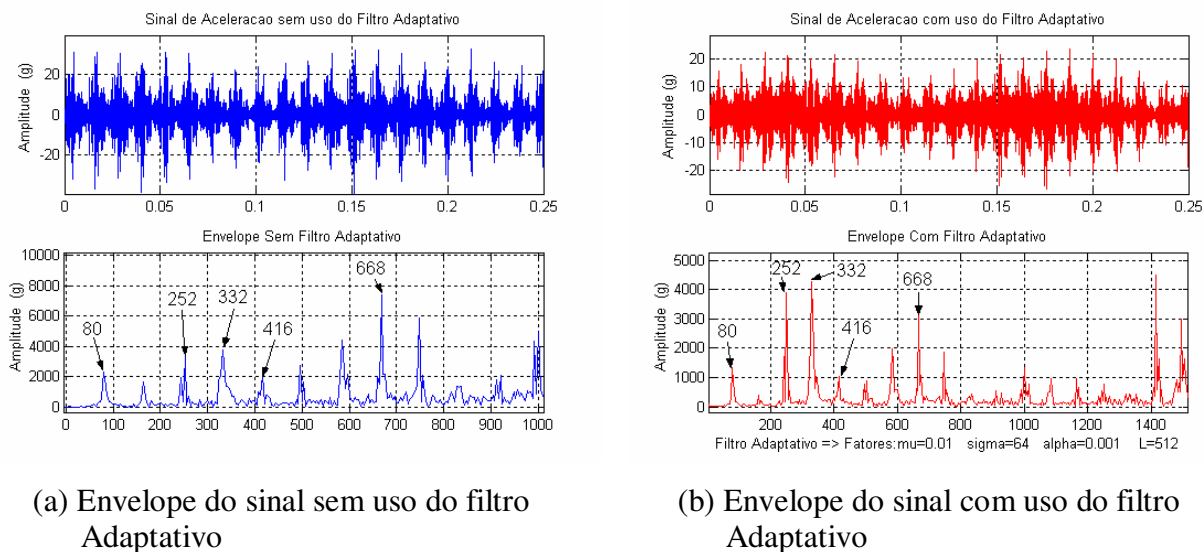


Figura 5.16- Aplicação da técnica de envelope a um rolamento com dois defeitos na pista externa.

Aplicação da Técnica de Envelope em Rolamentos com defeito severo na Pista Interna

A Figura 5.17 representa o sinal de um rolamento com defeito severo na pista interna. Esta falha induzida simula um descascamento excessivo na pista do rolamento. Observando-se os espectros obtidos, vê-se que para este tipo de falha a técnica de envelope sem o uso do filtro adaptativo é suficiente para a detecção de falha na pista interna, portanto, com este tipo de defeito, não se tem a necessidade do uso do filtro adaptativo.

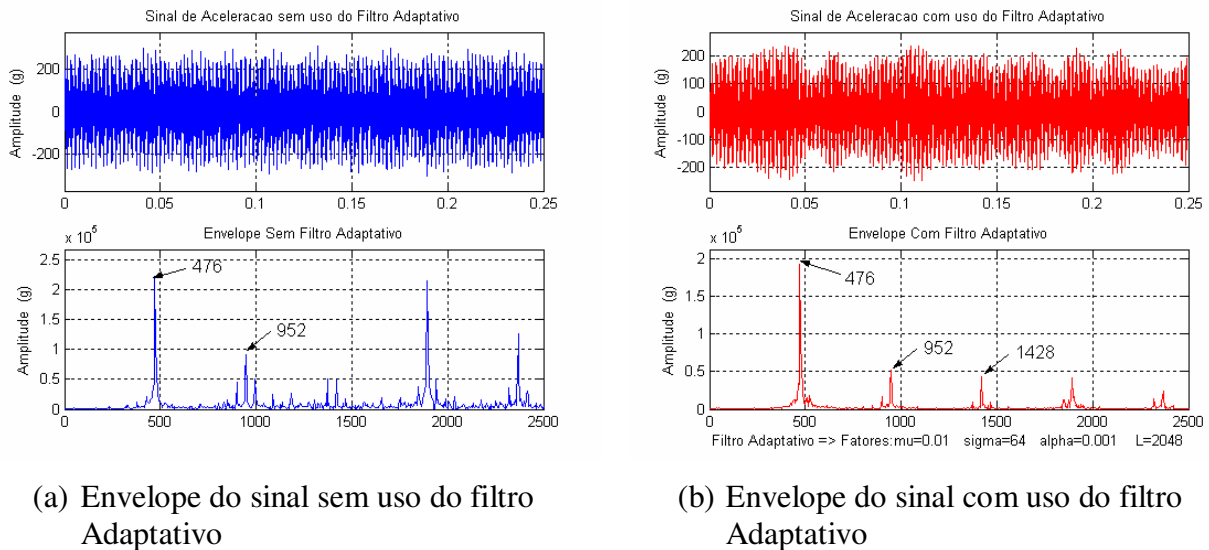
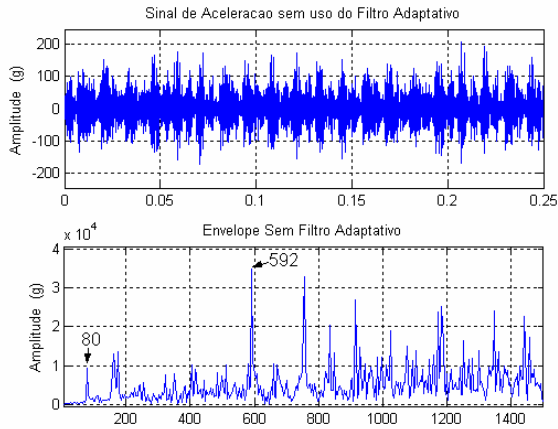


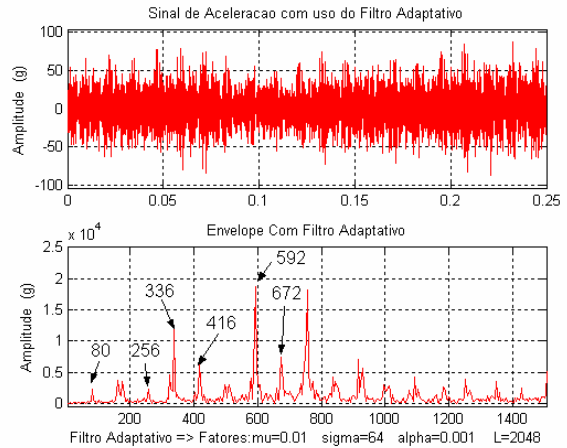
Figura 5.17- Aplicação da técnica de envelope a um rolamento com defeito severo na pista interna

Aplicação da Técnica de Envelope em Rolamentos com defeito severo na Pista Externa

Os espectros do sinal, de um rolamento com defeito excessivo na pista externa, encontram-se na Figura 5.18. Pode-se verificar que o uso do filtro adaptativo evidencia bastante a frequência de defeito. Possibilitando assim, um diagnóstico rápido e preciso da falha do rolamento.



(c) Envelope do sinal sem uso do filtro Adaptativo



(d) Envelope do sinal com uso do filtro adaptativo

Figura 5.18- Aplicação da técnica de envelope a um rolamento com defeito severo na pista externa

Aplicação do Cepstrum

O cepstrum será aplicado a rolamentos com falhas nas pistas externa e interna, falha na esfera, rolamentos com duas falhas na pista interna, duas falhas na pista externa e em rolamento com falhas que simula desgaste severo nas pistas interna e externa.

Aplicação do Cepstrum a Rolamentos com falha na Pista Interna

A Figura 5.19 representa o sinal de um rolamento com defeito na pista interna. A frequência de defeito para o sinal de falha ao qual foi aplicado o cepstrum é de 476Hz. Este mesmo valor pode ser obtido através do cepstrum do sinal. No gráfico de cepstrum obtido para este caso, são evidenciados os picos com espaçamento de 0,0021s, cujo valor inverso é 476Hz, que é a frequência do defeito do rolamento.

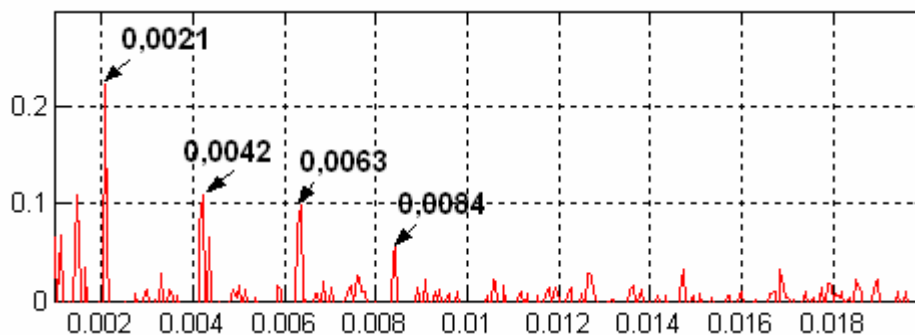


Figura 5.19- Cepstrum de um sinal de defeito na pista Interna

Aplicação do Cepstrum a Rolamentos com falha na Pista Externa

Na Figura 5.20, tem-se o cepstrum do sinal de um rolamento com defeito na pista externa. Os picos obtidos têm um espaçamento de 0,012s cujo valor inverso $1/0.012 = 83,3\text{Hz}$, que é a frequência de modulação do sinal de defeito. Para o rolamento utilizado, evidencia defeito na pista externa pois a frequência obtida modula o sinal de defeito da pista girante.

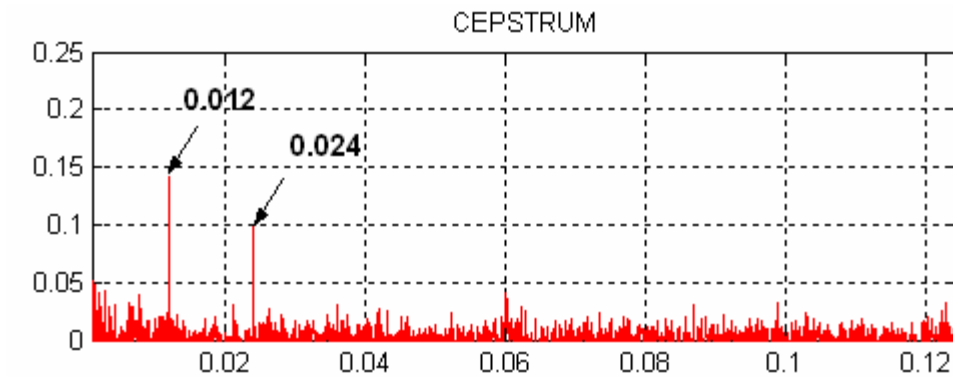


Figura 5.20- Cepstrum de um sinal de defeito na pista externa

Aplicação do Cepstrum a Rolamentos com falha na Esfera

O sinal de um rolamento com defeito na esfera é representado pela Figura 5.21. Pode-se observar um pico, no sinal de cepstrum, com o valor de 0,021s cujo inverso é a frequência de 48Hz, que é o valor de modulação do sinal de defeito do rolamento com falha na esfera. Como foi visto anteriormente, o sinal de defeito na esfera tem a frequência da gaiola como moduladora.

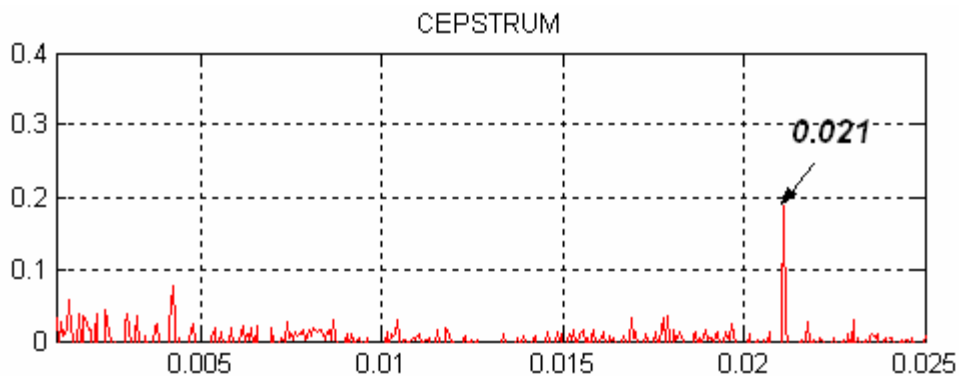
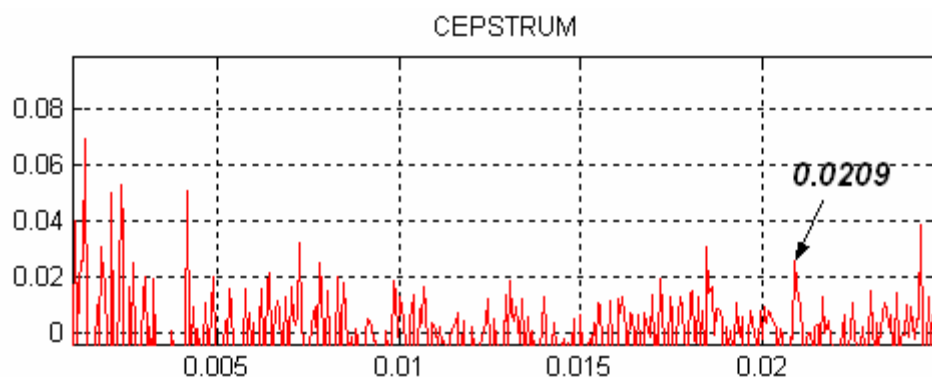


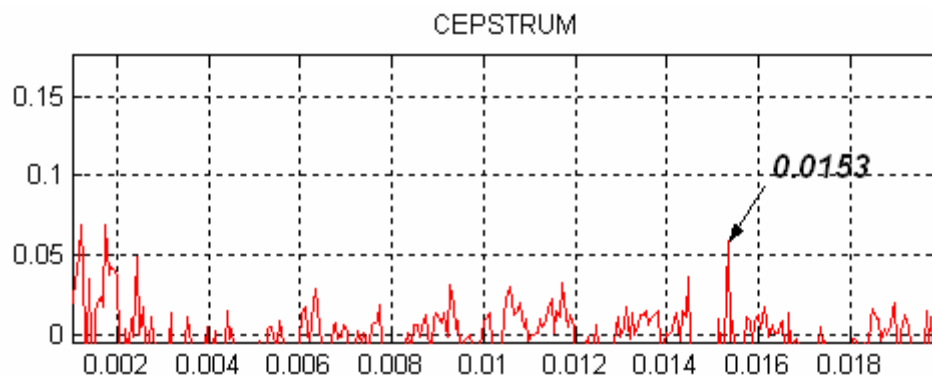
Figura 5.21- Cepstrum de um sinal de defeito na esfera

Aplicação do Cepstrum a Rolamentos com falha na Gaiola

A Figura 5.22 representa o sinal de um rolamento com defeito na gaiola. Os gráficos de cepstrum mostrados são para duas condições de velocidades diferentes onde o primeiro gráfico corresponde ao cepstrum de um rolamento submetido a uma rotação de 80Hz e o segundo é cepstrum do mesmo rolamento submetido a uma rotação de 113Hz. Pode-se observar que a medida que a velocidade do rolamento aumenta o pico cujo valor inverso corresponde a frequência da gaiola destaca-se em relação aos demais. Donde conclui-se que a detecção de falha na gaiola do rolamento via cepstrum é difícil de ser obtida quando o rolamento está em baixa velocidade.



(a) Rolamento com anel externo girando a 80Hz



(a) Rolamento com anel externo girando a 113Hz

Figura 5.22- Cepstrum de um sinal de defeito na gaiola

Aplicação do Cepstrum a Rolamentos com dois defeitos na Pista Interna

Na Figura 5.23, tem-se o sinal de um rolamento com duas falhas na pista interna, como mostrada na foto da Tabela 6.1. Pode-se observar a presença de picos com um espaçamento de 0,0039 cujo valor inverso é 256 que corresponde à frequência do defeito.

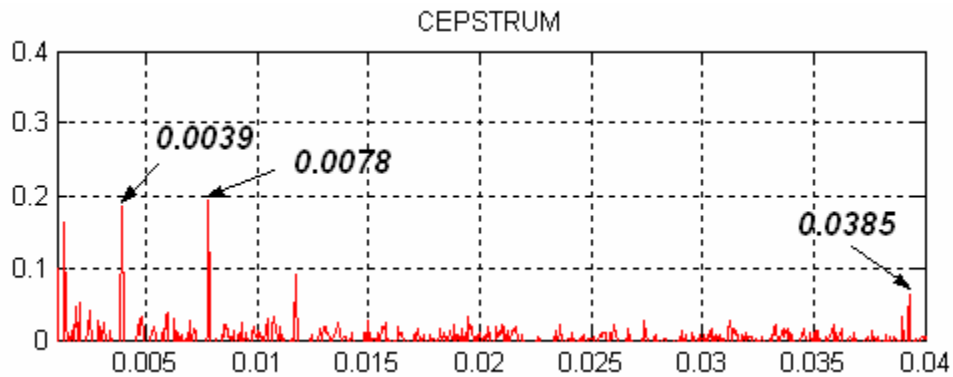


Figura 5.23- Cepstrum de um sinal com dois defeitos na pista interna.

Aplicação do Cepstrum a Rolamentos com dois defeitos na Pista Externa

O cepstrum de um sinal de um rolamento com duas falhas na pista externa encontra-se representado na Figura 5.24. Observa-se a presença de um pico com valor de 0,012s, cujo inverso deste valor é 83,33Hz, que corresponde a frequência de modulação do sinal.

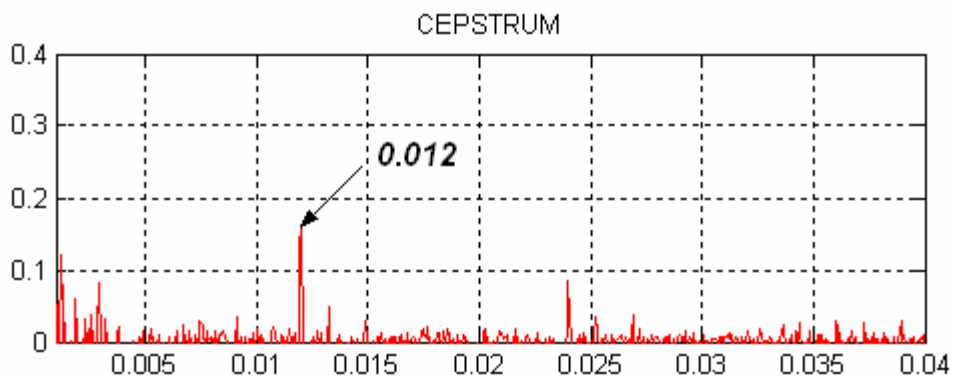


Figura 5.24- Cepstrum de um sinal com dois defeitos na pista externa.

Aplicação do Cepstrum a Rolamentos com defeito severo na Pista Interna

A Figura 5.25 representa o sinal de um rolamento com defeito severo na pista interna. No cepstrum do sinal são encontrados picos com espaçamento de 0,0021s, cujo valor inverso é 476Hz, que corresponde à frequência de defeito do rolamento.

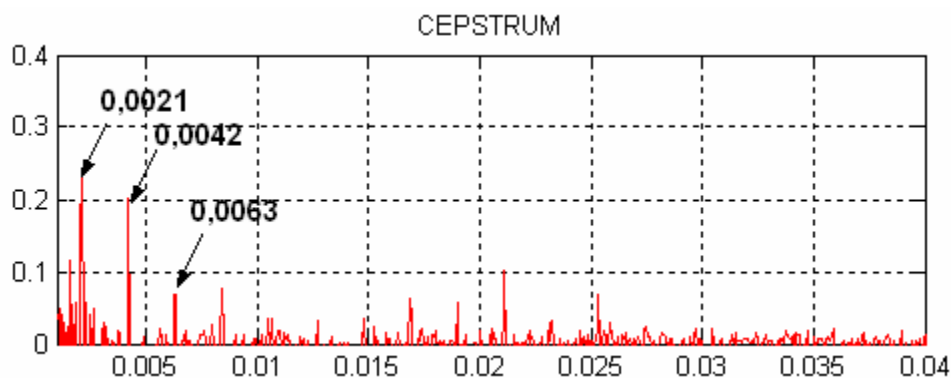


Figura 5.25- Cepstrum de um sinal com defeito severo na pista interna

Aplicação do Cepstrum a Rolamentos com defeito severo na Pista Externa

Os espectros do sinal, de um rolamento com defeito severo na pista externa, encontram-se na Figura 5.26. Pode-se verificar no cepstrum do sinal a presença de picos com espaçamento de 0,0119s, portanto, a frequência de modulação do sinal é de 84Hz.

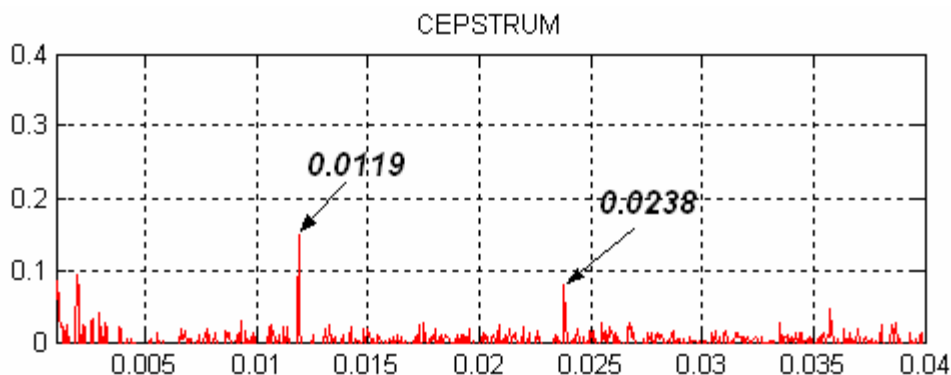


Figura 5.26- Cepstrum de um sinal com defeito severo na pista externa

Observações

Através dos parâmetros estatísticos RMS, pico máximo, média, fator K e variância, são possíveis as detecções das falhas nos rolamentos, independentes da velocidade com que eles estejam submetidos. Já, os outros parâmetros analisados não foram satisfatórios, quer seja por estarem os rolamentos sujeitos a altas velocidades, como no caso da curtose; quer seja para toda e qualquer velocidade e falhas, como se mostrou a assimetria.

Para a energia residual a detecção é bem sucedida independente da velocidade que os rolamentos estão submetidos. Mas, vale ressaltar que, tanto a energia residual como os parâmetros estatísticos são indicados para detectar a presença de falhas e não para determinar em qual elemento dos rolamentos elas estão presentes.

No caso do cepstrum e da técnica do envelope, ambos conseguiram identificar a maioria das falhas presentes nos rolamentos, apresentando uma maior dificuldade na detecção da falha na gaiola. Sendo que, ao se usar o envelope com filtro adaptativo, o emprego da técnica se mostrou mais eficiente, tornando possível a identificação das falhas quando elas ocorriam, na gaiola.

CAPÍTULO 6

ENSAIOS PARA ANÁLISE DE EVOLUÇÃO DE FALHAS

6.1 Introdução

Para os ensaios, foram utilizados doze rolamentos pertencentes ao mesmo lote de fabricação. Os rolamentos foram ensaiados, simultaneamente, com controle de temperatura, velocidade e carga.

Foram feitas aquisições diárias dos sinais de aceleração de cada rolamento, e, em seguida, os dados foram processados a fim de se obter os parâmetros estatísticos, a energia residual, o envelope e cepstrum.

6.2 Bancada

Foi utilizada uma bancada da INA Brasil (Figura 6.1). A bancada é composta de quatro cabeçotes, sendo que em cada cabeçote são colocados três rolamentos, que são acionados por uma correia (Figura 6.2). Os cabeçotes ficam isolados do ambiente por meio de uma “caixa” com isolamento térmico, onde a temperatura de ensaio pode ser alterada por meio de um sistema de aquecimento. Outra possibilidade fornecida pela bancada é a variação da velocidade de ensaio e da carga.

Antes de serem iniciados os ensaios, foram colocados na bancada, rolamentos com falhas induzidas. Em um primeiro momento, em cada posição do cabeçote, foram dispostos rolamentos

com diferentes tipos de falhas. Na primeira posição, colocou-se um rolamento com falha na pista interna, na segunda, um rolamento com falha na pista externa e na terceira posição, um rolamento com falha na esfera, as referidas posições estão indicadas na Figura 6.2. Foram feitas aquisições e observou-se que não havia superposição dos sinais de falhas. Em seguida, foi feita uma comparação entre o *software* de envelope implementado no MATLAB e um outro *software* comercial, observou-se que ambos forneciam os mesmos resultados.

Com todos os rolamentos dispostos na bancada, iniciaram-se os ensaios. Foi previsto um período de 47 dias de ensaios, num total de 1128hs. Nos dois primeiros dias, os rolamentos foram submetidos a uma velocidade de 4000rpm, a temperatura de 90°C e uma carga 800N . Esta etapa constitui o período de amaciamento do rolamento.

No terceiro dia, os rolamentos foram submetidos ao regime de ensaios, propriamente dito, onde a velocidade aplicada foi de 7000rpm, a temperatura de 110°C e uma carga de 1000N.

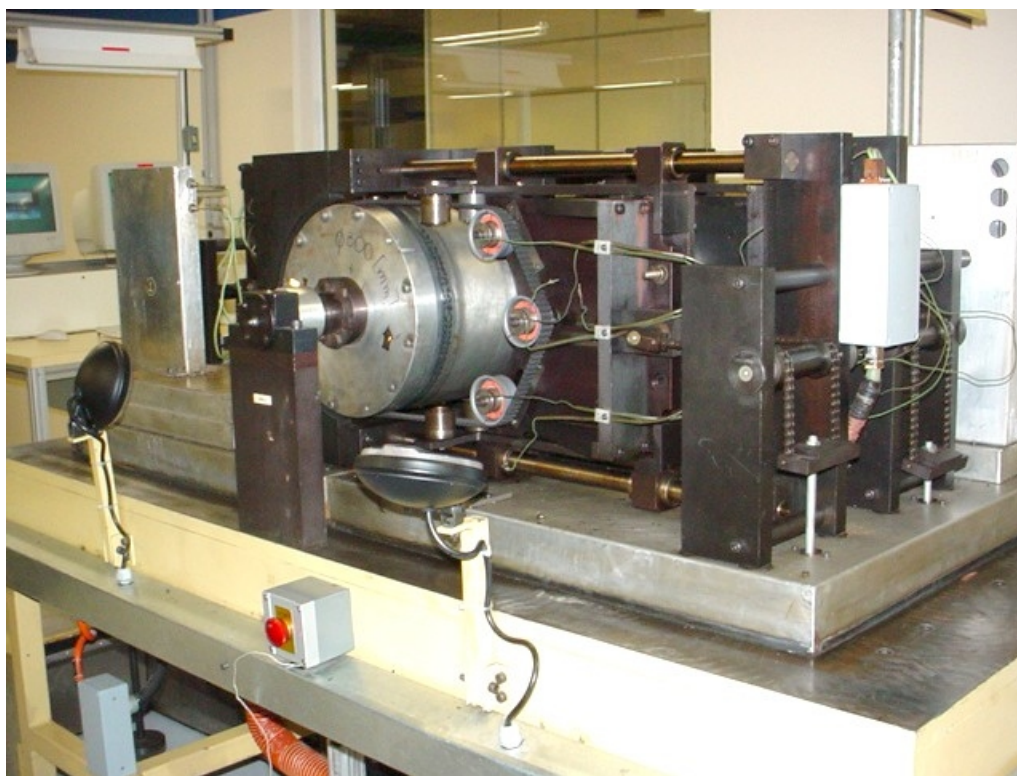


Figura 6.1 – Foto da bancada de ensaios.

No trigésimo quinto dia de ensaio, a bancada foi parada e dos doze rolamentos dez foram desmontados e inspecionados. Ao final da inspeção verificou-se que os rolamentos não

apresentavam falhas, em seguida os rolamentos foram recolocados na bancada e foram submetidos a uma carga de 1200N.

Para aquisição dos sinais foram montados acelerômetros na direção de carga dos rolamentos, como está mostrado na Figura 6.2. Os sinais de aceleração eram adquiridos a cada 24hs e enviados para o analisador de sinais, Pulse da Bruel &Kjaer. Foram previstas duas paradas da bancada para inspeção dos rolamentos, uma no décimo quinto dia e outra no trigésimo quinto. As paradas não programadas só eram realizadas em caso de necessidade de retirada de um rolamento que falhou ou para colocação dos acelerômetros.

Durante a fase de aquisição, foi utilizado um filtro anti-aliasing com frequência de corte de 10kHz. Para cada ensaio, foram obtidos 16384 pontos com um tempo total de 1s.

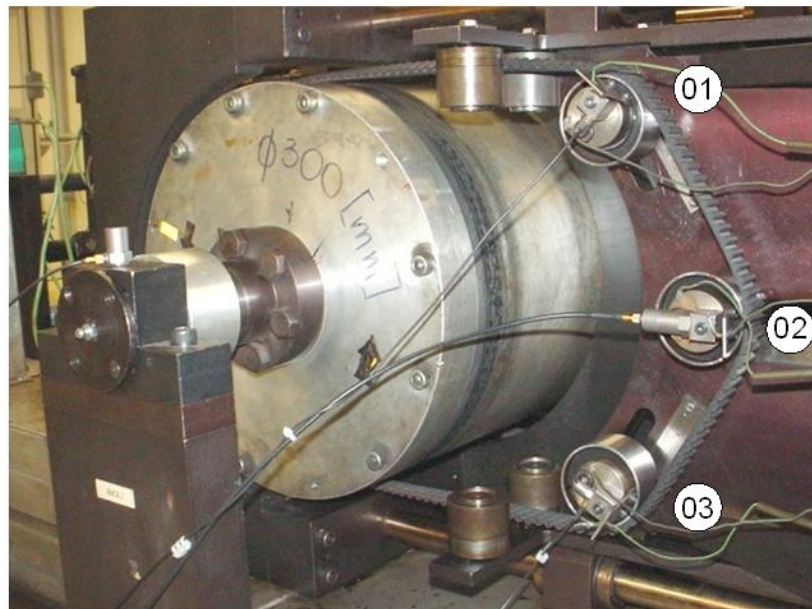


Figura 6.2 – Montagem dos acelerômetros e posições.

6.3 Análise dos Resultados

À medida que os sinais eram adquiridos, os mesmos eram processados a fim de se observar o surgimento de falhas nos rolamentos. Foram aplicados os níveis de RMS, pico máximo, fator de crista, fator K, média, variância, assimetria, curtose e momento de sexta ordem que são técnicas de análise de sinais no domínio do tempo. Também foram aplicadas técnicas no domínio

da frequência; análise residual de energia e envelope com filtro adaptativo, além do cepstrum. Se durante o processamento dos sinais fosse observado o surgimento de algum indício de falha, a bancada era parada e o rolamento que apresentou o sinal era retirado da bancada. Então, o rolamento era submetido às medições padrões utilizadas pela indústria.

O primeiro passo das medições é a pesagem do rolamento. Em seguida, era feita uma medida das folgas radial e axial do rolamento, jogo, torque de giro e ruído, e, por último, o rolamento era desmontado e fotografado. Na montagem do rolamento, a graxa que foi retirada era reaproveitada, e caso houvesse necessidade era completada para que se mantivesse o mesmo peso do momento de sua retirada.

Ao final do ensaio, os dados foram analisados e os resultados obtidos foram agrupados de acordo com o tipo de falha apresentada pelos rolamentos.

Como todos os rolamentos foram submetidos à mesma velocidade de ensaio 7000rpm, foram calculados os valores das frequências características de defeito, que serão utilizadas durante análise dos resultados obtidos. Vale ressaltar, que os valores calculados são valores aproximados, pois em geral quando os rolamentos estão submetidos a velocidade de rotação pode haver escorregamento do elemento girante na pista.

Tabela 7.1 – Frequências de defeitos do rolamento

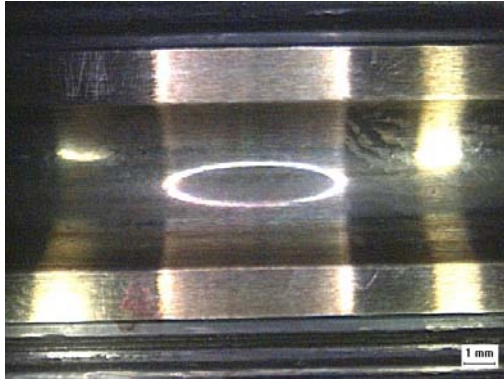
Freq. de rot. da pista externa	Frequências de Defeito			
	Pista interna	Pista externa	Esfera	Gaiola
116.66Hz	681.18Hz	485.42Hz	674.13Hz	68.12Hz

6.3.1 Rolamentos que não apresentaram falhas

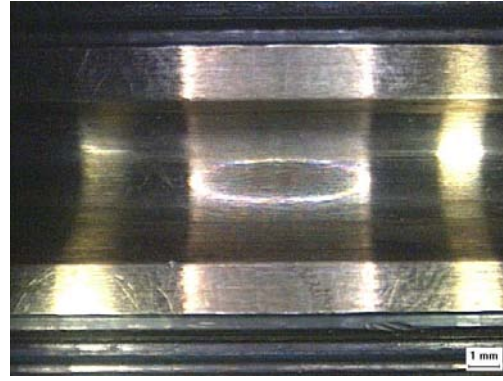
Aspectos Físicos

Observou-se que cinco rolamentos não tinham nenhum tipo de falha e apresentaram resultados semelhantes para os diversos parâmetros. Portanto, optou-se por mostrar um único rolamento deste grupo. Primeiro, serão mostradas fotos do rolamento no momento do final do ensaio e, em seguida, os resultados obtidos no processamento dos sinais durante os dias de ensaio.

A Figura 6.3 apresenta a pista interna do rolamento. Nos itens (a) e (b), estão os lados de aplicação da carga e o lado de carregamento mínimo, respectivamente. Pode-se observar que os rolamentos apresentam marcas de rodagem normal em suas pistas.



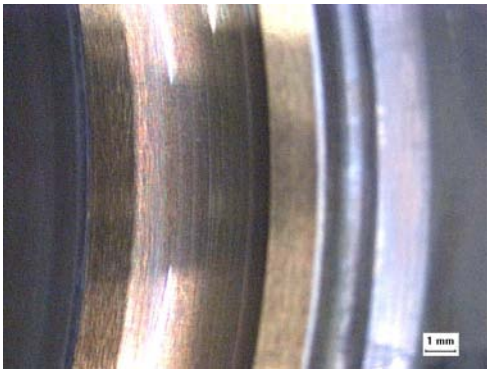
(a) lado de aplicação de carga



(b) lado onde a carga é mínima

Figura 6.3 – Pista interna de um rolamento com desgaste normal

Na Figura 6.4, podem ser vistos os outros componentes do mesmo rolamento. É apresentada a pista externa, de um rolamento, com desgaste normal na Figura 6.4(a) e, na Figura 6.4(b), a esfera e gaiola com desgaste normal.



(a) Pista externa com desgaste normal



(b) Esfera e gaiola com desgaste normal

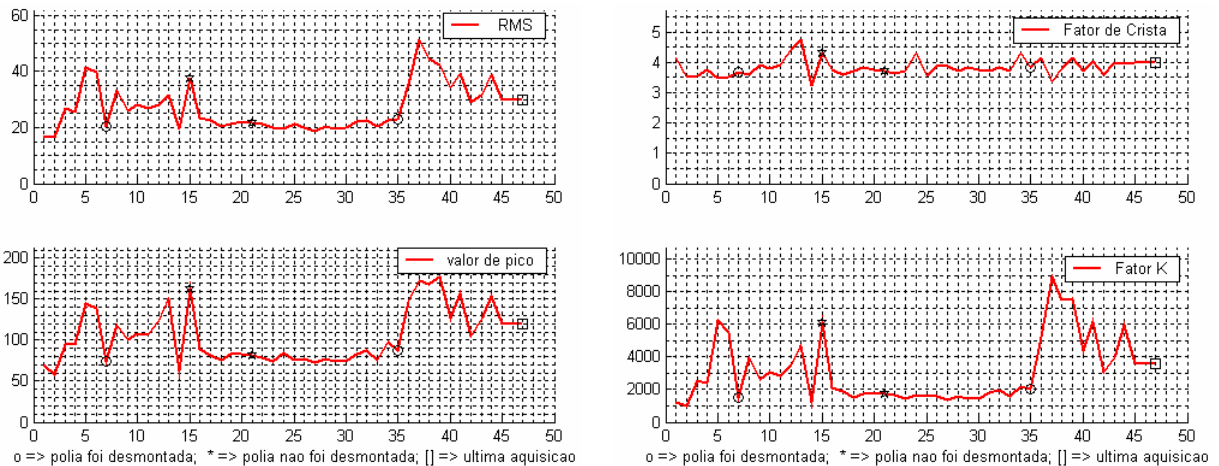
Figura 6.4 – Pista externa, esfera e gaiola de um rolamento com desgaste normal.

Parâmetros Estatísticos obtidos

Os parâmetros estatísticos calculados para este grupo de rolamentos tiveram comportamentos semelhantes. Na Figura 6.5, estão representados os parâmetros, RMS, valor de pico, fator de crista e fator K para este grupo. Pode-se observar que sempre, após a remontagem dos rolamentos, os parâmetros estatísticos tiveram uma tendência de crescimento e, em seguida, retornaram aos valores próximos dos apresentados antes da desmontagem.

É interessante ressaltar a ocorrência observada nos primeiros dias de ensaio. Na região que abrange os três primeiros dias, os rolamentos estavam em processo de amaciamento. Por isso, esse dado não foi levado em conta, apesar de apresentar uma grande elevação de valores. Isto ocorre devido a pequenos riscos existentes na pista, ocasionados durante o processo de retificação das mesmas. Além disso, durante o período de amaciamento, houve uma elevação de velocidade, de 4000rpm para 7000rpm e como visto no capítulo anterior, o aumento da velocidade causa mudanças nos parâmetros estatísticos.

Na seqüência do ensaio, podem-se observar outras regiões onde ocorreram alterações. Entre o décimo terceiro e o décimo sexto dia de ensaio houve uma oscilação que logo voltou à normalidade, neste período optou-se por não desmontar o rolamento, pois as demais técnicas que vinham sendo usadas para o monitoramento do rolamento não apresentaram indícios de falhas.



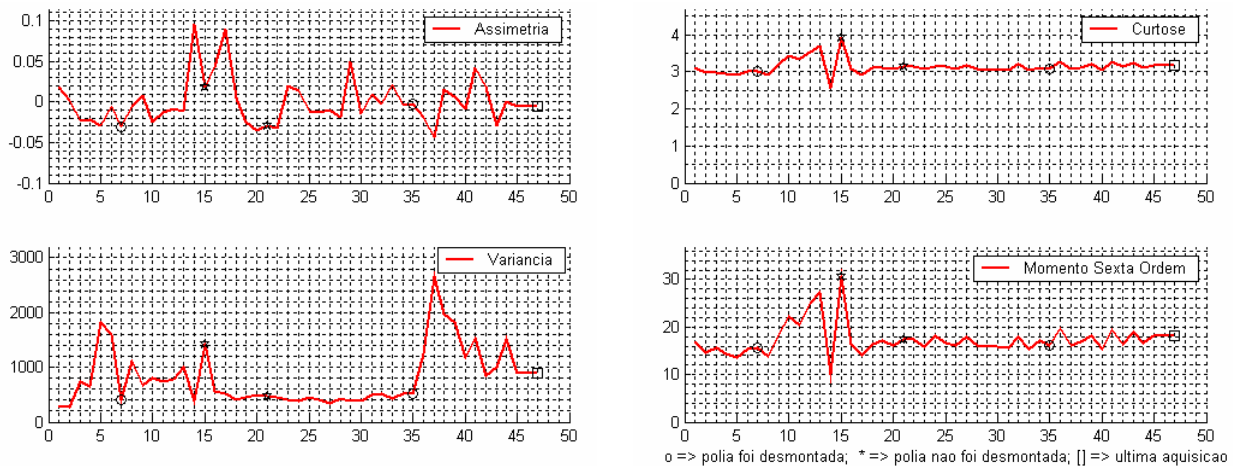
(a) RMS e valor de pico

(b) fator de crista e fator K

Figura 6.5 – Parâmetros estatísticos para rolamento que não apresentaram defeito durante o ensaio.

Já no trigésimo quinto dia de ensaio, foi necessária uma parada mais longa na bancada para inspeção dos rolamentos, substituição da correia, e aumento da carga. Observou-se, então, que todos os parâmetros sofreram uma elevação de valores após o reinício, mas, que logo em seguida, os valores voltaram à normalidade.

Os valores obtidos para a assimetria, variância, curtose e momento de sexta ordem são apresentados na Figura 6.6. Observa-se que a variância tem um comportamento semelhante ao apresentado pelos parâmetros mostrados na Figura 6.5, já a curtose e o momento de sexta ordem só sofreram alterações entre o décimo terceiro e o décimo sexto dia de ensaio. As demais regiões não apresentaram variações que fossem indício de defeito.



(a) Assimetria e variância

(b) Curtose e momento de sexta ordem

Figura 6.6 – Parâmetros estatísticos para rolamento que não apresentaram defeito durante o ensaio.

Método da energia Residual

No decorrer dos ensaios, o método da energia residual manteve sua tendência semelhante à obtida pelos parâmetros RMS, valor de pico e fator K. Foi observada uma tendência de elevação nos parâmetros no décimo terceiro dia de ensaio. Como estava prevista uma parada para inspeção no décimo quinto dia o rolamento foi desmontado e não foi observada nenhuma falha

nos seus componentes. Também, após a parada do trigésimo quinto dia de ensaio, houve uma tendência de elevação de valores, que logo em seguida, voltou à normalidade (Figura 6.7).

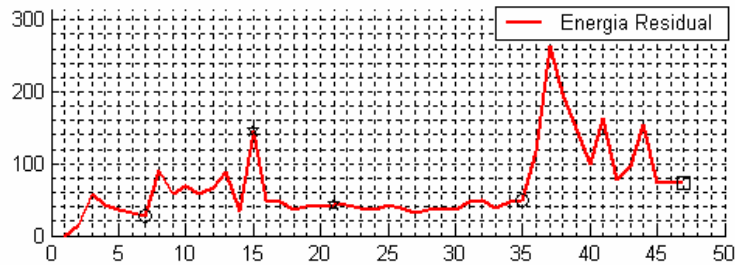
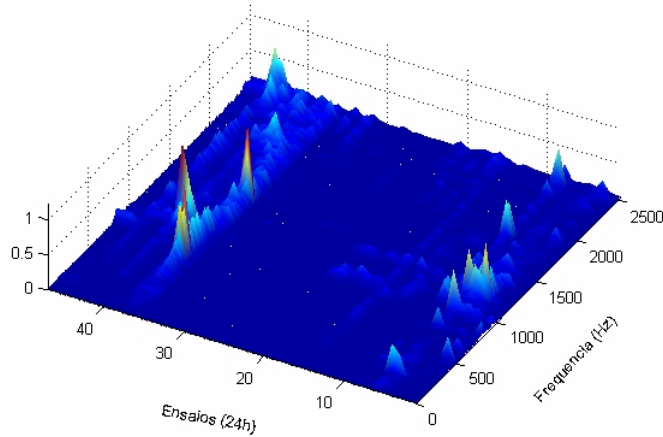


Figura 6.7 – Energia residual de um rolamento sem defeito.

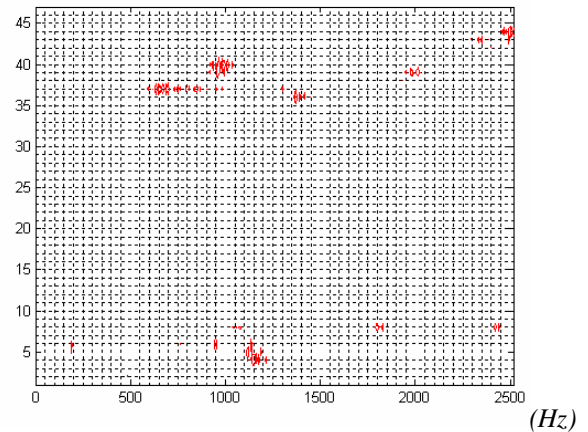
Envelope

Durante o período de ensaio, todos os dias eram obtidos o envelope para os doze rolamentos, gerando para cada rolamento, uma média de quarenta e sete gráficos de envelope ao final dos ensaios. Com o objetivo de condensar os dados, optou-se pela apresentação em um gráfico tridimensional dos envelopes obtidos para cada rolamento; as coordenadas deste gráfico são: ensaio, frequência e amplitude. Além disso, foram gerados gráficos de curvas de nível, cujas coordenadas são: dias de ensaio e frequência. Para todas as curvas de níveis dos rolamentos, foram adotados os mesmos valores de corte, com o objetivo de facilitar a comparação dos resultados obtidos para diferentes grupos de rolamentos.

Continuando a análise deste grupo de rolamentos, tem-se na Figura 6.8, o gráfico obtido com a técnica de Envelope, com uso de filtro adaptativo, aplicada a um representante do grupo. Observando-se os gráficos, vêem-se alguns picos correspondentes ao período de amaciamento do rolamento e ao trigésimo quinto dia de ensaio, onde ocorreu uma parada mais longa da bancada. Foi observado que estas elevações não correspondiam a nenhuma frequência de falha do rolamento.



(a) Representação dos envelopes obtidos



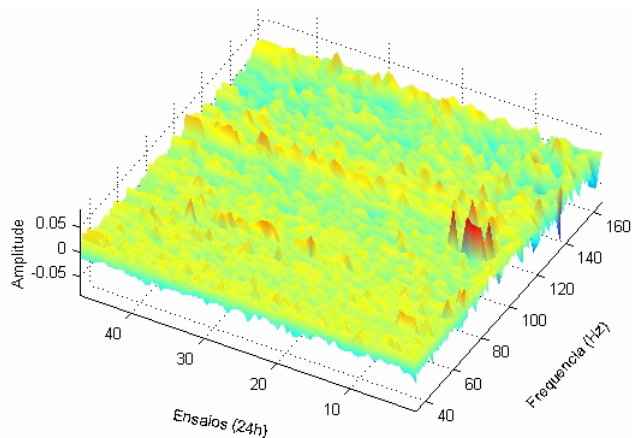
(b) Curva de nível do gráfico de envelope

Figura 6.8 – Envelope do rolamento sem defeito

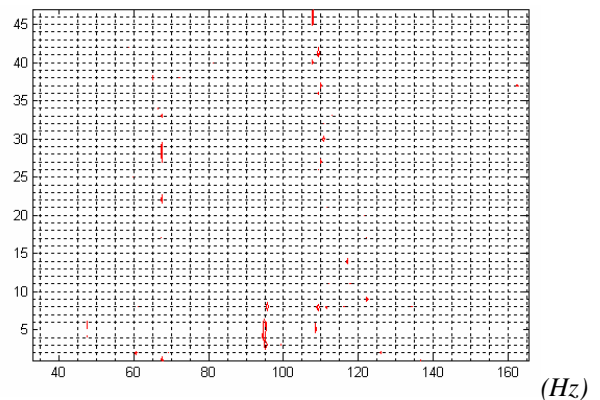
Cepstrum

Os mesmos procedimentos adotados para apresentação do envelope, foram adotados para o cepstrum, ou seja, representação tridimensional dos resultados obtidos para os dias de ensaios e apresentação dos picos preponderantes em um gráfico de curva de nível.

Observando-se a Figura 6.9 (a), vê-se uma elevação entre o quarto e sexto dia de ensaios, após análise mais detalhada, desta região, verificou-se que estes valores não têm relação com as frequências de defeito do rolamento.



(a) Cepstrum do rolamento durante os dias de ensaio



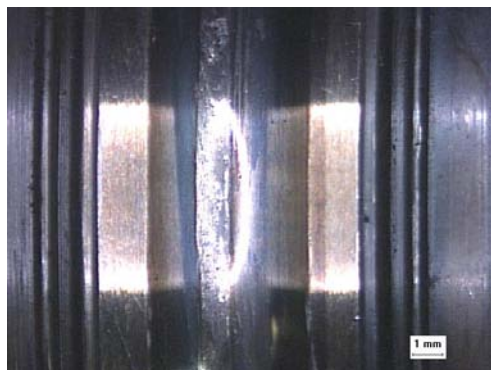
(b) Curva de nível do cepstrum

Figura 6.9 – Cepstrum do rolamento sem defeito

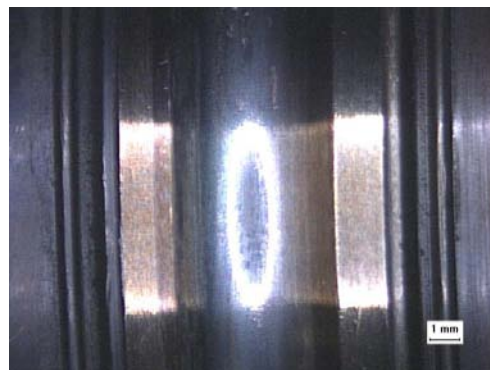
6.3.2 Rolamentos que Apresentaram Endentações na Pista Interna

Aspectos Físicos

Este grupo é composto de quatro rolamentos que apresentaram desgaste excessivo na pista interna com endentações ao final do ensaio; isso gerou uma elevação na temperatura, que foi observada pelo monitoramento da mesma, devido ao atrito das esferas com esta superfície, causando fundição da gaiola do rolamento. Na Figura 6.10 (a) e (b) são apresentadas a pista interna na região de carga máxima e de carga mínima, respectivamente, de um rolamento representante do grupo.



(a) lado de aplicação de carga



(b) lado onde a carga é mínima

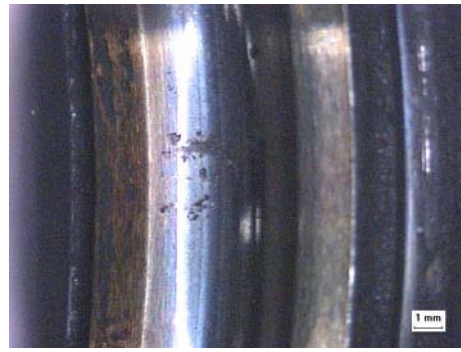
Figura 6.10 – Pista interna de um rolamento com endentações

A Figura 6.11 apresenta as pistas interna e externa do rolamento após a fundição da gaiola. Observa-se que, com a fundição, grande parte da pista interna é impregnada com o material da gaiola que sofreu fusão, enquanto que, na pista externa é observada a presença somente de algumas partículas deste material.

Em alguns casos, a pista interna e esferas ficam totalmente cobertas pelo material proveniente da fusão de parte da gaiola. Na Figura 6.12 (a) e (b) são mostradas uma esfera e um pedaço da gaiola.



(a) Pista interna com impregnação de material da gaiola



(b) Pista externa com impregnação de material da gaiola

Figura 6.11 – Pista interna e externa de após impregnação de material de fusão da gaiola



(a) Esfera com impregnação de material

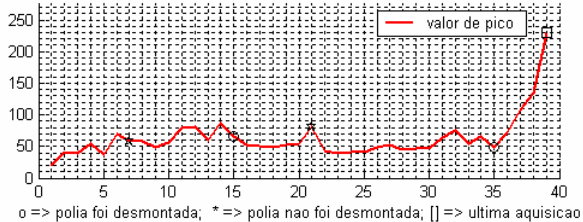
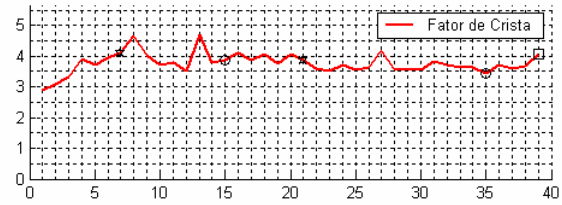
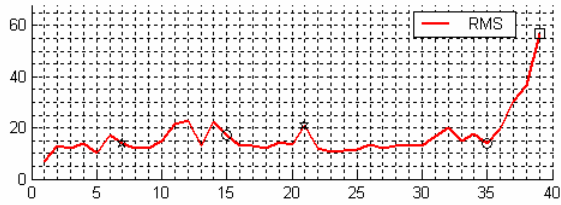


(b) Gaiola após a fusão de parte da gaiola

Figura 6.12 – Esfera e gaiola do rolamento após fusão da gaiola.

Parâmetros Estatísticos obtidos

Como se observa na Figura 6.13, o único parâmetro que não indica uma tendência de crescimento com o avanço da falha no rolamento, é o fator de crista; os demais parâmetros possibilitaram verificar o surgimento de uma falha no rolamento com início no trigésimo quinto dia até o trigésimo nono dia de ensaio. Como a falha em questão é um desgaste na pista, a mesma trata-se de um sinal ruidoso e como foi visto no capítulo anterior, o fator de crista tende a diminuir ou manter-se inalterado à medida que a falha torna-se acentuada.

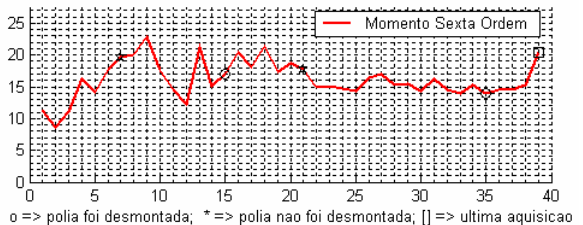
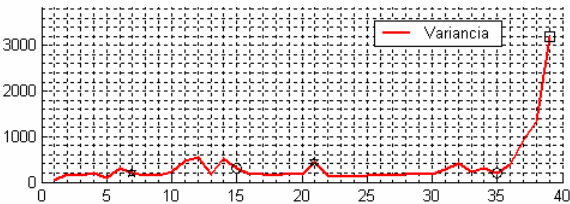
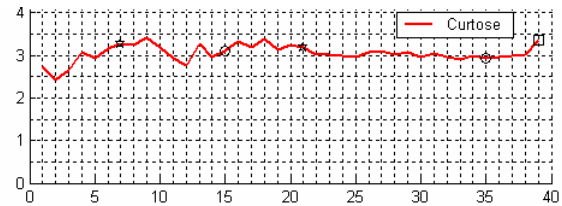
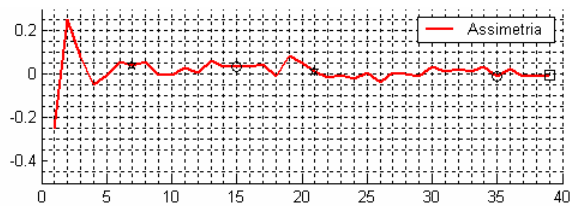


(a) RMS e valor de pico

(b) fator de crista e fator K

Figura 6.13 – Parâmetros estatísticos para rolamento que ocorreu fusão da gaiola.

Dos parâmetros mostrados na Figura 6.14, o único que mostrou uma tendência de crescimento foi a variância. A curtose e o momento de sexta ordem só tiveram um aumento quando o rolamento estava a um dia da ruptura da gaiola.



(a) Assimetria e variância

(b) Curtose e momento de sexta ordem

Figura 6.14 – Parâmetros estatísticos para rolamento que não apresentaram defeito durante o ensaio.

Método da energia Residual

A técnica da energia residual mostrou-se um bom método para detecção deste tipo de falha. A tendência de crescimento foi semelhante à obtida pela variância. A partir da Figura 6.15, pode-se observar que o início da falha foi constatado no trigésimo sétimo dia de ensaio.

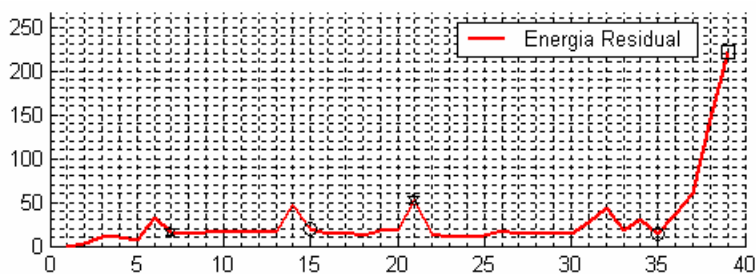
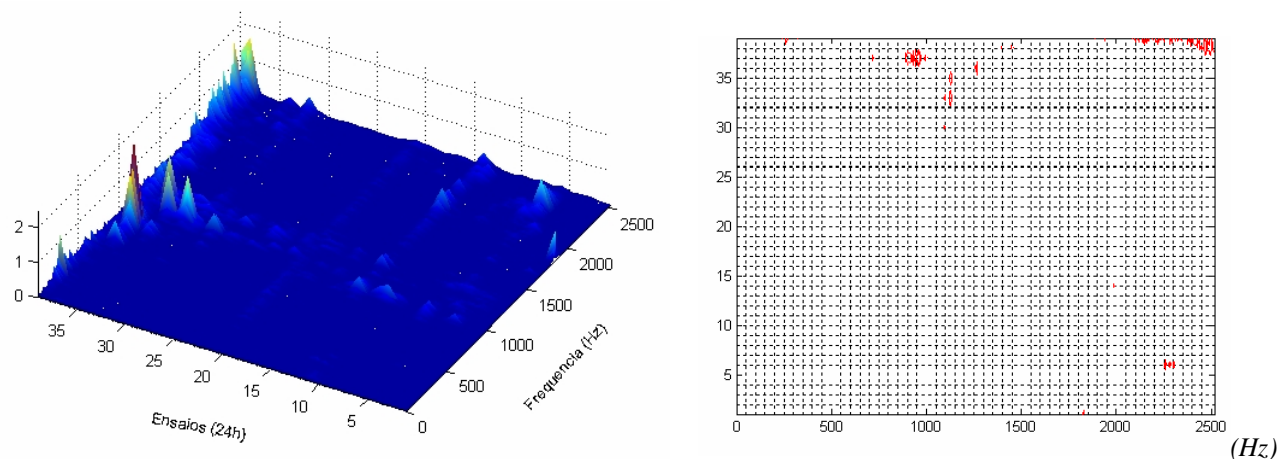


Figura 6.15 – Energia residual de um rolamento com endentação na pista interna.

Envelope

A Figura 6.16 representa os envelopes obtidos durante o período de ensaio desse grupo. Pode-se observar que o envelope não conseguiu detectar o surgimento do desgaste excessivo de forma satisfatória, pois apresentou uma alteração considerável somente nos dois últimos dias anteriores ao colapso do rolamento.



(a) Representação dos envelopes obtidos

(b) Curva de nível do gráfico de envelope

Figura 6.16 – Envelope de um rolamento que apresenta de desgaste com endentações.

Ao observar a FFT do sinal próximo ao dia da falha do rolamento pode-se verificar um afastamento considerável entre as curvas do segundo e trigésimo nono dia de ensaio (Figura 6.17).

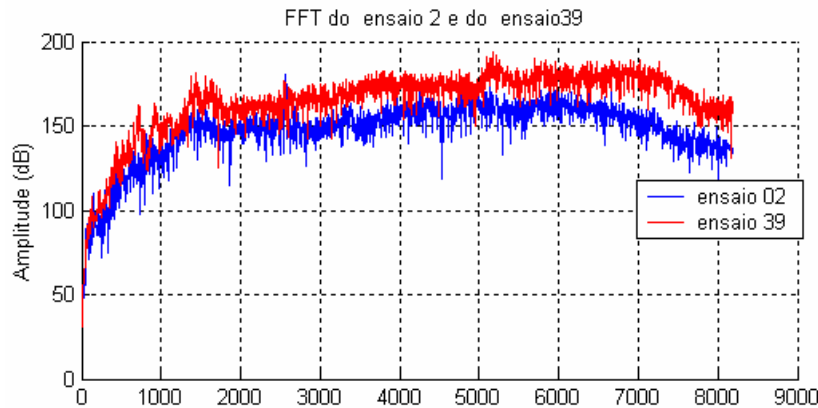
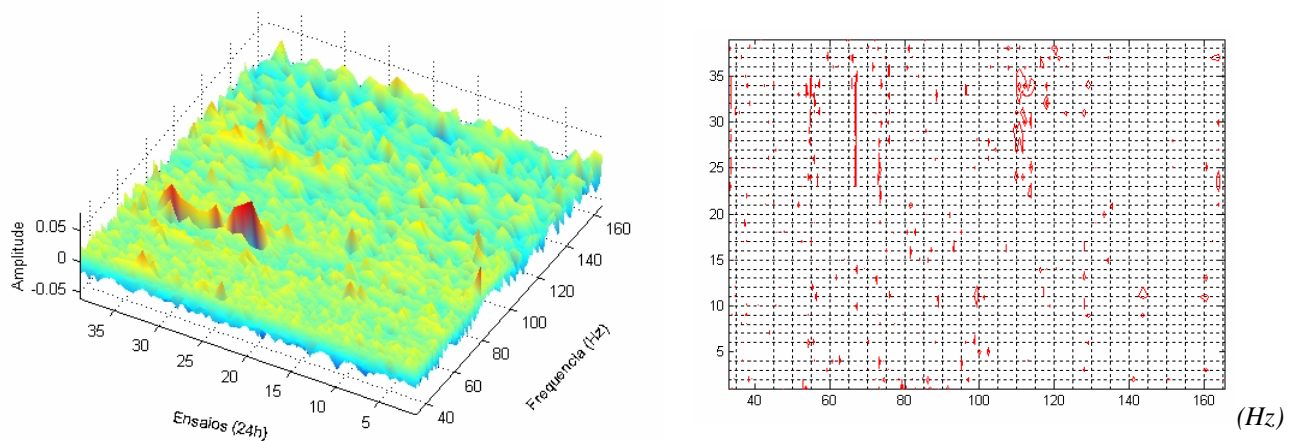


Figura 6.17 – FFT dos do segundo e trigésimo nono dia de ensaio

Cepstrum

Os valores obtidos para o cepstrum, apresentados na Figura 6.18, mostram o surgimento de uma excitação na freqüência de gaiola a partir do vigésimo terceiro dia de ensaio, o que é indício de alguma falha na gaiola ou esfera. Como o envelope vinha sendo observado diariamente e não foi visto nenhum indício de falha na esfera, logo se concluiu que, a gaiola apresentava alguma irregularidade, como foi constatado no capítulo anterior, através de falha induzida na gaiola. Esta excitação se propagou até o surgimento do processo de fundição da gaiola que acarretou o colapso do rolamento (Figura 6.12).



(a) Cepstrum do rolamento durante os dias de ensaio

(b) Curva de nível do cepstrum

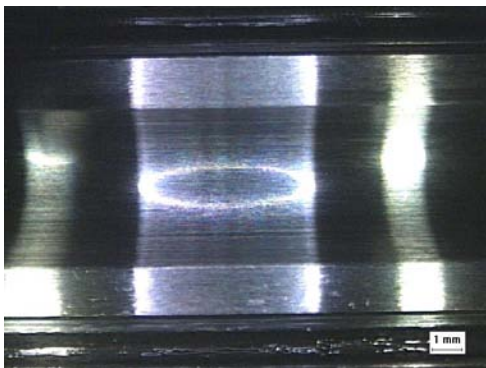
Figura 6.18 – Cepstrum de um rolamento que apresenta de desgaste com endentações.

6.3.3 Rolamentos que Apresentaram Falhas na Pista Interna - Amassamento

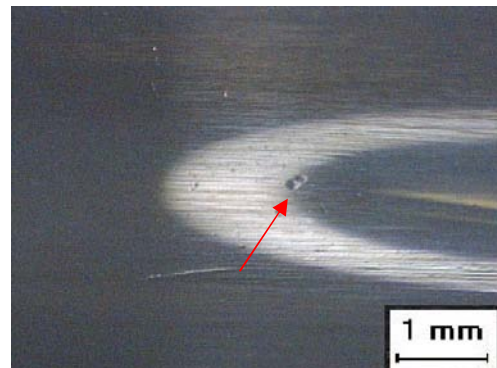
Aspectos Físicos

No início do ensaio desse rolamento, foi detectado, pela técnica de envelope um pico próximo à frequência de falha da pista interna. Desta forma, optou-se por desmontar o rolamento para inspecioná-lo. Através da inspeção visual não foi verificada nenhuma falha (Figura 6.19 (a)). Em seguida, foi feita uma verificação, através de microscópio, em toda superfície da pista interna, onde se constatou um ponto de amassamento na superfície da pista (Figura 6.19 (b)).

A desmontagem ocorreu no sétimo dia de ensaio, quando então ele foi recolocado na bancada. No décimo quinto dia de ensaio, este rolamento foi desmontado novamente, sendo observado que a pista sofreu um processo de desgaste normal. Como o amassamento era pequeno, o desgaste na pista foi igual ou superior a profundidade do amassamento, o que causou o seu desaparecimento.



(a) Região de amassamento sem aumento



(b) Amassamento com partícula banda

Figura 6.19 – Pista interna de um rolamento com um ponto de amassamento.

Ao longo do ensaio a pista interna do rolamento sofreu desgaste severo com descascamento, e sua pista externa apresentou uma marca de rodagem significativa, como pode ser visto na Figura 6.20 (a) e (b).



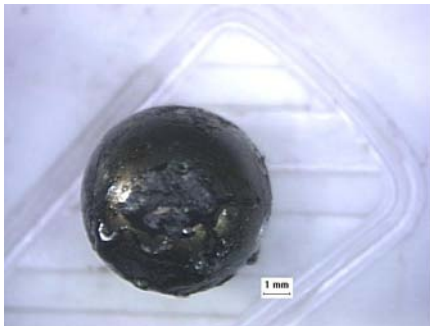
(a) Desgaste na pista interna com presença de endentações



(b) Pista Externa com marca significativa de desgaste

Figura 6.20 – Pista interna de um rolamento com descascamento.

Como foi visto para o grupo anterior, o desgaste severo com endentações leva ao aquecimento do rolamento, culminando com a fusão da gaiola (Figura 6.21).



(a) Esfera com impregnação de material



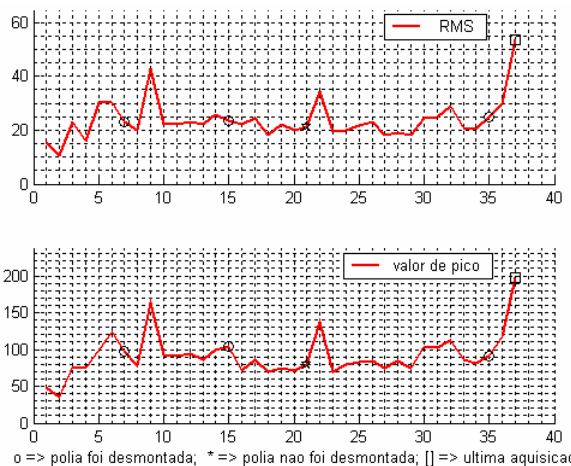
(b) Gaiola após a fusão de parte da gaiola

Figura 6.21 –Esfera e gaiola de um rolamento após fusão de parte da gaiola.

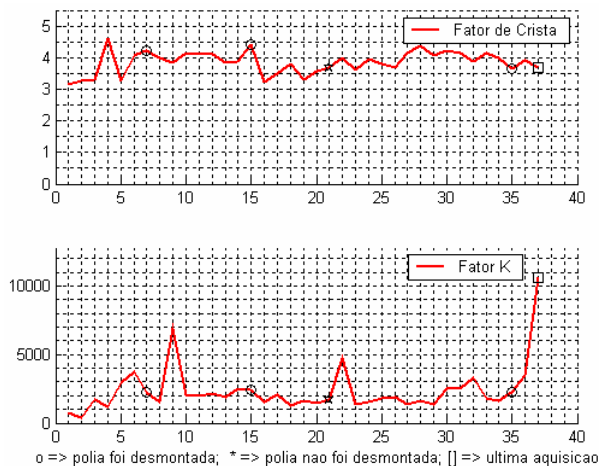
Parâmetros Estatísticos obtidos

Devido à baixa energia do amassamento, o mesmo não pode ser detectado pelo RMS, valor de pico, fator de crista e fator K (Figura 6.22). As variações ocorridas próximas ao dia da falha foram causadas pela mudança de velocidade e o desgaste inicial do rolamento. Os parâmetros

apresentaram um crescimento, repentino, a partir do trigésimo quinto dia de ensaio, o que poderia levar a uma conclusão errônea, ou seja, que teria sido ocasionado pela desmontagem do rolamento. Porém, verificou-se que se tratava de um defeito porque antes de ocorrer à atenuação, a gaiola do rolamento quebrou e parte da gaiola fundiu.



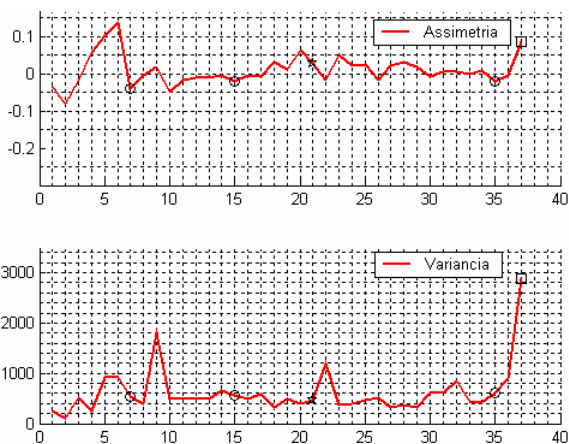
(a) RMS e valor de pico.



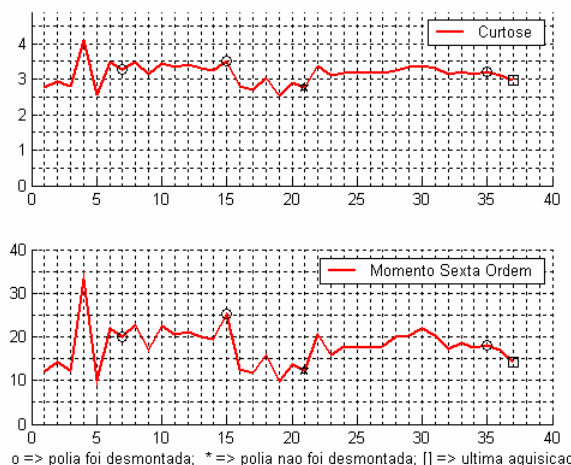
(b) fator de crista e fator K.

Figura 6.22 – Parâmetros estatísticos de um rolamento com amassamento na pista interna

A partir da Figura 6.23 pode ser verificado que a curtose e o momento de sexta ordem não sofreram elevações e sim atenuações, o que demonstra indício de alguma falha no rolamento. Já a assimetria e variância tiveram uma elevação significativa, o que confirma a presença do defeito.



(a) Assimetria e variância



(b) Curtose e momento de sexta ordem

Figura 6.23 – Parâmetros estatísticos de um rolamento com amassamento na pista interna e desgaste com endentação.

Método da energia Residual

A energia residual tem comportamento semelhante à obtida para os rolamentos que apresentam desgaste severo com endentações (Figura 6.24).

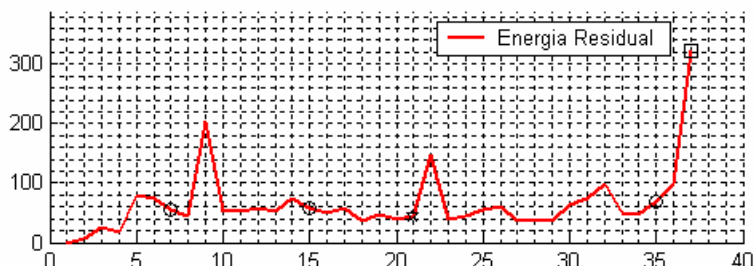
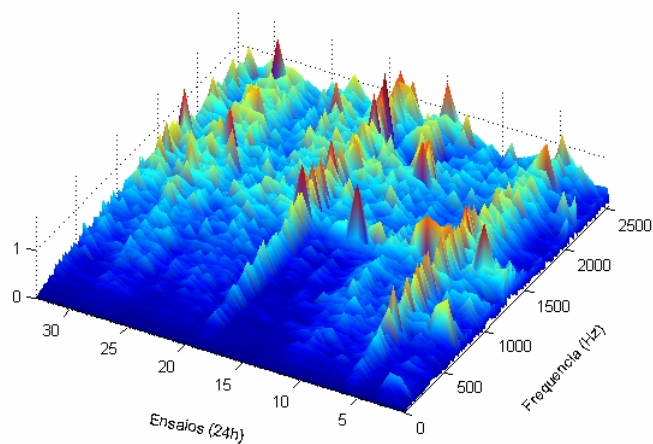


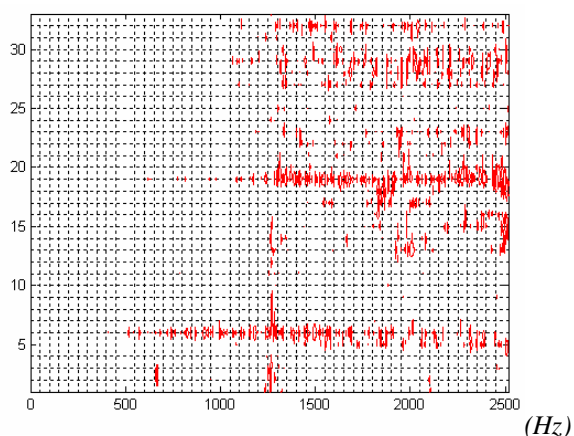
Figura 6.24 – Energia residual de um rolamento de um rolamento com amassamento na pista interna e desgaste com endentações.

Envelope

Observando-se a Figura 6.25, constatou-se que do segundo até o quarto dia de ensaio o envelope apresentou um pico, bem definido, com valor próximo à frequência de defeito na pista interna. Com o objetivo de uma melhor visualização desse pico, foi obtido o envelope do quarto dia de ensaio (Figura 6.26), onde está destacado seu valor de frequência.



(a) Representação dos envelopes obtidos



(b) Curva de nível do gráfico de envelope

Figura 6.25 – Envelope de um rolamento de um rolamento de um rolamento com amassamento na pista interna e desgaste com endentações.

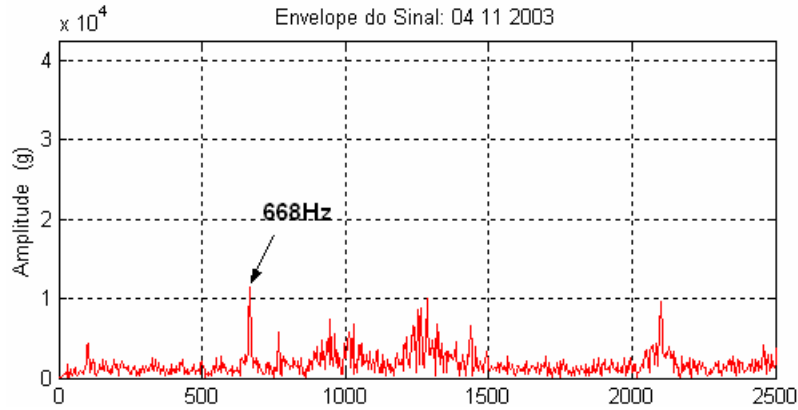
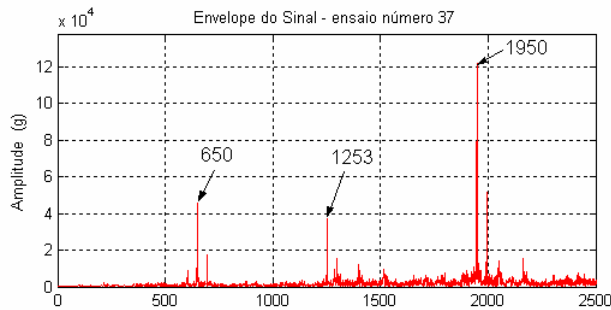
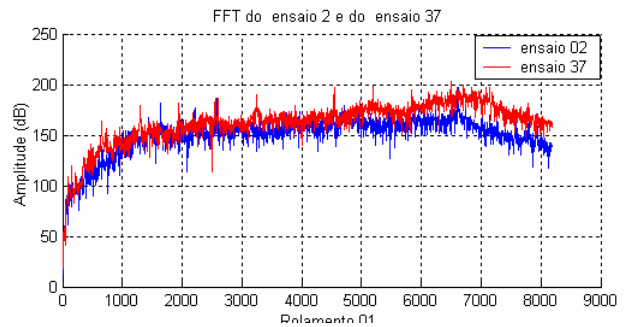


Figura 6.26 – Envelope do rolamento com amassamento

Próximo ao dia de falha do rolamento, foram obtidos o envelope (Figura 6.27(a)) e a FFT do segundo e trigésimo sétimo dia de ensaio (Figura 6.27(b)). Analisando-se os gráficos obtidos, verifica-se o indício de defeito severo na pista interna, acompanhado de desgaste.



(a) Envelope do ensaio 37

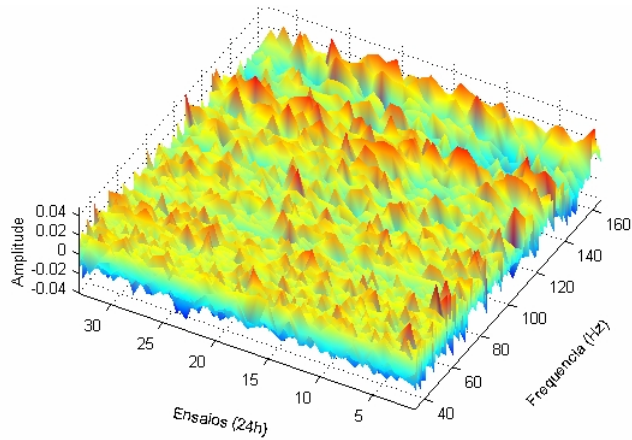


(b) FFT dos ensaios 2 e 37

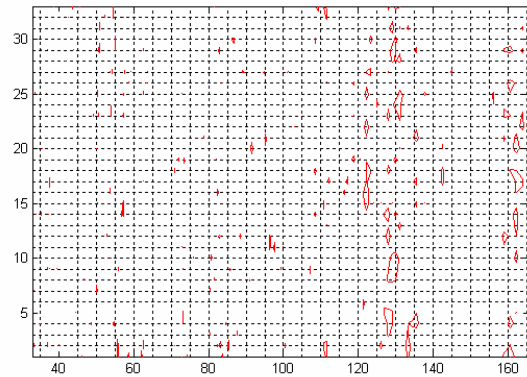
Figura 6.27 - Envelope e FFT do sinal próximo à falha do rolamento

Cepstrum

Não houve possibilidade de detectar a falha do rolamento a partir da observação do cepstrum, como nos casos anteriores; o que demonstra que esta falha ocorreu de forma repentina, não havendo a excitação da gaiola e quebra da mesma (Figura 6.28).



(a) Cepstrum do rol. durante os dias de ensaio



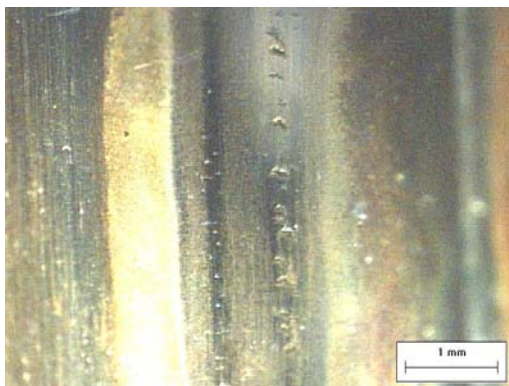
(b) Curva de nível do cepstrum

Figura 6.28 – Cepstrum de um rolamento de com amassamento na pista interna e desgaste com endentação.

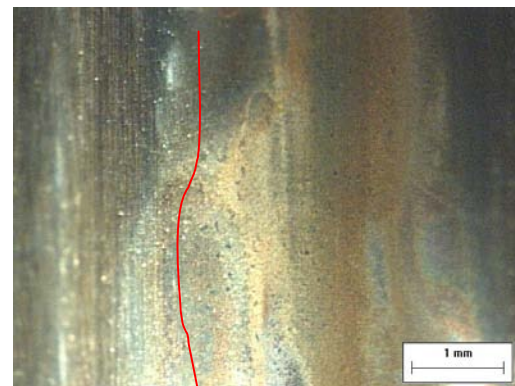
6.3.4 Rolamentos que Apresentaram Falhas Incipientes na Pista Interna: “Pit”

Aspectos Físicos

A Figura 6.29 representa um rolamento que apresentou falha de descascamento. Na Figura 6.29 (a), está mostrado o descascamento e o caminho que a esfera percorre, após a quebra da gaiola e antes de ocorrer a fusão da mesma. Logo após a região de descascamento, observou-se uma mudança de caminho das esferas (Figura 6.29 (b)).



(a) lado de aplicação de carga



(b) lado onde a carga é mínima

Figura 6.29 – Pista interna de um rolamento com descascamento e mudança de trajetória da esfera

A Figura 6.30 (a) e (b) mostram a esfera e gaiola após a quebra do rolamento, ocorrida no trigésimo oitavo dia de ensaio.



(a) Pista externa com desgaste normal

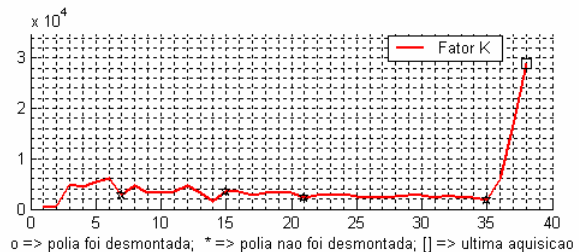
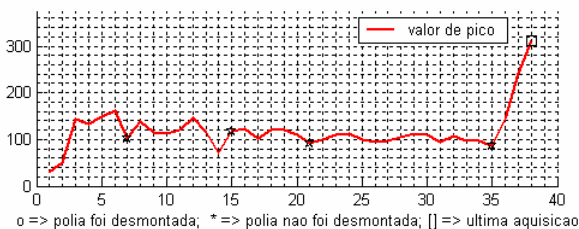
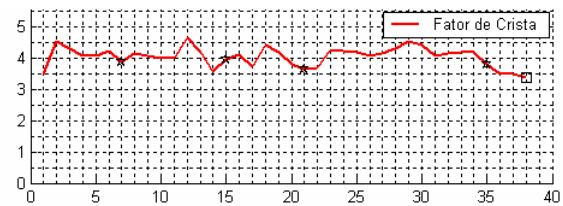
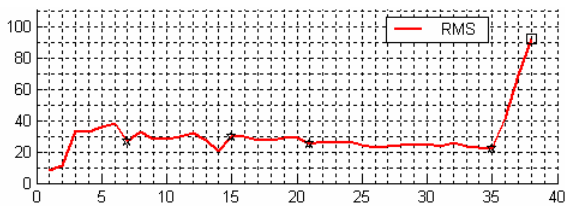


(b) Esfera e gaiola com desgaste normal

Figura 6.30 – Esfera e gaiola de um rolamento após fusão de parte da gaiola.

Parâmetros Estáticos obtidos

Como se pode observar na Figura 6.31, não foi possível identificar o tipo de falha que ocorre no rolamento, porém, verifica-se que os parâmetros, RMS, valor de pico e fator K sofrem uma elevação a partir do trigésimo quinto dia de ensaio, enquanto o fator de crista tem uma atenuação, indicando que o crescimento do RMS foi mais significativo que o crescimento do pico máximo do sinal.



(a) RMS e valor de pico

(b) fator de crista e fator K

Figura 6.31 – Parâmetros estatísticos para rolamento com amassamento na pista interna.

Pode-se observar que a curtose e o momento de sexta ordem, do sinal do rolamento, sofrem atenuações significativas nos três últimos dias de ensaio, enquanto a variância mantém uma tendência de crescimento (Figura 6.32).

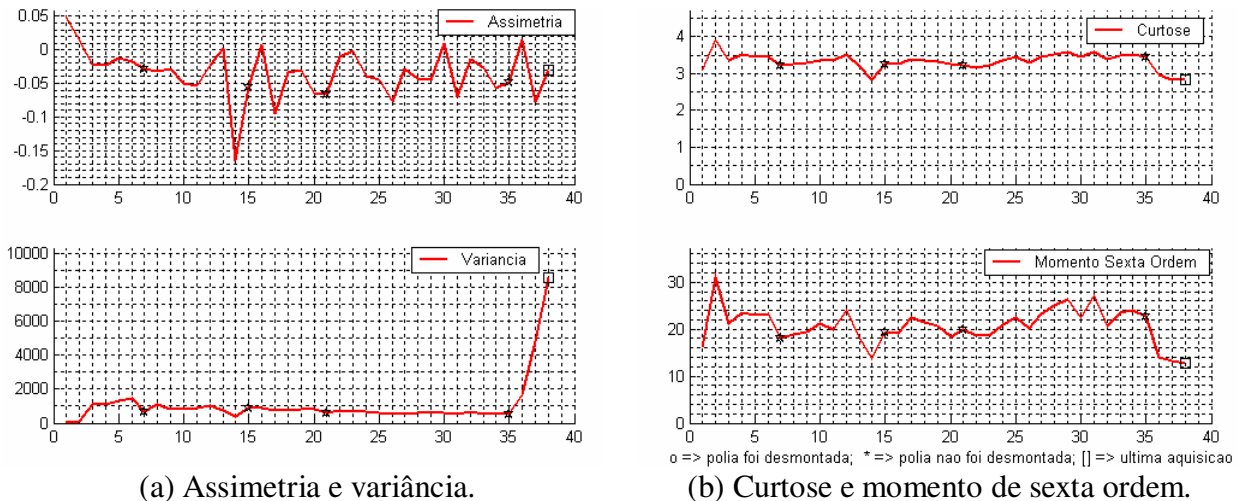


Figura 6.32 – Parâmetros estatísticos para rolamento que não apresentaram defeito durante o ensaio.

Método da energia Residual

O método da energia residual manteve uma tendência de crescimento, durante o período em que foi detectada a falha, até a retirada do rolamento devido ao colapso do mesmo (Figura 6.33).

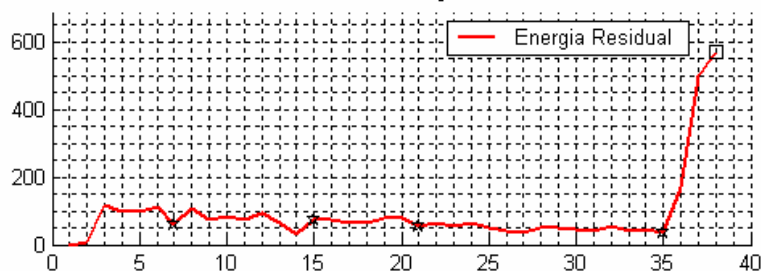


Figura 6.33 – Energia residual de um rolamento com defeito na pista interna.

Envelope

Observa-se que a partir do trigésimo sexto dia de ensaio há o surgimento de pico com frequência próxima à região de falha da pista interna do rolamento (Figura 6.34). O que pode ser mostrado pelo envelope do trigésimo sexto dia de ensaio, onde são observadas a frequência de

defeito na pista interna 656Hz e suas múltiplas 1312Hz e 1968Hz (Figura 6.35(a)). Em seguida, ocorre a quebra da gaiola, com isso as esferas passam por uma nova trajetória não passando mais pelos picos de falha da pista interna (Figura 6.29). A falha da gaiola foi detectada pelo envelope (Figura 6.35(b)).

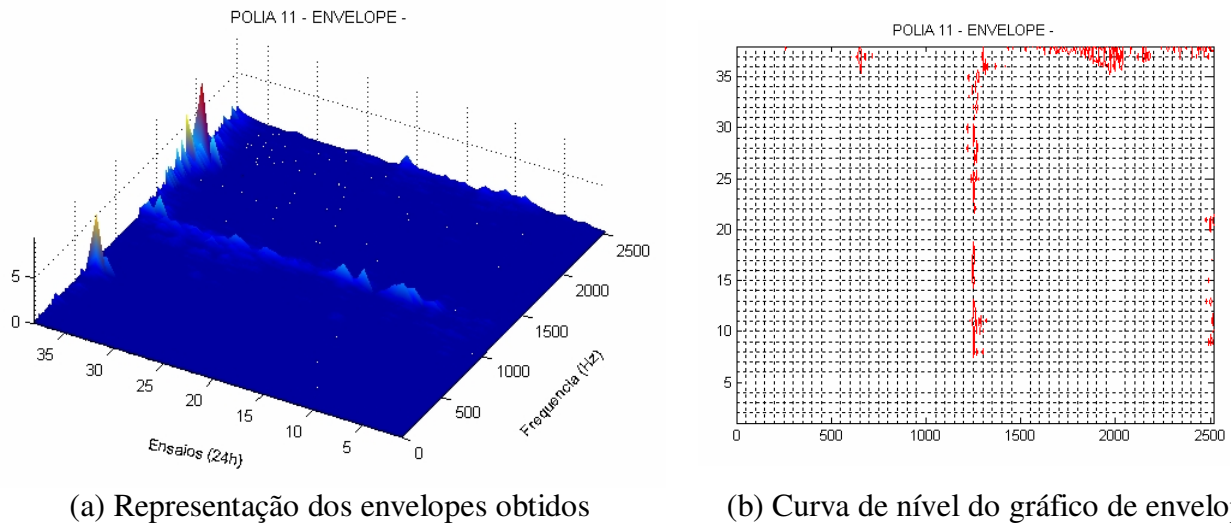


Figura 6.34 – Envelope de um rolamento com defeito na pista interna seguido de quebra da gaiola

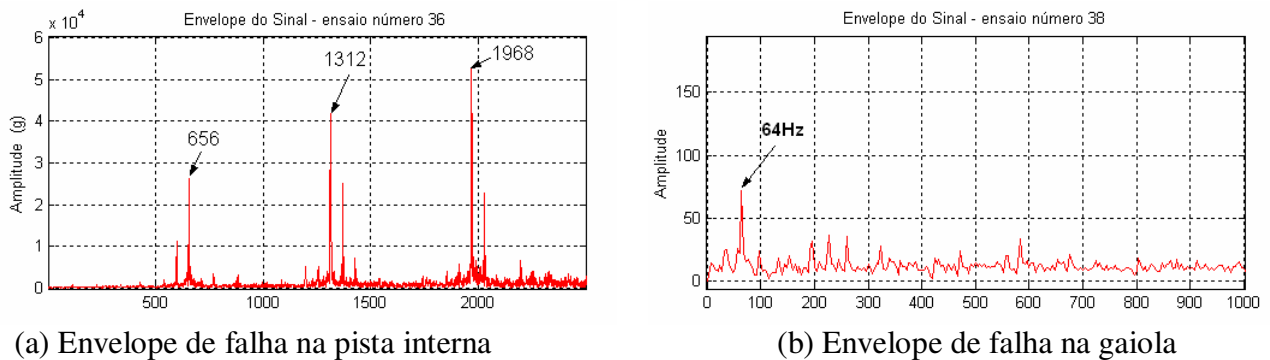
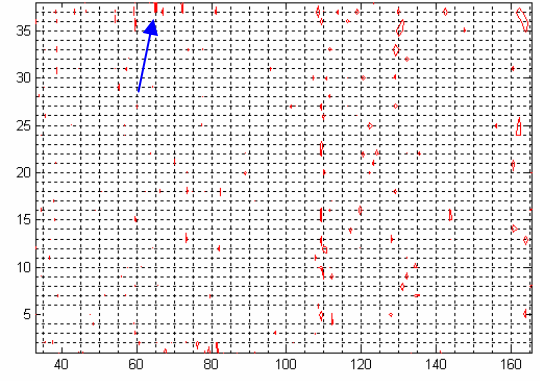
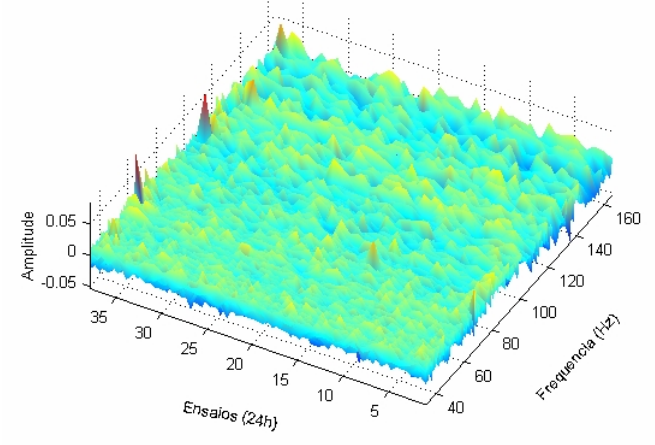


Figura 6.35 - Envelope de rolamento com defeito na pista interna e gaiola.

Cepstrum

Observando-se o gráfico dos cepstrums obtidos durante o período de ensaio, verifica-se o surgimento de um pico no trigésimo sétimo dia com frequência de falha da gaiola (Figura 6.36). O que foi comprovada após a retirada do rolamento da bancada e feita sua inspeção (Figura 6.29).



(a) Cepstrum do rolamento durante os dias de ensaio

(b) Curva de nível do cepstrum

Figura 6.36 – Cepstrum de um rolamento com defeito na pista interna seguido de quebra da gaiola

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

7.1 Conclusão

Neste trabalho foi feito um estudo comparativo entre diversas técnicas de detecção de falhas em rolamento utilizando o sinal vibratório. Das técnicas utilizadas, algumas eram baseadas no domínio do tempo e outras no domínio da frequência e cepstrum.

Inicialmente, as técnicas foram implementadas no ambiente MATLAB e aplicadas a um conjunto de modelos matemáticos que possibilitavam simular falhas nas pistas interna e externa, e esfera. Além disso, foi possível simular diferentes níveis de ruído aos sinais de falhas que estavam correlacionados de forma direta com os tamanhos das falhas. A partir dos resultados obtidos, comprovou-se que as técnicas e os modelos estavam de acordo com o exposto na literatura.

Em um segundo momento, foi feito um estudo comparativo das técnicas, aplicando-as a um conjunto de rolamentos com falhas induzidas, onde o principal objetivo era verificar a sensibilidade destas técnicas na identificação de falhas em rolamentos com diferentes tamanhos e submetidos a diferentes velocidades. Nesta etapa, foram apresentados os resultados obtidos para os parâmetros estatísticos para falhas de diferentes tamanhos quando submetidas a diferentes

velocidades. Para técnica de envelope e cepstrum foram apresentados somente os resultados obtidos para uma velocidade, pois, constatou-se que as variações de velocidade e do tamanho da falhas não tinham influência significativa nos resultados.

Por último, doze rolamentos foram submetidos a um ensaio de longa duração cujo objetivo era verificar o surgimento das falhas e a sensibilidade das diversas técnicas em sua identificação. Diariamente, eram feitas aquisições dos sinais de aceleração dos rolamentos e, em seguida, eram aplicadas diversas técnicas aos sinais. Na etapa anterior, os resultados obtidos mostraram que a técnica de envelope com filtro adaptativo possibilitava a obtenção de melhores resultados, desta forma optou-se por sua utilização nesta etapa.

Finalmente, podem-se resumir os resultados obtidos em duas etapas, onde, na primeira, serão apresentados os resultados para falhas induzidas e, em seguida, os resultados obtidos para o ensaio de longa duração:

Ensaio de rolamentos com falhas induzidas:

- Das técnicas que utilizam parâmetros estatísticos o RMS, o pico máximo, o fator K, a média e a variância mostraram comportamento semelhantes para todos os tipos de falhas induzidas utilizadas. Apresentaram tendência de crescimento à medida que a velocidade e o tamanho das falhas aumentavam.
- O fator de crista apresentou um comportamento semelhante para todas as falhas utilizadas no ensaio. A tendência de decréscimo foi observada à medida que a velocidade aumentava, por outro lado, para o aumento da falha, não houve uma tendência definida.
- A curtose e o momento de sexta ordem tiveram comportamentos semelhantes. Mostraram-se mais sensíveis ao tamanho da falha para baixas velocidades e a tendência de não indicar a presença de defeito à medida que a velocidade aumenta.
- A assimetria teve um comportamento aleatório em todos os casos, o que impossibilitou a detecção das falhas.
- O método da energia residual teve um comportamento semelhante para todos os defeitos utilizados. Em todos os casos, foram observados tendências de crescimento com o aumento da velocidade e do tamanho da falha.

- Vale ressaltar que os métodos anteriores são qualitativos, ou seja, indicam a presença da falha, mas não possibilitam verificar onde ela ocorreu.
- A aplicação da técnica de envelope possibilitou identificar o tipo da falha, presente nos rolamentos. Além disso, observou-se que a utilização do filtro adaptativo trouxe uma melhora significativa à técnica de envelope, possibilitando identificar a falha na gaiola.
- O cepstrum conseguiu identificar a maioria das falhas presentes nos rolamentos, apresentando uma maior dificuldade na detecção da falha na gaiola.

Ensaios de longa duração:

- Das técnicas que utilizam parâmetros estatísticos o RMS, o pico máximo, o fator K, a média e a variância mostraram comportamento semelhantes.
- A desmontagem dos rolamentos influencia os parâmetros estatísticos, elevando o seu valor de forma significativa, por um período curto de tempo.
- A técnica de envelope com filtro adaptativo conseguiu identificar todas as falhas surgidas durante o ensaio. Identificando, inclusive o amassamento e a quebra da gaiola, que são difíceis de serem detectados pelo envelope sem filtro adaptativo.
- O desgaste excessivo do rolamento pode ser identificado pela FFT do sinal.
- O cepstrum possibilitou verificar a excitação da gaiola antes de sua ruptura. Porém, não conseguiu detectar o surgimento de “pit” e amassamento, facilmente identificados pela técnica de envelope com filtro adaptativo.

7.2 Sugestões para futuros trabalhos

- Fazer um estudo comparativo dos parâmetros estatísticos para diferentes níveis de carregamento.
- Verificar a eficiência das técnicas apresentadas em diferentes tipos de rolamentos.
- Fazer um estudo sobre a influência da faixa de filtragem, da taxa de amostragem na técnica de envelope com uso do filtro adaptativo.

- Aplicar da técnica de envelope com filtro adaptativo em campo para verificar a sua eficácia.

Bibliografia

Almeida, R. G. T., Vicente, S. A. S., Padovese, L. R., *New Technique for Evaluation of Global Vibration Levels in Rolling Bearing* COBEM 2001, *Vibration and Sound*, Vol. 10 pp. 241 – 248, 2001.

Altmann, J., Mathew, J., *Multiple Band-pass Autoregressive Demodulation for Rolling-Element Bearing Fault Diagnosis*, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 15(5) pp. 963-977, 2001.

Antoni, J. Randall, R. B., *Unsupervised Noise Cancellation for Vibration Signals: Part I – Evaluation of Adaptive Algorithms*, *Mechanical Systems and Signal Processing*, pp. 1-13, 2003.

Antoni, J. Randall, R. B., *Unsupervised Noise Cancellation for Vibration Signals: Part II – Evaluation of Adaptive Algorithms*, *Mechanical Systems and Signal Processing*, pp. 1-13, 2003.

Barkov, A., Barkova, N., *Condition Assessment Life Prediction of Rolling Element Bearing – Part I*, Sound and Vibration/ June, pp. 10-17, 1995.

Bendat, J. S., Piersol, A. G., *Random Data Analysis and Measurement Procedures*, 2ed, New York, John Wiley & Sons, U.S.A., 1986.

Bolaers, F., Cousinard, O. Marconnet. P., and Rasolofondraibe, L., *Advanced Detection of Rolling Bearing Spalling From de-noising Vibration Signals*, Control Engineering Practice, Vol.8, pp. 01-10, 2003.

Braun, S., *Mechanical Signature Analysis Theory and Application*, London, Academic Press, England, 1986, Cap. 7, Vibration Monitoring, pp. 173-215.

Braun, S. and Datner, B., *Analysis of Roller / Ball Bearing*, Journal of Mechanical Design, Vol.101, pp. 118–125 ,1979.

Brüel&Kjaer, *GETTING STARTED, An Introduction to PULSE Software*, Denmark:

Chagsen, Wan, *Analysis Rolling Element Bearings*, London, Mechanical Engineering Publication, England. 1987, 410p.

Chan Y. T., *Wavelet Basics*, Kluwer Academic Publishers 1996.

Brie D., *Modeling of the Spalled Rolling Element Bearing Vibration Signal: an Overview and Some New Results*, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol.14(3), pp. 353-369, 2000.

Costa, P. L. O. *Estatística*, São Paulo, Editora Edgard Blücher, Brasil, 1977, Cap 2, Estatística Descritiva, pp. 20-32.

Courrech, Joëlle Gaudet, Mark, *Envelope Analysis- The Key to Rolling-element Bearing Diagnosis*, Bruel&kjaer, BO 0187-11

Courrech, Joëlle, *Envelope Analysis for Effective Rolling-Element Fault Detection – Fact or Fiction?*, UPTIME Magazine, Vol.8(1), 2000.

Dimaragonas, A., *Vibration For Engineers*, 2 ed., New Jersey, Prentice Hall, U.S.A., 1995, Cap. 15, Machinery Vibration: Monitoring and Diagnosis, pp. 758.

Dyer D. e Stewart R., *Detection of Rolling Element Bearing Damage by Statistical Vibration Analysis*, ASME, Journal of Mechanical Design, Vol. 100(2), April, pp. 229-235, 1978.

Eschman, P., Hasbargen, L. Weigan, K., *Ball and Roller Bearings: Theory, Design and Application*, Second Edition, New York, John Wiley and Sons, USA, 1985, 490p.

Etter, Delores M., *Engineering Problem Solving With Matlab*, Second Edition, New Jersey, Prentice Hall, U.S.A., 1987. Cap 10, Signal Processing, pp. 241-277.

FAG, *Danificações em Rolamentos*. Publ. Nr. WL 82 102 PB. Printed in Fed. Rep. of Germany, 1991.

Graps, A. *An Introduction to Wavelets*. IEEE Computational Science & Engineering, pp.50-61, 1995.

Harris, T. A., *Rolling Bearing Analysis*, 3ed, New York, John Wiley & Sons, USA, 1991, 991p.

Haykin, S., Veen, B. V. *Sinais e Sistemas*, Porto Alegre, Editora Bookman, Brasil, 2001, 668p.

Hanselman, D., Littlefield, B. *Matlab 6 Curso Completo*, Tradução: Martins, C. S., São Paulo Pearson Prentice Hall, Brasil, 2004, 676p.

Haykin, S., *An Introduction to Analog and Digital Communication*, New York, John Wiley & Sons, U.S.A., 1989, 652p.

- Ho, D. and Randall, R. B., *Optimization of Bearing Diagnostic Techniques Using Simulated and Actual Bearing Fault Signal*, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 14(5), pp. 763 – 788, 2000.
- Ingle, V. K., Proakis, J. G., *Digital Signal Processing Using Matlab*, New York, Thomson Learning, U.S.A., 2000, 418p.
- Jones, R. M., *Enveloping for Bearing Analysis*, Sound and Vibration/ February, 1996
- Juvinall, R. C., Marshek, K. M., *Fundamentals of Machine Component Design*, 2ed, New York, John Wiley & Sons, U.S.A., 1991, pp. 305 – 322.
- Kowalski, C. T., Kowalska T. O., *Neural Networks Application for Induction Motor Faults Diagnosis*, Mathematics and Computers in Simulation, Article in Press, pp 1-14, 2003.
- Lebold M., McClintic K., R. Campbell, Byington e M. Kenneth, *Review of Vibration Analysis Methods for Gearbox Diagnostics and Prognostics*, Proc. of the 54th Meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology, Virginia, May, pp. 623-634 2000.
- Lepore, F. P. N., Bovi, H. *Análise das Bandas de Altas Frequências Utilizadas na Detecção de Defeitos em Rolamentos*, COBEM 99, 1999.
- Lipovszky, G., Sólyomvári, K., And Varga, G. ,*Vibration Testing Of Machines and Their Maintenance*, Amsterdam: Elsevier, 1990.
- Li, B., Chow, M., Tipsuwan, Y., Hung, J. C., *Neural-Network-Based Motor Rolling Bearing Fault Diagnosis*, IEEE Translation on Industrial Electronics, Vol. 47(5), pp. 1060-1069, 2000.
- Mallat S. G., *A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation*, IEEE Pattern Analysis and Machine Intelligence. Vol.11(7), pp.674-693, 1989.

- Marchand, Patrick, *Graphics and GUIs with Matlab*, 2ed, London, CRC Press, England, 1999, 390p.
- Martin, H. R., Honarvar, F., *Application of Statistical Moment to Bearing Failure Detection*, Applied Acoustics, Vol. 44, pp. 67-77, 1995.
- Mesquita, A. L. A., Santiago, D. F. A., Bezerra, R. A., Miranda, U. A., Dias, M., and Pederiva. R., *Detecção de Falhas em Rolamentos Usando Transformadas Tempo-Frequência – Comparação com Análise de Envelope*, Mecânica Computacional, 2002, Vol. XXI, pp. 1938-1954,.
- Mathew J. and Alfredson R., *The Condition Monitoring of Rolling Element Bearing Using Vibration Analysis*, Journal of Vib., Acoust., Stress and Reliab. in Design, Vol.106, pp. 447–453, 1984.
- McFadden, P. D. and Smith, J. D., *Model for The Vibration Produced By Single Point Defect in a Rolling Element Bearing*, Journal of Sound and Vibration , Vol. 96(1), pp. 69-81, 1984.
- McFadden, P. D. and Smith, J. D., *Vibration Monitoring of Rolling Element Bearings by High Frequency Resonance Technique a Review*, Tribology International , Vol. 17(1), pp. 3-10, 1984.
- McFadden, P. D. and Smith, J. D., *The Vibration Produced By Multiple Point Defect in a Rolling Element Bearing*, Journal of Sound and Vibration , Vol. 98(2), pp. 263-273, 1985.
- Meyer L. D., et al, *An Analytical Model for Ball Bearing Vibrations to Predict Vibration Response to Distributed Defects*, Journal of Mechanical Design, Vol. 102, pp. 205-209, 1980.
- Mitchell, John S., *Machinery Analysis and Monitoring*, Oklahoma: Penn Well Books, U.S.A., 1993, 566p.

- Mori K., Kasashima N., T. Yoshioka, Y. Ueno, *Prediction of Spalling on a Ball Bearing by Applying the Discrete Wavelet Transform to Vibration Signal*, *Wear*, Vol.195, pp. 162-168, 1996.
- Nepomuceno, L. X. *Técnicas De Manutenção Preditiva*, São Paulo, Editora Edgard Blücher, Brasil, 1999, Cap. XI, Identificação da Origem das Vibrações Monitoração, pp. 410-498.
- Nunes, M. A. C., *Diagnóstico de Defeitos em Rolamentos Pela Técnica do Envelope*, Santa Catarina, Universidade Federal de Santa Catarina – Engenharia Mecânica, Julho 1989, 110p. Dissertação de Mestrado
- Oppenheim, A. V., Schafer, R. W., Buck, J. R., *Discrete-Time Signal Processing*, New Jersey, Prentice Hall, U.S.A. 1998, pp. 791-795.
- Piñeyro, J., Klempnow, A., Lescano, V., *Effectiveness of New Spectral Tolls in the Anomaly Detection of Rolling Element Bearings*, *Journal of Alloy and Compounds* Vol. 310, pp. 276-279, 2000.
- Proakis, L. G., Manolakis, D. G., *Digital Signal Processing*. 3rd Ed, New York, Prentice Hall, U.S. A., 1996, 967p.
- Randall, R. B., Tech, B. A. *Frequency Analysis*, 3rd, Bruel&Kjaer, 1987.
- Randall, R. B., Antoni, J., Chobsaard, S., *A Comparison of Cyclostationary and Envelope Analysis in The Diagnostics of Rolling Element Bearing*, *IEEE*, pp. 3882- 3885, 2000.
- Rubine, R., Meneghetti, U., *Application of the Envelope and Wavelet Transform Analysis for the Diagnosis of Incipient Faults in Ball Bearing*, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 15(2), 2001.
- Samanta, B. and Al-Blalushi K. R., *Artificial Neural Network Based Fault Diagnostics of Rolling Element Bearings Using Time-Domain Features*, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 17, (2), pp. 317-328, 2001.

Shiroishi, J., et al, *Bearing Condition Diagnostics via Vibration and Acoustic Emission Measurements*, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 11, (5), pp. 6993-705, 1997.

Silva A. A., *Detecção e Análise Dinâmica de Falhas em Rolamentos*, São Carlos, Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos, 1999, 209p. Tese (Doutorado)

SKF, *Manual SKF de Manutenção de Rolamentos*, 1997.

SKF, *Falhas de Rolamentos e suas Causas*, Registro BR 7604 Pb, Copyright SKF 1988.

Spotts, M. F, *Mechanical Design Analysis*, New Jersey, Prentice Hall, U.S.A., 1964, Cap. 9, Ball Bearing – Contact Stress, pp. 163 – 171.

Stearns, S. D. and David, R. A., *Signal Processing Algorithms in Matlab*, New Jersey, Prentice Hall, U.S.A. 1996, 372p.

Tandon N. e Nakra B., *Vibration and Acoustical Monitoring Techniques for the Detection of Defects in Rolling Element Bearings – A Review*, Shock and Vibration Digest, Vol. 24(3), pp. 3–11, 1992.

Tandon, N. and Choudhury, A., *A Review of Vibration and Acoustic Measurement Methods for the Detection of Defects in Rolling Element Bearings*, Tribology International. Vol. 32, pp. 469-480, 1999.

Tandon, N. and Choudhury, A., *An Analytical Model for the Prediction of the Vibration Response of Rolling Element Bearing Due to a Localized Defect*, *Journal of Sound and Vibration*. Vol. 205(3), pp. 275-292, 1997.

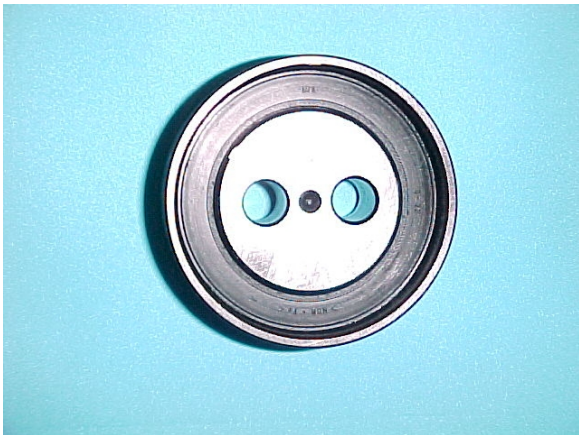
- Tse P., Peng Y. and Yam R., *Wavelet Analysis and Envelope Detection for Rolling Element Bearing Fault Diagnosis – Their Effectiveness and Flexibilities*, Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 123(3), 303–310, 2001.
- Vargas, R. T., *Um estudo Experimental sobre Detecção e Diagnóstico de Falha em Rolamento Por Medição de Sinais Acústicos e Vibratórios*, São Paulo, Universidade de São Paulo – Escola Politécnica, Julho, 1996. Dissertação de Mestrado.
- White, G., *Amplitude Demodulation – A new Tool for Predictive Maintenance*, Sound and Vibration / September, pp. 14-19, 1991.
- Widrow B. and Stearns, S. D , *Adaptive Signal Processing*, New Jersey, Prentice Hall, , U.S.A., 1985, 474p.
- Widrow B. et al, *Adaptive Noise Cancelling; Principles and Applications*, Proceeding of IEEE, Vol. 63(12), pp. 1692-1718, 1975.
- Wismer, N. J., *Gearbox Analysis Using Cepstrum Analysis and Comb Lifting*, Application Note, Brüel&Kjaer, Bo 0440-11.
- Wowk, Wictor, *Machinery Vibration: Measurement and Analysis*, New York: Mcgraw-Hill, U.S.A., 1991, 358p.
- Yang, D. M., Stronach, A. F., MacConnell, P. and Penman, *Third-Order Spectral Techniques for Techniques for the Diagnosis of Motor Bearing Conditions Using Artificial Neural Networks*, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 16, (2), pp. 391-411, 2002.
- Ye Z., Wu B., Sadeghian A. R., *Signature Analysis of Induction Motor Mechanical Faults by Wavelet Packet Decomposition*, IEEE, pp. 1022-1029, 2001.

ANEXOS

Anexo - 01

O rolamento utilizado nos ensaios foi um rolamento de esferas, com dez esferas, distribuídas em carreira única. com as seguintes dimensões:

- Numero de Esferas..... $N_e = 10$;
- Diâmetro da Pista Externa..... $d_{pe}=49.63$;
- Diâmetro da pista Interna..... $d_{pi}=35.32$;
- Diâmetro da Esfera..... $D=7.144$;
- Diâmetro Principal..... $P_d=42.47$.



(a) Rolamentos utilizado nos ensaios

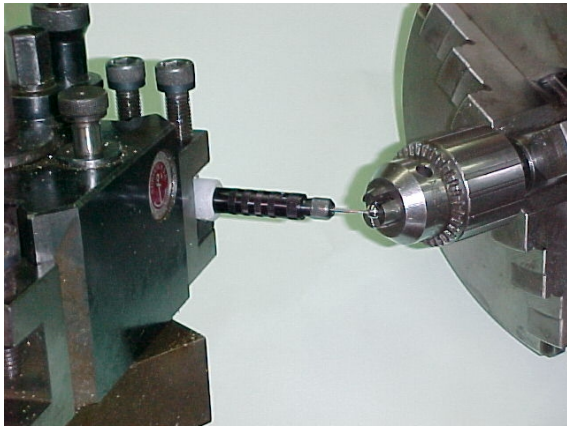


(b) Gaiola de Nylon

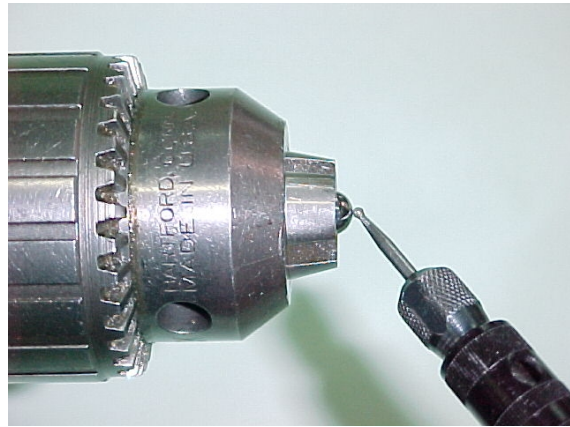
Figura A1.1 – Rolamento e gaiola

Anexo - 02

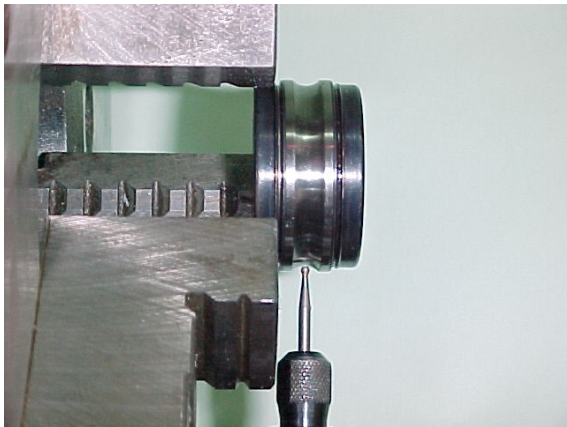
As falhas induzidas foram obtidas a partir da usinagem controlada, dos elementos do rolamento. Para confecção das mesmas foram utilizados uma micro retífica com uma ponta diamantada esférica.



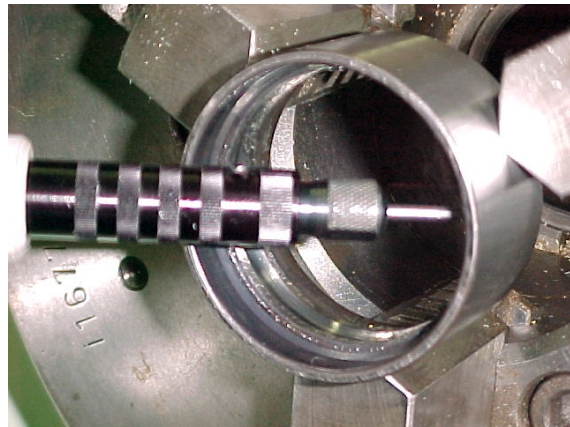
(a) Micro retífica e esfera



(b) Obtenção da falha na esfera



(c) Obtenção da falha na pista interna



(d) Obtenção da falha na pista externa

Figura A2.1 – Obtenção das falhas induzidas nos rolamentos