



## APLICAÇÃO DE CURTOSE ESPECTRAL NA IDENTIFICAÇÃO DE FALHAS EM MANCAIS DE ROLAMENTOS

Elvis Jhoarsy Osorio Santander

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientadores: Severino Fonseca da Silva Neto  
Luiz Antônio Vaz Pinto

Rio de Janeiro  
Julho de 2014

APLICAÇÃO DE CURTOSE ESPECTRAL NA IDENTIFICAÇÃO DE FALHAS EM  
MANCAIS DE ROLAMENTOS

Elvis Jhoarsy Osorio Santander

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO  
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA  
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE  
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE  
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA OCEÂNICA.

Examinada por:

---

Prof. Severino Fonseca da Silva Neto, D. Sc.

---

Prof. Luiz Antônio Vaz Pinto, D. Sc.

---

Prof. Marcelo Amorim Savi, D. Sc.

---

Prof. Sergio Lima Netto, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL.

JULHO DE 2014

Santander, Elvis Jhoarsy Osorio.

Aplicação de Curtose Espectral na Identificação de Falhas em Mancais de Rolamentos / Elvis Jhoarsy Osorio Santander. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2014.

XVI, 138 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Severino Fonseca da Silva Neto

Luiz Antônio Vaz Pinto

Dissertação (mestrado)–UFRJ/COPPE/ Programa de Engenharia Oceânica, 2014.

Referências Bibliográficas: p.132-138.

1. Vibração Mecânica. 2. Mancais de Rolamento. 3. Curtose Espectral. I. Silva Neto, Severino Fonseca da *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

*À minha irmã, a menina de meus olhos **Yaquelin***

## AGRADECIMENTOS

Quero agradecer ao Brasil por me dar a oportunidade de estudar o mestrado na Universidade Federal do Rio de Janeiro, ao Programa de Engenharia Oceânica da COPPE/UFRJ por propiciar as condições necessárias à realização da pesquisa, à agência Nacional de Petróleo (ANP) e Petrobras pela ajuda econômica nestes dois anos.

Ao meu orientador, D.Sc. Ulisses Admar Barbosa Vicente Montero, pela amizade, orientação confiança e paciência para realização deste projeto, tornando possível a realização das atividades deste trabalho.

Aos professores pela ajuda, apoio e interesse em me ajudar no meu desenvolvimento profissional, ao Prof. Severino Fonseca da Silva Neto pela boa disposição com a documentação necessária, ao Prof. Luiz Antônio Vaz Pinto pela boa disposição e recomendação com o projeto, ao Prof. Carlos Pereira Belchior pela ajuda quando cheguei ao Brasil.

À Ana Paula Domingues pela dedicação, paciência que teve com este trabalho e comigo.

À Mirella Santos pelo estímulo, confiança e suporte neste trabalho não teria chegado tão longe.

A todos os amigos, pela paciência, ajuda, convivência e descontração, especialmente aos amigos Polo, Manco, Luis Carlos, Ricardo, Liniker, Vito e Flavia e ao pessoal do LEDAV, em especial à Denise, pela boa disposição em ajudar no que foi necessário.

À minha família, especialmente aos meus pais, que me permitiram e sempre me incentivaram a estudar. Nenhuma palavra pode expressar a gratidão e orgulho que sinto por vocês.

Aos meus irmãos, Cristian e Yaquelin, por todo o incentivo e companheirismo dado durante minha vida.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M. Sc.)

## APLICAÇÃO DE CURTOSE ESPECTRAL NA IDENTIFICAÇÃO DE FALHAS EM MANCAIS DE ROLAMENTOS

Elvis Jhoarsy Osorio Santander

Julho / 2014

Orientadores: Severino Fonseca da Silva Neto

Luiz Antônio Vaz Pinto

Programa: Engenharia Oceânica

A análise do envelope do sinal de vibração é uma das técnicas mais utilizadas no diagnóstico de falhas em mancais de rolamento. Ela consegue identificar a frequência de repetição dos impactos gerados devido à falha, através da demodulação da amplitude do sinal. Contudo, antes da aplicação da técnica do envelope, é necessário um pré-processamento do sinal para selecionar a faixa de frequências onde esses impactos se concentram. Várias técnicas para a seleção dessa banda de demodulação estão disponíveis na literatura e, na maioria das vezes, utilizam o sinal de um mancal saudável para comparar com o sinal do mancal defeituoso.

Neste trabalho, para selecionar a banda de demodulação do sinal foi utilizada a curtose espectral que é uma técnica que não utiliza dados históricos de mancais saudáveis. A curtose espectral só é eficiente quando os impactos devido à falha são separados de componentes determinísticos e de ruídos presentes no sinal de vibração.

Foi proposta uma metodologia que inclui uma filtragem adaptativa para se retirar componentes de frequência discretos e foi utilizado um modelo de predição linear para realçar os impactos devido à falha, antes de se calcular a curtose espectral e o envelope do sinal de vibração.

A metodologia de identificação de falhas proposta foi aplicada na análise de três mancais defeituosos e os resultados mostraram que os defeitos foram corretamente identificados.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M. Sc.)

## APPLICATION OF SPECTRAL KURTOSIS IN IDENTIFICATION OF FAILURES IN ROLLING BEARINGS

Elvis Jhoarsy Osorio Santander

July / 2014

Advisors: Severino Fonseca da Silva Neto

Luiz Antônio Vaz Pinto

Department: Ocean Engineering

Envelope analysis of vibration signals is one of the most used techniques in rolling bearings faults diagnosis. It can identify the repetition frequency of the impacts generated due to faults by demodulating the signal amplitude. However, before applying the envelope technique, a signal pre-processing is required to select the frequency range where these impacts are concentrated. Several techniques for selecting this demodulation bandwidth are available in the literature and, in most cases, they use the signal of a healthy rolling bearing to compare with the signal of a defective rolling bearing.

In this work, spectral kurtosis was used to select the demodulation band of the vibration signal. Spectral kurtosis is a technique that does not use historical data from healthy rolling bearings and it is only efficient when the impacts due to the fault are separated from deterministic components and from noise present in the vibration signal.

It is proposed a methodology that includes an adaptive filter to remove discrete frequency components and a linear prediction model to highlight the impacts due to the fault, before calculating the spectral kurtosis and the envelope signal.

The proposed methodology for fault identification in rolling bearings was applied on the analysis of three defective bearings and the results showed that the defects were correctly identified.

## SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 -INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Considerações iniciais.....	1
1.2 Motivação.....	2
1.3 Objetivo e Estrutura da Dissertação.....	3
CAPÍTULO 2 -REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
CAPÍTULO 3 -MANCAIS DE ROLAMENTO.....	18
3.1 Tipos de Rolamentos.....	22
3.1.1 Segundo a Direção da Carga.....	22
3.1.1.1 Rolamentos Radiais.....	22
3.1.1.2 Rolamentos Axiais.....	22
3.1.1.3 Rolamentos de contato angular.....	22
3.1.2 Segundo a Rigidez do Rolamento.....	23
3.1.2.1 Rolamentos rígidos.....	23
3.1.2.2 Rolamentos rotulados.....	23
3.1.3 Segundo o Elemento Rolante.....	23
3.1.3.1 Rolamentos rígidos de esferas.....	24
3.1.3.2 Rolamentos de esferas de contato angular.....	26
3.1.3.3 Rolamentos de agulhas.....	28
3.1.3.4 Rolamentos de rolos cônicos.....	33
3.1.3.5 Rolamentos axiais de rolos cilíndricos.....	34
3.1.3.6 Rolamentos axiais autocompensadores de rolos.....	34
3.1.3.7 Rolamentos autocompensadores de esferas.....	35
3.1.3.8 Rolamentos de rolos cilíndricos.....	35
3.1.3.9 Rolamentos autocompensadores de rolos.....	35
3.1.3.10 Rolamentos axiais de esferas de escora simples.....	36
3.2 Rolamentos Para Condições Especiais.....	37
3.2.1 Rolamentos híbridos.....	37
3.2.2 Rolamentos com isolamento.....	37
3.2.3 Rolamentos para temperaturas extremas.....	38
3.2.4 Rolamentos com solid oil.....	39

3.2.5	Rolamentos de material polimérico.....	40
3.2.6	Rolamentos com sensores .....	42
3.2.7	Rolamentos Magnéticos .....	43
3.3	Danos em Mancais de Rolamentos .....	45
3.3.1	Desgaste .....	47
3.3.1.1	Desgaste causado por partículas abrasivas .....	47
3.3.1.2	Desgaste causado por lubrificação inadequada .....	47
3.3.1.3	Desgaste causado por vibração.....	48
3.3.2	Endentação .....	49
3.3.2.1	Endentações causadas por falha na montagem ou sobrecarga .....	49
3.3.3	Espalhamento .....	51
3.3.3.1	Espalhamento de extremos de rolos e flange de guia.....	52
3.3.3.2	Espalhamento por patinado de rolos e pistas de rolamento.....	52
3.3.3.3	Espalhamento de pistas a faixas correspondentes ao espaçamento entre os rolos.....	53
3.3.3.4	Espalhamento de superfícies externas.....	54
3.3.3.5	Espalhamento de superfícies internas.....	55
3.3.4	Fadiga superficial .....	55
3.3.5	Corrosão .....	56
3.3.5.1	Ferrugem profundamente incrustada.....	57
3.3.5.2	Corrosão por contato .....	58
3.3.6	Avaria produzida por passagem de corrente elétrica.....	59
3.3.7	Descascamento .....	61
3.3.7.1	Descascamento causado por pré-carregamento.....	62
3.3.7.2	Descascamento causado por compressão oval .....	62
3.3.7.3	Descascamento causado por compressão axial .....	63
3.3.8	Descascamento causado por desalinhamento.....	64
3.3.8.1	Descascamento causado por endentações .....	65
3.3.8.2	Descascamento causado por espalhamento .....	65
3.3.8.3	Descascamento causado por ferrugem profundamente incrustada e por corrosão por contato.....	66
3.3.8.4	Descascamento causado por estriamento ou crateras .....	66
3.3.9	Rachaduras .....	67
3.3.10	Danos à gaiola .....	70

3.3.10.1	Vibração .....	70
3.3.10.2	Excesso de velocidade .....	71
3.3.10.3	Desgaste .....	71
3.3.10.4	Obstrução .....	72
3.3.10.5	Outras causas de danos à gaiola .....	72
CAPÍTULO 4 -TÉCNICAS DE ANÁLISE DE FALHAS UTILIZANDO SINAIS DE VIBRAÇÃO .....		73
4.1	Falhas em Rolamentos .....	73
4.1.1	Falhas comuns em rolamentos .....	73
4.1.2	Frequências de falhas .....	75
4.2	Análise no Domínio do Tempo .....	78
4.2.1	Valor eficaz (RMS) .....	78
4.2.2	Valor de pico (Peak value) .....	79
4.2.3	Curtose .....	79
4.3	Análise no Domínio da Frequência.....	83
4.3.1	Técnica do envelope.....	84
4.4	Análise no Domínio Tempo-Frequência.....	88
4.4.1	A Transformada de Fourier de Tempo Curto (STFT) .....	89
4.4.1.1	STFT de Tempo Contínuo.....	90
4.4.1.2	STFT de Tempo Discreto .....	91
4.4.1.3	Efeito do janelamento na STFT .....	92
4.5	Remoção de Sinais Determinísticos .....	93
4.5.1	Predição Linear.....	94
4.5.2	Filtro adaptativo para cancelamento de ruído (ANC) .....	98
4.6	Realce da Assinatura de Falha Utilizando um Filtro de Predição Linear .....	103
4.6.1	Melhora da impulsividade por <i>Pre-whitening</i> .....	104
4.7	Curtose espectral .....	106
4.8	Seleção de Banda de Demodulação do sinal.....	108
4.9	Metodologia de Identificação de Falhas em Mancais de Rolamento.....	110

CAPÍTULO 5 -ESTUDO DE CASOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	112
5.1 Descrição dos Aparato Experimental.....	112
5.2 Aquisição de Dados.....	113
5.2.1 Análise do mancal 01 com falha na gaiola.....	114
5.2.2 Análise do mancal 02 com falha na pista externa .....	121
5.2.3 Análise do mancal 03 com falha no elemento rolante ( esfera) .....	123
CAPÍTULO 6 -CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	126
APÊNDICES .....	128
Apêndice A– Programa LabVIEW, tela inicial para a aquisição e visualização de sinais .....	128
Apêndice B – Programa LabVIEW para filtro ANC.....	129
Apêndice C – Programa LabVIEW para filtro “Predição linear –AR” .....	130
Apêndice D – Programa LabVIEW Espectral Curtose. ....	130
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	132

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Razões de falhas em motores elétricos.	5
Figura 3.1. Mancal esférico.	18
Figura 3.2. Rolamentos de esferas.	19
Figura 3.3. Rolamento de esferas de Leonardo da Vinci.	19
Figura 3.4. Rolamento de esferas seccionado.	21
Figura 3.5. Rolamentos rígidos.	23
Figura 3.6. Vista explodida de um rolamento rígido de uma carreira de esferas.	24
Figura 3.7. Rolamento rígido de duas carreiras de esferas.	25
Figura 3.8. Rolamento rígido de uma carreira de esferas com rasgos de entrada.	26
Figura 3.9. Ângulo de contato em rolamentos de esferas com contato angular.	26
Figura 3.10. Rolamento de uma carreira de esferas de contato angular.	27
Figura 3.11. Rolamentos de duas carreiras de esferas de contato angular.	27
Figura 3.12. Rolamento de esferas de quatro pontos de contato.	28
Figura 3.13. Conjunto de gaiola e rolos de agulhas.	29
Figura 3.14. Rolamento de agulhas com capa estampada e extremidades abertas.	29
Figura 3.15. Rolamento de agulhas como capa estampada e com uma extremidade fechada.	30
Figura 3.16. Rolamentos de rolos de agulhas sem anel interno.	31
Figura 3.17. Rolamentos de rolos de agulhas com anel interno.	31
Figura 3.18. Rolamentos de agulhas alinháveis sem anel interno.	32
Figura 3.19. Rolamentos de agulhas alinháveis com anel interno.	33
Figura 3.20. Rolamento de rolos cônicos.	33
Figura 3.21. Rolamentos axiais de rolos cilíndricos.	34
Figura 3.22. Rolamento autocompensador de esferas.	35
Figura 3.23. Rolamento autocompensador de rolos.	36
Figura 3.24. Rolamento axial de esferas de escora simples e arruela da caixa de mancal padrão.	36
Figura 3.25. Rolamento híbrido.	37
Figura 3.26. Rolamento com isolamento.	38
Figura 3.27. Rolamento para temperaturas extremas.	39
Figura 3.28. Rolamentos e mancais para temperaturas extremas.	39
Figura 3.29. Rolamento com Solid Oil.	40
Figura 3.30. Rolamentos de material polimérico.	41
Figura 3.31. Rolamento com sensor.	43
Figura 3.32. Rolamento magnético.	44
Figura 3.33. Causas dos defeitos nos rolamentos.	46
Figura 3.34. Desgaste causado por uma lubrificação inadequada.	48
Figura 3.35. Anel interior e exterior de um rolamento de rolos cilíndricos expostos a vibrações.	48

Figura 3.36. Arruela de um rolamento axial de esferas sujeito a sobrecarga fora de operação. As endentações são estreitas e alinhadas radialmente, não esféricas como nos rolamentos radiais de esferas.	50
Figura 3.37. (a) Exemplo dos resultados de uma manipulação indevida em um rolamento de duas carreiras de rolos cilíndricos que sofreu impacto. (b) Uma visão de câmara periférica do rolo mostra duas endentações diametralmente opostas. (c) Por sua vez, o rolo endentou a pista do anel interno.	50
Figura 3.38. Endentações causadas por sujeira.	51
Figura 3.39. Rolo cilíndrico com espalhamento no extremo, infligida por forte carga axial e lubrificação inadequada.	52
Figura 3.40. Espalhamento sob a superfície de um rolo de um rolamento autocompensador de rolos.	53
Figura 3.41. Pista de rolamento do anel exterior de um rolamento autocompensador de rolos com traços de espalhamento produzido por um golpe contra o anel interior.	53
Figura 3.42. Detalhe de um dos traços de espalhamento.	54
Figura 3.43. Superfície exterior com espalhamento no anel exterior de um rolamento autocompensador de rolos.	54
Figura 3.44. Caminho de rolar de rolamento axial de esfera com marcas devido a uma velocidade de giro demasiadamente elevada em relação com a carga.	55
Figura 3.45. Fadiga superficial em forma de uma faixa em torno o rolo de um rolamento autocompensador de rolos.	56
Figura 3.46. Corrosão no anel interior de um rolamento cônico. A corrosão tem um espaço equivalente a distancia entre elementos rolantes. A corrosão é produzida pela presença de água no lubrificante.	56
Figura 3.47. Corrosão no anel interior de um rolamento autocompensador de rolos, produzido pela entrada de água no rolamento.	57
Figura 3.48. Corrosão no anel exterior de um rolamento cônico. A corrosão tem um espaço equivalente à distância entre elementos rolantes. A corrosão é produzida pela presença de água no lubrificante.	57
Figura 3.49. Ferrugem profundamente incrustada no anel externo de um rolamento de rolos cilíndricos.	58
Figura 3.50. Corrosão por contato no anel externo de um rolamento autocompensador de rolos.	59
Figura 3.51. Estriamento, causado pela passagem de corrente elétrica, no anel externo de rolamento autocompensador de rolos.	60
Figura 3.52. Rolamento rígido de esferas com danos causados por corrente elétrica em padrão de zigue-zague. Supõe-se que, queimaduras dessa configuração ocorram quando a passagem momentânea de corrente de alta amperagem é acompanhada de vibração axial.	60
Figura 3.53. O anel externo de um rolamento autocompensador de esferas danificado por corrente elétrica.	61
Figura 3.54. Fases progressivas de descascamento.	62
Figura 3.55. Descascamento causado por cargas pesadas e lubrificação inadequada.	62
Figura 3.56. Descascamento causado por furo em mancal oval.	63

Figura 3.57. Descascamento em anel interno de um rolamento autocompensador de rolos. A extensão do descascamento ao redor de uma pista inteira indica que a carga axial foi muita pesada em relação à carga radial.	64
Figura 3.58. Anel interno do rolamento de rolos cilíndricos com descascamento em um lado da pista, como resultado de sobrecarga devido a desalinhamento.	64
Figura 3.59. Descascamento causado por endentações.	65
Figura 3.60. Anel interno de um rolamento de rolos cilíndricos com espalhamento, em intervalos correspondentes ao espaçamento dos rolos, causado por montagem incorreta.	65
Figura 3.61. Descascamento com origem em ferrugem profundamente incrustada no rolo de um rolamento autocompensador de rolos.	66
Figura 3.62. Descascamento nas pistas do anel externo de um rolamento autocompensador de rolos. Área correspondente de corrosão por contato avançada na superfície externa.	66
Figura 3.63. Descascamento causado por crateras por passagem de corrente elétrica.	67
Figura 3.64. Anel externo fraturado de um rolamento autocompensador de esferas. As endentações visíveis na borda inferior do anel foram causadas por tratamento inadequado, e a rachadura teve origem em uma dessas endentações.	67
Figura 3.65. Rachadura em anel interno de um rolamento autocompensador de rolos.	68
Figura 3.66. Anel interno de um rolamento autocompensador de rolos com fratura no flange externo produzida por martelamento direto.	68
Figura 3.67. Anel interno do rolamento autocompensador de rolos que rachou por completo após espalhamento de uma face. O anel foi montado para servir de encosto a um espaçador que não teve ajuste suficientemente apertado no eixo. Consequentemente, o espaçador girou em relação ao eixo e ao anel do rolamento.	69
Figura 3.68. Anel interno do rolamento autocompensador de rolos com corrosão por contato e rachadura transversal por todo o anel. A corrosão por contato causou a rachadura.	69
Figura 3.69. Rachadura longitudinal no anel externo do rolamento rígido de esferas com corrosão por contato.	70
Figura 3.70. Gaiola de um rolamento autocompensador de rolos, rachaduras por fadiga se formaram nos filetes.	71
Figura 3.71. O desgaste na gaiola de um rolamento de esferas é causado pela lubrificação inadequada.	72
Figura 4.1. Surgimento da falha na superfície de um rolamento.	75
Figura 4.2. (a) Passagem de um elemento girante sobre um defeito e (b) Sinal de aceleração gerado.	75
Figura 4.3. Típico sinal de vibração gerado por falhas nos mancais de rolamento (pista externa estacionária) BPF0 = Frequência de defeito na pista externa; BRFI = Frequência de defeito na pista interna; FTF = Frequência de defeito na gaiola; BSF = Frequência de defeito na esfera.	76
Figura 4.4. Ilustração de Curtose.	80
Figura 4.5. Comportamento da curtose com a evolução do desgaste em mancais de rolamentos.	80

Figura 4.6. Comparação de espectros de vibração de um mancal novo e de um defeituoso.	84
Figura 4.7. Sinal temporal do rolamento defeituoso.	85
Figura 4.8. Envelope do sinal temporal do rolamento defeituoso.	85
Figura 4.9. Espectro do envelope do sinal temporal do malcal defeituoso.	86
Figura 4.10. Procedimento de análise do envelope utilizando a transformada de Hilbert.	88
Figura 4.11. Possibilidades de resoluções em tempo-frequência.	93
Figura 4.12. Modelo de geração de sinais de vibração de uma máquina com engrenagens e mancal rolamentos.	94
Figura 4.13. Filtragem predição linear	96
Figura 4.14. (a) Sinal bruto (b) Parte determinística AR (4) (c) AR (4) residual	97
Figura 4.15. Cancelamento de ruído adaptativo	98
Figura 4.16. Cancelamento de ruído adaptativo para mancais de rolamento.	101
Figura 4.17. (a) Sinal de vibração original no domínio do tempo (b) Sinal com filtro ANC no domínio do tempo (c) FFT para sinal com e sem filtro ANC (d) Envelope para sinal com e sem filtro ANC.	103
Figura 4.18. Sinais de vibração (aceleração) para o caso de falha na gaiola mancal 1: a) Sinal bruto, b) Após a remoção por ANC, c) sinal (b) após o <i>pre-whitening</i> (AR = 4).	105
Figura 4.19. Cálculo do SK com STFT de um sinal de falha de rolamento simulado: (a) Sinal simulado tempo, (b) STFT, e (c) SK como uma função da frequência.	107
Figura 4.20. (a) Comparação com espectro dB com e sem falhas na gaiola (b) espectro de diferença dB (c) Curtose espectral.	109
Figura 4.21. Diagrama de bloco das etapas da metodologia.	111
Figura 5.1. (a) Rotor Kit ABVT™ (b) Mancais defeituosos utilizados no experimento	112
Figura 5.2. Cálculo das frequências características de falhas.	113
Figura 5.3. (a) Sinal de vibração do mancal sem defeito (b) Sinal do mancal com defeito.	114
Figura 5.4. Gráfico comparando os parâmetros estadísticos para os mancais com e sem defeitos.	115
Figura 5.5. (a) Sinal original do mancal 01. (b) Parte residual do sinal após a filtragem.	116
Figura 5.6. Gráfico comparando os parâmetros estadísticos para o mancal sim e com filtro ANC.	116
Figura 5.7. Seleção da ordem do modelo para o <i>pre-whitening</i> do sinal.	117
Figura 5.8. Sinal residual após o realce dos impactos pelo modelo AR (4)	118
Figura 5.9. Comparação de valores de curtoses ao longo das etapas de filtragem do sinal.	118
Figura 5.10. Cálculo de SK para janelas (Nw) com 128, 256, 512 e 1024 amostras.	119
Figura 5.11. Cálculo de SK para janelas (Nw) com 512,1024 e 2048 amostras.	119
Figura 5.12. Cálculo de SK para Nw-512.	120

Figura 5.13. Espectro de envelope para o mancal 1, largura de banda 1kHz e banda central 7.73 kHz.	121
Figura 5.14. Sinal original do mancal 02	121
Figura 5.15. Sinal do mancal 02 após o realce dos impactos utilizando o filtro AR (4).	122
Figura 5.16. Cálculo de SK utilizando a janela (Nw) ótima de 512 amostras.	122
Figura 5.17. Espectro de envelope para o mancal 02, com frequência central de 8,9 kHz e largura de banda de 1 kHz.	123
Figura 5.18. Sinal original do mancal 03.	124
Figura 5.19. Sinal do mancal 03 após o realce dos impactos utilizando o filtro AR (4).	124
Figura 5.20. Cálculo de SK utilizando a janela (Nw) ótima de 1024 amostras	124
Figura 5.21. Espectro de envelope para o mancal 03, com frequência central de 6,45 kHz e largura de banda de 1 kHz.	125

# Capítulo 1 - Introdução

## 1.1 Considerações iniciais

Os mancais de rolamentos são largamente utilizados na indústria, principalmente como elementos capazes de suportar uma grande parte da carga estática e dinâmica do sistema e, por conseguinte, a possibilidade de uma falha incipiente em sua estrutura é inerente às tensões envolvidas na conversão de energia do sistema.

Na manutenção preditiva, pretende-se através da monitoração de vários parâmetros (amplitude de vibração, temperatura...) conhecer o estado do equipamento em tempo real e detectar uma falha quando ele ainda é incipiente e, com isso, ser capaz de programar uma parada para a troca do equipamento defeituoso antes que a falha se torne catastrófica. Dentre os parâmetros que podem ser monitorados, sem dúvida os sinais de vibração são os mais usuais pela sua capacidade de diagnosticar possíveis danos ainda na fase inicial.

A análise dos sinais de vibração dos mancais de rolamento é utilizada para fornecer aos analistas informações sobre o tamanho da falha e, conseqüentemente, permitir prever a vida útil remanescente do mancal. No entanto, os sinais de vibração captadas pelos acelerômetros têm que passar por uma série de processamento que permitam realçar os sintomas de falha e a sua posterior identificação.

Várias técnicas de análise de vibração estão disponíveis na literatura para diagnosticar as falhas em mancais de rolamento. Essas técnicas são desenvolvidas com dois principais objetivos em mente. O primeiro, é o de separar o sinal do mancal do de outros componentes e, assim, minimizar o ruído que pode mascarar as características de falha contínuas no sinal, sobretudo nos estágios iniciais da falha. Algumas das técnicas que podem ser utilizadas para este fim são a média síncrona no tempo (TSA), cancelamento de ruído adaptativo (ANC), cancelamento de ruído auto-adaptativo (SANC) e separação aleatória discreta (DRS). O segundo objetivo é identificar o estado do mancal, distinguir entre os rolamentos bons e os defeituosos e indicar o componente com defeito. Exemplos de técnicas utilizadas para esse caso são: comparação de

densidade espectral de potência (PSD), porcentagem constante de banda (CPB), parâmetros estatísticas dos sinais no tempo, transformada rápida Fourier (FFT), análise de envelope, também conhecida como técnica de ressonância de alta frequência (HFRT) e análises no domínio tempo-frequência.

## **1.2 Motivação**

Hoje, a tecnologia permite estender a vida útil destes elementos, mas muitos deles ainda tendem a falhar (falhas em mancais são um dos tipos mais comuns de falhas em vários seguimentos da indústria) e isto causa interrupções em processos críticos na indústria. Basta dizer que essas paralisações, que afetam a produção, provocam falhas que encarecem muito mais o processo produtivo do que o custo dos mancais danificados.

As diferentes técnicas de análises de vibrações vêm como uma resposta natural à estreita interação entre os mancais e os elementos rotativos que eles suportam. Esta estreita interação, juntamente com o ruído de fundo, na maioria dos casos, atua como uma máscara para a assinatura de vibração do mancal defeituoso. Isto é ainda mais crítico em sistemas complexos, tais como caixas de engrenagens de embarcações e turbomáquinas, onde se tem um grande número de componentes rotativos e numerosas engrenagens que contribuem e complicam a sua análise.

A motivação deste trabalho é utilizar técnicas recém descobertas para filtrar e realçar os sinais de vibração dos mancais de rolamento atenuando a influência de outras fontes, já que a assinatura de falha é caracterizada por impactos (sinais transitórios) de curto prazo, com pouca energia e imerso em ruído.

### **1.3 Objetivo e Estrutura da Dissertação**

Tem-se como objetivo principal do trabalho a identificação de falhas em mancais de rolamento, utilizando a técnica da curtose espectral para selecionar a faixa das frequências de demodulação, sem a necessidade de se utilizar sinais de referências de mancais saudáveis. Antes da utilização dessa técnica é necessário minimizar a influência de outras fontes de vibração contidas no sinal do mancal.

Outros objetivos foram alcançados nesta dissertação:

- Implementação de filtros que permitem o desmascaramento de sinais transientes características da falha do mancal.
- Implementação de filtros que permitem melhorar as características de impulsividade do sinal do mancal defeituoso.
- Detecção de sinais transientes dentro de outros sinais com ruído branco.

Esta dissertação foi organizada nos seguintes capítulos:

O primeiro capítulo apresenta as motivações para a realização da pesquisa e os principais objetivos.

No segundo capítulo, uma revisão bibliográfica foi realizada com o objetivo de mostrar a evolução das técnicas de detecção de falhas ao longo do tempo e apresentar os trabalhos mais recentes que tratam da detecção de falhas em mancais de rolamento por meio da análise de vibração.

O capítulo três deste trabalho foi dedicado a uma breve introdução sobre a evolução dos mancais de rolamento ao longo do tempo, incluindo também uma classificação dos diferentes tipos mancais, assim como os tipos mais comuns de defeitos nesses equipamentos.

No capítulo quatro são apresentadas os fundamentos teóricos que permitiram o desenvolvimento e a implementação das técnicas utilizadas na análise, e a metodologia empregada para a identificação de falhas em mancais de rolamento,

O capítulo cinco foi dedicado ao estudo de casos de três mancais defeituosos e contém o procedimento experimental utilizado na aquisição e processamento dos sinais de vibração.

As conclusões e recomendações e algumas sugestões de trabalhos futuros são apresentadas no capítulo sexto.

## Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica

Em manutenção, considera-se como falha de um equipamento a situação onde o equipamento ou não pode ser utilizado, ou não permite uma qualidade adequada de produção. Neste caso, a falha é considerada a situação onde o equipamento deixa de cumprir a sua função.

Defeito refere-se a uma condição do equipamento, diferente da condição na qual ela foi projetada (uma trinca, por exemplo), que pode ou não estar provocando uma falha no equipamento. Neste caso, o defeito é considerado uma deficiência do equipamento, porém, ele não necessariamente deixa de cumprir a função a qual foi projetado.

O surgimento de um defeito num mancal de rolamento pode ter um alto impacto nos custos relacionados a uma possível falha do equipamento [1], que são muito superiores ao custo da troca do rolamento em si.

Um exemplo é o caso de motores elétricos [1], onde cerca de 37% das falhas identificadas são devidos a mancais de rolamentos, conforme pode ser observado na Figura 2.1.

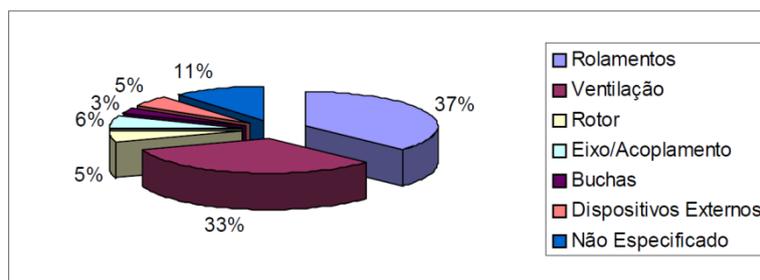


Figura 2.1. Razões de falhas em motores elétricos [1].

A SKF e a NSK [2,3] descrevem diversas falhas que podem ocorrer em um mancal de rolamento. Normalmente, quando estas falhas ocorrem prematuramente (antes do fim da vida útil do rolamento), elas são causadas por falta de cuidados na instalação, má ou falta de lubrificação, penetração de partículas estranhas entre as pistas, sobrecargas, influência de calor externo não previsto em projeto, etc. Estas falhas

podem ser mais bem identificadas após a desmontagem do rolamento e com uma profunda análise da falha do rolamento.

Uma das principais ferramentas utilizada para a observação do defeito antes que ocorra a falha do equipamento é a análise de vibração [1]. Outra ferramenta também utilizada é o sinal de emissão acústica [1].

Em 1963 RUFFINI [4] afirma que rolamentos são transmissores e geradores de vibrações. O autor apresenta uma formulação matemática para determinar as frequências de ruídos em rolamentos e faz considerações sobre o pré-carregamento necessário para ajustar um rolamento para que produza menos ruído. Afirma que, os rolamentos radiais de uma carreira de esfera ou um par de rolamentos de contato angular, produzem o menor ruído. Neste trabalho e feito ainda considerações sobre a geometria interna e o tratamento térmico, os quais têm influência direta na produção de ruídos.

TALLIAN e GUSTAFSSON [5] em 1964 propõem um dos métodos de detecção de falhas em rolamentos, que baseia-se num indicador estatístico do sinal temporal determinando os picos normais e criando uma faixa que descreve o impacto causado por um defeito localizado aos picos, que excedem este nível.

Já em 1971 BOTO [6] comenta que paradas por falhas em rolamentos são anti-econômicas e para evitar esta situação, muitas vezes estes são substituídas ainda em bom estado. Para tentar otimizar a utilização dos rolamentos, há a necessidade de um meio de monitoração. Neste trabalho, o autor utiliza o método de pulso de choque, como método de monitoramento. Quando um defeito entra em contato com outra superfície, este sendo provocado por fadiga ou por lascamento, ele produz um choque mecânico. Este choque se assemelha ao impacto de um martelo sobre a estrutura.

MONK [7] em 1972 apresenta em seu trabalho uma análise sobre a detecção de defeitos através dos sinais de vibrações. Através de dados coletados dos sinais de vibrações sendo possível diagnosticar o estado do equipamento. A técnica de análise de assinatura no espectro de banda estreita é um meio efetivo de monitoramento de falhas

incipientes, pois estas afetam a frequência de passagem de elementos rolantes e dentes de engrenagens.

BRAUN e DATNER [8] fazem uma análise em 1979 sobre o desenvolvimento de falhas em rolamentos, através de sinais de vibrações. Em seu trabalho, os autores utilizam alguns modelos teóricos, que descrevem os sinais emitidos, causados por uma falha. Propõe-se a análise de vibrações como uma forma de ensaio não destrutivo, que além das vantagens evidentes, possibilita a previsão do surgimento de alguma falha. Dentro das equações desenvolvidas, estão as fórmulas para cálculo das frequências relativas a cada defeito. Estes, normalmente se apresentam devido à fadiga, sujeira, correntes elétricas, corrosão, pré-carregamentos excessivos, vibrações, montagens incorretas, altas temperaturas e outros. Utilizam-se da análise espectral como forma de reduzir os dados de vibrações.

Em 1980 TAYLOR [9] faz uma análise espectral em rolamentos para detecção de defeitos. A dimensão destes defeitos pode ser determinada empiricamente, dentro de certos limites. Estes defeitos se apresentam como sinais repetidos no espectro. Os cinco tipos de defeitos os quais normalmente se apresentam em rolamentos são, na pista interna, pista externa, elementos rolantes, gaiola e devido à própria rotação do eixo. As frequências características destes defeitos podem aparecer compostas no espectro, na forma de soma ou subtração uma das outras. O autor constata que os defeitos normalmente se manifestam inicialmente nas pistas, em seguida nos rolos e por último na gaiola.

BRAUN [10] em 1980 utiliza as frequências de defeito de um rolamento para analisar a modulação produzida pelas frequências de ressonância dos elementos que compõem o rolamento.

BOYES [11] em 1982 melhora a técnica de modulação analisando as ressonâncias como diagnóstico de defeitos, obtendo resultados mais precisos.

MCFADDEN e SMITH [12] em 1983 constataram que os defeitos agem como impactos sobre a estrutura, excitando as várias ressonâncias. Estas se manifestam nos

mancais sendo conveniente, posicionando os transdutores sobre os mesmos, para fazer o monitoramento.

Os mesmos MCFADDEN e SMITH [13] em 1984 publicam dois artigos: em “*Model for the vibration produced by a single point race in rolling element bearing*” comentam que há varias técnicas para o monitoramento de falhas incipientes em mancais de elementos rolantes, como curtose, fator de crista, pulso de choque e a técnica de ressonância em altas frequências (HFRT). Esta ultima é uma das melhores técnicas para monitoramento de vibrações em caixas de engrenagens e turbomáquinas, devido a sua capacidade de separar a vibração gerada por um rolamento de outras fontes de vibração da máquina. Os autores apresentam os conceitos básicos para aplicação desta técnica que, segundo eles, está centrada no fato de que, cada vez que um defeito em um rolamento entra em contato com outra superfície é gerado um impulso de vibração. Este impulso é extremamente rápido, de curtíssima duração, e sua energia é transmitida numa faixa larga de frequências com baixo nível de vibração. Assim, sua análise no espectro direto é encoberta por outras fontes. No entanto, o impacto excita as ressonâncias no sistema em altas frequências, que modificam a energia do sistema. Estas ressonâncias seriam a vibração dos elementos rolantes, entre as pistas interna e externa, vibração das próprias pistas, vibração dos mancais e vibração estrutural da máquina. As ressonâncias são moduladas em amplitude, com a característica das frequências dos defeitos. Estas por sua vez, dependem da localização e podem ser determinadas através de equações específicas. E em “*Vibration monitoring of rolling element bearings by the high frequency resonance technique a review*” MCFADDEN e SMITH [14] fazem a análise de um modelo para a vibração produzida por um único defeito em uma pista de um rolamento. Este modelo simula o comportamento de um único defeito, sendo que, quando este entra em contato com uma superfície produz um impacto. À medida que há a rotação do eixo, ocorrerá a repetição destes impulsos, com a frequência correspondendo ao local onde se encontra tal defeito. Os autores aplicam um filtro passa banda para eliminar boa parte das vibrações provenientes de outras fontes. Isto possibilita a análise do rolamento em uma máquina mais complexa. O sinal, depois de filtrado e demodulado por um detector de envelope é então obtido o espectro deste sinal.

Em 1985 MCFADDEN e SMITH [15], ampliam o estudo feito no trabalho anterior (MCFADDEN e SMITH [14]) para um sistema com vários defeitos. A análise é feita através da técnica de ressonância em altas frequências, sob carregamento axial. As frequências são independentes da posição onde se encontram, porém o ângulo de fase dos componentes está relacionado com estas posições. Pelo fato deste ângulo de fase se alterar, há situações onde componentes se cancelam e se somam, modificando o espectro. Os componentes relacionados às frequências de passagem dos elementos, são necessariamente as maiores em cada grupo.

MARTINS [16] em 1985 faz um estudo sobre o método da curtose e análise espectral para análise de vibrações em rolamentos, diagnóstico e avaliação. Apresenta um modelo simplificado para o modelo de um rolamento danificado. Os resultados alcançados em seus experimentos mostraram limitações do método da curtose. Para contornar as limitações, são propostos dois novos parâmetros que melhoraram a eficiência do método. É feita uma modelagem para o tratamento espectral. O autor afirma que um rolamento em boas condições deveria possuir curtose menor ou igual a 3.

VILLE em 1984 [17] desenvolve técnicas suplementares para a análise de sinais não estacionárias entre elas a Distribuição Wigner Ville (WVD) já que os impulsos vibratórios gerados por um defeito incipiente em um rolamento são dificilmente detectáveis com a FFT, pelo menos até que o defeito aumente significativamente, porque a FFT é incapaz de representar funções não periódicas de maneira precisa como os sinais que têm impulsos transientes.

WHITE [18] em 1991 utiliza a demodulação como ferramenta para manutenção preditiva. Utiliza esta técnica para superar a dificuldade encontrada de extrair informações do espectro direto, principalmente referentes a defeitos em estágio inicial de desenvolvimento. O conceito de modulação apresenta-se como uma solução para este tipo de dificuldade, praticamente eliminando as influências de outras fontes.

Este processo é não linear e resulta em outro sinal com novas frequências. Estas novas frequências são chamadas de bandas laterais. Em outras palavras, um sinal de alta frequência é modulado por um de baixa frequência, o primeiro conhecido como portadora e o segundo como moduladora. Este conceito é o mesmo aplicado em rádios AM. O processo de modulação sempre gera bandas laterais no espectro. Havendo a

presença de bandas laterais ocorrerá o processo de modulação. Um defeito produz um choque (curta duração), que excita as várias ressonâncias. Neste sentido, estas ressonâncias fazem o papel do sinal portador, e o choque devido ao defeito é papel do modulador.

MECHEFSKE e MATEHW [19] em 1994 fazem um estudo sobre detecção de falhas e diagnóstico em rolamentos de máquinas de baixa velocidade, utilizando o método de classificação por inferência indutiva. Os espectros de um rolamento são classificados segundo seu estado de conservação. Com base na análise destes espectros, quando comparados com o espectro de assinatura, pode-se caracterizar o estágio de falha do mesmo.

Em 1994 AZOVTSEV [20] realiza um trabalho em que o método proposto foi desenvolvido para identificar a presença, tipo e magnitude de defeitos em mancais de rolamento para o espectro de envelope de vibração aleatória. De modo automático, o Módulo de Diagnóstico de Rolamento (DREAM) pode ser utilizado para as análises de vibrações.

Em 1995 GRAPS [21] descreve novos métodos como a distribuição Choi-Williams (CWD) e a distribuição Cone-Shaped (CSD) para solucionar o problema de sobreposição no espectro, e erros nos cálculos de energia, especialmente para valores negativos da Distribuição Wigner-Ville (WVD) e o método de correlação.

BARKOV [22] em 1995 utilizam um método de medição simples para avaliar a condição e o tempo de vida de mancais de rolamento. No trabalho, os autores citam que há três vantagens principais desse método com relação aos outros métodos de diagnóstico utilizados com maior frequência. A primeira trata-se da alta sensibilidade do método, em que a modulação da vibração é produzida por um pequeno defeito com intensidade de aproximadamente 1%, é facilmente detectada. Anomalias severas são caracterizadas por intensidades de 10%. A segunda é a aptidão em se obter grande precisão na avaliação da condição de uma medição de vibração simples em um pequeno período de tempo. E, a terceira vantagem é que os requisitos para se realizar as medições não são muito restritos. Num caso simples, precisa-se medir a vibração na

faixa de frequência de 2 a 10 KHz, sem necessidade de comparação com resultados de medições anteriores.

LOGAN e MATHEW [23] estudam em 1995 a correlação na análise de falhas em máquinas rotativas. Os autores fazem uma abordagem sobre o comportamento caótico dos sinais adquiridos no domínio do tempo. Conceitos básicos sobre a teoria do caos são apresentados, os quais servem de base para quantificar a dimensão da correlação. Os resultados alcançados mostram que a correlação é potencialmente útil para o monitoramento de máquinas, principalmente em análise de falhas em rolamentos. Para comprovar esta afirmação, são apresentados resultados obtidos em experimentos com rolamentos autocompensados, nos quais foram inseridos defeitos. Os resultados aparecem na forma de gráfico de cores, definido como Dimensão Fractal versus Tipo de falha, onde as cores mais escuras definem o tipo de defeito do rolamento, se na pista interna, pista externa, elementos rolantes ou gaiolas. Esta técnica está em fase de estudos, mas com base nos resultados obtidos, os autores afirmam que esta técnica possui um futuro promissor na predição da degradação de rolamentos.

BAILIE e MATHEW [24] em 1995 fazem um estudo sobre a utilização da técnica de modelos autoregressivos, para diagnosticar falhas em rolamentos. Esta técnica utiliza poucos dados quando comparados aos métodos convencionais de análise. Os resultados deste tipo de tratamento de sinais mostram ser uma opção alternativa no diagnóstico de falhas em rolamentos, onde a quantidade de dados é limitada. Esta condição normalmente é encontrada em máquinas de baixa velocidade ou de velocidade variável, onde o tamanho da amostra é muito pequeno. Dentro deste conceito, os autores utilizam a técnica de redes neurais.

Em 1996 RANTALL e ME [25] fazem um estudo do efeito do mascaramento na análise digital do envelope do sinal de falha em rolamentos. Esta é uma análise quantitativa, onde os sinais dos defeitos são mascarados por sinais estranhos no resultado da análise do envelope. Eles mostram que o sinal de modulação corresponde ao sinal de falha, e recomendam a aplicação de um filtro passa banda para diminuir os efeitos de fontes estranhas. Com o processo de digitalização dos dados, o envelope é obtido através do equacionamento de Hilbert. A principal vantagem deste método, sobre o processamento digital, é que um efetivo filtro passa banda é também um filtro anti-

aliasing, em um analisador FFT. Esta técnica apresenta grande potencial no diagnóstico de falhas em rolamentos, pois produzem o efeito do mascaramento.

WANG e KOOTSOOKOS [26] em 1997 aplicam a autocorrelação do envelope como ferramenta para detectar e diagnosticar falhas em máquinas de baixa rotação. Através do estabelecimento de um modelo teórico para as falhas em rolamentos, os autores empregam o método de autocorrelação para obtenção de um padrão, que é comparado com resultados obtidos experimentalmente. Os resultados alcançados são bastante satisfatórios.

Em 1996 GADE e GRAM [27] fazem uma comparação da utilização da STFT, WVD e o próximo passo lógico na evolução do processamento de sinais, através da Transformada Wavelet, como sendo a técnica adequada para análise de sinais não estacionárias devido a que proporciona uma análise com múltipla resolução (no tempo e frequência) sendo especialmente útil para o diagnósticos de defeitos em mancais de rolamento.

SHIROISHI [28] em 1997 fazem um estudo sobre os métodos de detecção de defeitos em mancais de elementos rolantes, através dos sinais em alta frequência e emissão acústica. Os autores fizeram um comparativo entre o valor de pico, curtose e fator de crista. Dois tipos de sensores foram comparados, o acelerômetro e o microfone. Os resultados encontrados mostram que o microfone é mais sensível em defeitos na pista externa, já o acelerômetro mostrou-se igual ou superior sensibilidade, tanto para a pista externa quanto para pista interna. Nos experimentos, segundo os autores, a razão de pico mostrou ser um indicador mais realista para detecção da presença de defeitos entre os métodos testados. Apresentando boa correlação de dimensão do defeito, obedecendo a uma relação linear. Sendo esta técnica recomendada para detecção e localização de defeitos.

Em 1998 BAE [29] gera um filtro estatístico do sinal que dentro do sinal temporal exclui os picos de alta frequência, gerando assim, uma sinal apropriado para o análises das frequências dos elementos do rolamento e dos sinais dos defeitos localizados na pista ou esfera.

ANTONIOLLI [30] em 1999 faz um estudo comparativo das diversas técnicas de medição e análise dos sinais de vibrações, emitidos por rolamentos. Neste trabalho o autor afirma serem os sinais de vibrações, o melhor parâmetro para o monitoramento, e avaliação das condições dinâmicas de máquinas rotativas. Estuda-se as técnicas para implantação da manutenção preditiva, voltada a análise de vibrações, através das técnicas de análise mais comuns: nível global de vibrações, curtose, cepstrum, fator de crista e a técnica do envelope. O rolamento é ponto crítico e o maior causador de paradas. Em seu trabalho propõe-se uma maneira de calibração para a técnica do envelope, e verificando a sensibilidade entre os resultados obtidos com a técnica do fator de crista, análise espectral e envelope. O autor introduz a forma analógica e digital de detecção do envelope.

BARCLAY e WEI [31] em 1994 afirmam ser a técnica do envelope para diagnóstico de mancais de elementos girantes, uma abordagem incorreta. Pelo fato de não haver consistência teórica, por ignorar os fatores como a rigidez entre os vários tipos de mancais, as quais afetam a transferência de energia através da estrutura. Os autores afirmam que estes fatores são fundamentais para uma avaliação científica. Para justificar esta posição apresentam alguns problemas que ocorre com a técnica. Primeiro, os autores se apoiam em alguns relatos sobre dificuldades na obtenção de resultados, no quesito repetitividade. Segundo, o posicionamento dos transdutores quase sempre não é o mesmo, assim como outros ajustes não são os mesmos a cada leitura. Terceiro, afirmam que uma medida direta é sempre preferível a uma indireta, como é o caso do envelope de vibração.

COURRECH [32] em seu artigo publicado na revista Manutenção y Qualidade em 2000, esclarece algumas polêmicas criadas em torno da técnica do envelope. O autor após uma detalhada explicação, onde compara o espectro direto em banda estreita e o espectro do envelope, mostra a dificuldade em se detectar sinais de defeitos no primeiro caso, os quais estão bem explícitos no ultimo, ou seja, no envelope. Há pelo menos quatro enfoques sobre a análise do envelope, primeiro onde se faz uma seleção em torno da ressonância estrutural em altas frequências. Segundo, ao contrário da primeira a seleção se dá fora da ressonância estrutural na faixa mais plana do espectro. A terceira se aplica a uma análise ampla, sem ser seletiva. A última diz que a análise de envelope não funciona. O autor conclui afirmando que toda boa ferramenta deve ser utilizada

apropriadamente, como e o caso da Técnica do Envelope. Assim, com base nos vários estudos já realizados sobre este assunto e em sua experiência, o autor afirma que a técnica é eficiente para diagnosticar e avaliar as condições de mancal de elementos girantes.

BRIE [33] em 1999 faz uma modelagem para o sinal de vibrações de lascamento em rolamentos, propondo duas aproximações: a primeira, onde as características no domínio da frequência, com relação à distribuição do carregamento e a segunda, onde os parâmetros do sistema (massa, mola e amortecedor) sofrem uma variação linear. Os espectros são obtidos com base nos sinais de vibrações, através de acelerômetro, e nos sinais sonoros, através de microfone.

LI [34] em 2000 propõe um modelo para o monitoramento de rolamentos. Utiliza uma metodologia para determinar o tempo de vida remanescente de um rolamento, na qual os sinais de vibração são utilizados para avaliar a severidade do defeito. Um algoritmo foi desenvolvido para o tratamento mais refinado dos parâmetros (vibrações, propagação e outros), o qual possibilita monitorar a taxa instantânea de propagação dos defeitos, e assim, o comportamento dos mesmos. Através dos dados é possível obter uma maior precisão na determinação do tempo de vida remanescente dos rolamentos. Utiliza a FFT como extrator de sinais de vibração que são utilizados para depois treinar uma rede neural artificial.

Em 2000, PIÑEYRO [35] apresenta três modelos de análise espectral, os quais têm por objetivo detectar e diagnosticar defeitos localizados. Os métodos de análise são a análise de densidade do espectro de segunda ordem, a qual segundo os autores é uma poderosa ferramenta na detecção de picos e auxilia na análise clássica do espectro linear. A segunda técnica utilizada neste trabalho é o biespectro, o qual é aplicado na análise de detecção de pares de picos em fase quadrática, e devido a sua propriedade estatística de terceira ordem é capaz, segundo os autores, de eliminar o ruído de fundo. A outra técnica empregada neste trabalho é a utilização da transformada de Haar. Com a aplicação desta técnica é possível detectar os impactos gerados no início do desenvolvimento do defeito. Segundo os resultados alcançados pelos autores, estas técnicas são ferramentas que podem auxiliar na resolução de problemas de falhas em rolamentos. Elas permitem a redução de ruídos e de outras componentes de banda larga,

retendo sinais harmônicos praticamente puros, em especial aqueles referentes a falhas nos componentes de rolamentos.

PARKER [36] em 2000 afirma serem às análises de vibrações e emissão sonora os dois parâmetros principais para o monitoramento de componentes de máquinas rotativas. Os autores fazem um estudo sobre a influência do defeito no domínio do bi-espectro.

O bi-espectro é uma técnica estatística de terceira ordem, a qual ajuda a identificar pares de componentes espectrais relacionadas por fase, cuja utilidade se aplica a detecção e isolamento de falhas. Os autores apresentam os resultados obtidos na análise do bi-espectro na caixa de transmissão de dois helicópteros. Os resultados demonstraram a viabilidade do método, por reduzir influências de outras fontes de vibração, além de se manter invariável com a mudança do regime de operação do equipamento, tais como a variação do torque.

HO e RANDALL [37] em 2000 fazem uma modelagem para a análise de falhas em rolamentos como uma série de respostas impulsivas de um sistema com um grau de liberdade. O sinal de falha modelado foi utilizado para verificar a eficiência do sistema auto-adaptativo de cancelamento de ruído em conjunto com a técnica do envelope. Os autores apresentam esta técnica como uma forma de reduzir os efeitos do mascaramento no sinal de envelope, ainda remanescentes. O método para obtenção do envelope é através da transformada de Hilbert. Os autores investigam através da simulação digital as falhas em rolamentos, incluindo o fenômeno da flutuação randômica.

LI, CHOW, TIPSUWAN e HUNG [38] em 2000 desenvolvem um diagnóstico de falhas em mancais de rolamento de motores, utilizando rede neural artificial. Utilizou-se o software MotorSim do Matlab, para se simularem sinais de vibrações no domínio do tempo em diferentes condições de deficiência do rolamento. Os dados foram aplicados no treinamento de uma rede *feed-forward* de três camadas, utilizando-se o algoritmo de Levenberg Marquardt. Efetuaram-se medições em tempo real no mancal de rolamento de um motor, para se testar a eficiência de diagnose da rede, a qual mostrou-se apta para execução de tal tarefa.

Em 2002 MESQUITA [39] desenvolveu um trabalho no qual detecta falhas em rolamentos usando uma técnica de transformada tempo-frequência, comparando com a Técnica do Envelope. A análise de Envelope conseguiu identificar as componentes em frequência das falhas. Através da técnica de Wavelets, também foi possível identificar claramente as falhas através da visualização de um aumento de energia na região correspondente ao defeito. De forma semelhante, a técnica pseudo-Wigner também localiza os dois tipos de defeito através da visualização de um aumento de energia na região do plano tempo-frequência que corresponde à falha.

BEZERRA [40] em 2004 desenvolveu um estudo para detectar falhas em rolamentos por análise de vibração, através da aplicação de diversas técnicas, tanto as que ocorrem no domínio do tempo (Média absoluta, Nível global RMS, Fator de crista e Curtose), quanto as que ocorrem no domínio da frequência (Densidade espectral de potência, Envelope e Cepstrum). As técnicas foram aplicadas 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.

Para técnica de envelope e cepstrum, constatou-se que as variações de velocidade e do tamanho das falhas não tinham influência significativa nos resultados.

Os resultados obtidos mostraram que a técnica de envelope com filtro adaptativo possibilitava a obtenção de melhores resultados.

PURUSHOTHAM [41] em 2005 apresenta uma metodologia completa de análise de vibrações de um rolamento por meio da divisão de frequências, detectando o defeito localizado de forma incipiente e indicando a localização do defeito.

SANTOS [42] em 2006 utiliza a FRF como auxílio na Técnica do Envelope para identificar defeitos nos rolamentos. O trabalho foi realizado tendo por base um aplicativo desenvolvido no *software* MATLAB, o qual foi validado com a utilização de um moto-esmeril.

MEOLA, DUARTE e ASSUMPCÃO [43] em 2005 utilizaram lógica fuzzy e redes neurais probabilísticas como ferramentas de classificação da qualidade dos sinais de vibração coletados em um motor elétrico e um ventilador radial. Utilizaram-se teste de hipótese nula e gráficos Boxplot para a escolha, dentre os 159 parâmetros de

vibrações, os 6 melhores a serem aplicados no treinamento da rede neural e para a construção do projeto fuzzy. Comparando-se os resultados obtidos via rede PNN com os obtidos via lógica fuzzy, inferiu-se que não apresentaram diferenças significativas entre si. Ambos os meios de monitoramento mostraram-se bastante eficientes.

A curtose tem sido utilizada como uma medida da severidade das falhas em máquinas desde sua proposta por DYER e STEWART [44], nos anos 70. Essa, porém, mostrou apenas uma vaga sugestão de que os resultados mais claros podem ser conseguidos por filtragem usando faixas de frequência geralmente oitavas, sendo que o conceito de curtose espectral ainda não desenvolvido [45].

A curtose espectral (SK) foi utilizada pela primeira vez por DWYER [46] na década de 80 para a detecção de eventos impulsivos em sinais de sonar. Ela baseia-se na Transformada de Fourier curto período de tempo (STFT) (definida como o momento normalizado de quarta ordem da parte real da STFT) e dá uma medida da impulsividade de um sinal, como uma função da frequência [46], [47], [48]. OTTONELLO e PAGNAN [49] introduziram uma definição modificada para essa, que utiliza o momento de quarta ordem normalizado pela magnitude da STFT para estimar SK.

Recentemente, a SK tem atraído atenção, e foi redefinida por CAPDEVIELLE [50] e VRABIE [51] usando a teoria de estatística de ordem superior, como a normalização cumulativa de quarta ordem.

Finalmente uma compreensão da formulação e definição de SK para processos não estacionários é proposta por ANTONI [52] (ver seção 4.4.1). Isto preencheu as lacunas existentes nas definições anteriores e revelou muitas características úteis do SK e também ajudou na ligação entre conceitos teóricos com exemplos práticos e aplicações decorrentes da utilização de SK para detectar a presença de falhas nos rolamentos [53].

## Capítulo 3 - Mancais de Rolamento

A fricção sempre foi um grande obstáculo para enfrentar qualquer projeto da máquina. É uma das principais causas quando se trata questões como a eficiência energética ou o desgaste dos componentes, portanto influenciam fortemente nas ações de manutenção, visto que, ditos desgastes marcam os períodos de revisão e mudança, fatores que afetam o aspecto econômico.

Em particular, um dos componentes das máquinas que mais esforços e fricção suportam são os eixos e as árvores. Com a sofisticação das máquinas se conceberam elementos e técnicas específicas para realizar o trabalho de diminuição da fricção, em busca de menores coeficientes que promoveram os rendimentos para que evitassem o desgaste.

- **Lubrificação:** Inserir uma substância entre as partes móveis de uma máquina, criando uma película que impede o atrito (desgaste) dos componentes afetados. Elas podem ser sólidas (grafite), líquidas (óleo) ou gases (gás pressurizado) (Figura 1.1).
- **Mancal:** Permitem o movimento relativo em um ou dois graus de liberdade, limitando-o no outro, de modo que, a perda de energia e o desgaste sejam minimizados.



Figura 3.1. Mancal esférico [2].

- **Rolamentos:** Permite o movimento relativo entre dois elementos com o centro de rotação comum, Figura 3.2.



Figura 3.2. Rolamentos de esferas [2]

Os rolamentos começaram a ser utilizados com frequência na revolução industrial, após o fim da Segunda Guerra Mundial começaram a ser estudados e produzidos em massa, devido à incapacidade de construtores para criar rolamentos que poderiam competir com os mancais hidrodinâmicos.

Curiosamente, é notável o fato que Leonardo Da Vinci criou um modelo de rolamento e incluiu uma rudimentar gaiola para manter o espaçamento dos elementos, Figura 3.3.

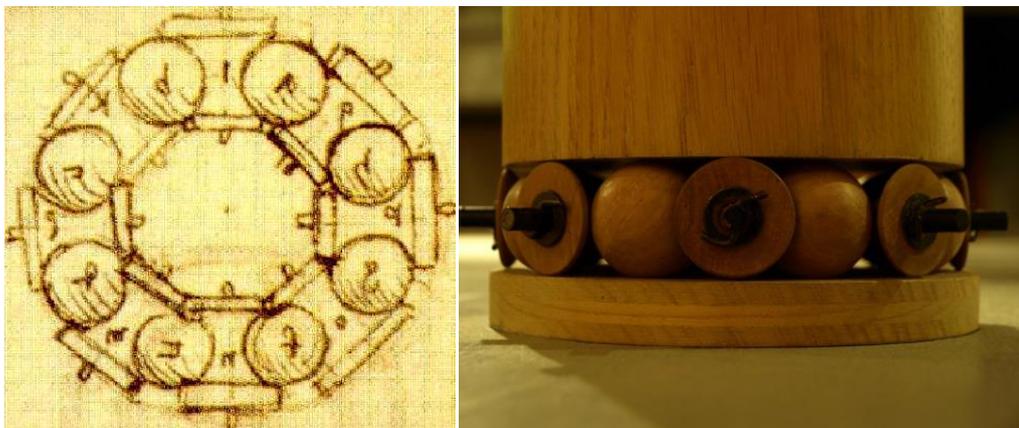


Figura 3.3. Rolamento de esferas de Leonardo da Vinci (Fonte: Google images).

Foi originalmente destinado apenas para que fossem instalados em turbinas de alta velocidade para aviões, mas sua evolução, características e padronização estenderam seu uso a praticamente qualquer máquina, com algum elemento que descreve um

movimento de rotação, cobrindo uma ampla gama de tamanhos, cargas e velocidades suportáveis e materiais de construção.

Estes elementos que facilitam o movimento entre um eixo e seu suporte recebem o nome de mancais anti-fricção ou rolamentos, uma vez que, sob o princípio de funcionamento é o rolamento. Existem outros tipos de mancais que também facilitam a rotação relativa entre dois elementos, chamados de mancais de deslizamento, mas eles operam sob um princípio diferente do rolamento (nestas as superfícies em movimento relativo, tem contato deslizante ao ficar separados por uma película lubrificante).

Os rolamentos são um dos componentes mais importantes na grande maioria das máquinas, por isso, eles são os elementos que geralmente têm um maior número de intervenções em um determinado período de tempo. Esse grande número de intervenções ocorre porque eles são componentes muito vulneráveis a ambientes sujos, desvios de eixo ou defeitos e é através do rolamento como se canalizam todos os esforços estáticos e dinâmicos do conjunto da máquina.

A sua função principal é apoiar ou dar suporte aos elementos portadores:

- Suporte de eixos – Pista interna fixa e pista externa móvel.
- Suporte de árvores – Pista externa fixa e pista interna móvel.

Estes rolamentos são projetados para que o atrito causado durante a rotação não seja de deslizamento (mancais), mas sim de rolamento, apresentando muitas características semelhantes aos mancais de fricção:

- Baixo atrito.
- Tolerâncias e acabamentos muito rígidos.
- Necessidade de uma montagem precisa.
- Sensível aos impactos, sobrecarga, umidade, sujeira...
- O ponto crítico dentro da máquina, tipicamente selecionado para fazer a manutenção.

Mas eles também têm muitas vantagens frente aos mancais de fricção como:

- O coeficiente de atrito é mais baixo, e também praticamente independente da velocidade e carga.
- Suporta carga axial.
- Alguns tipos são auto alinhamento.

E algumas desvantagens:

- Preço mais elevado.
- Montagem complexa.

O rolamento é composto basicamente de dois anéis ou pistas (pista interna e pista exterior) ou, no caso de rolamentos axiais, arruelas (arruela superior e arruela inferior), entre os quais os elementos rolantes (esferas ou rolos) se estendem pelas pistas de rolamento. Para evitar que os elementos rolantes interajam uns com os outros, eles são mantidos em gaiolas ou espaçadores, ver Figura 3.4:

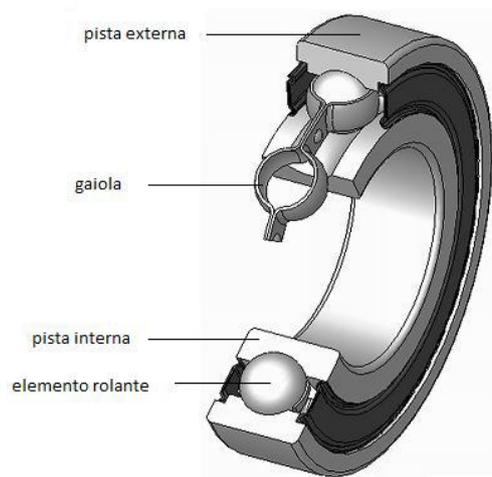


Figura 3.4. Rolamento de esferas seccionado (Fonte: Google images).

## **3.1 Tipos de Rolamentos**

Há três maneiras de classificar os rolamentos:

### **3.1.1 Segundo a Direção da Carga**

#### 3.1.1.1 Rolamentos Radiais

São aqueles que foram criados para resistir cargas em direção perpendicular ao eixo. Em geral são compostos por três partes: um anel externo, um anel interno e um elemento rolante com algum tipo de cesta ou gaiola. Por exemplo, as rodas de um automóvel são suportadas no chão e recebem carga no eixo, sendo assim, os rolamentos das rodas trabalham sob carga radial.

#### 3.1.1.2 Rolamentos Axiais

São aqueles que são desenhados para suportar cargas na mesma direção do eixo. Em geral consistem em três peças: um anel superior, um anel inferior e um elemento rolante com algum tipo de cesta. Por exemplo, pensamos em um carrossel, o peso total desta máquina atuando verticalmente para o chão e devendo rodar em torno a um eixo vertical, o anel superior segurando ao carrossel, cujo anel inferior está apoiado no chão.

#### 3.1.1.3 Rolamentos de contato angular

São uma mistura dos casos anteriores, baseados em um rolamento similar ao radial com um design especial dos anéis exterior e interior para suportar cargas axiais maiores que um rolamento radial simples. Suas aplicações são vastas, devido que um eixo sempre pode desenvolver cargas eventuais em uma direção inesperada e a economia que se gera ao colocar somente um.

## 3.1.2 Segundo a Rigidez do Rolamento

### 3.1.2.1 Rolamentos rígidos

Aqueles que não aceitam desalinhamentos do eixo. Geram cargas que podem danificar permanentemente o rolamento, ver Figura 3.5.



Figura 3.5. Rolamentos rígidos [2].

### 3.1.2.2 Rolamentos rotulados

São aqueles que, por um design especial dos anéis, permitem que o eixo gire alguns graus sem desmontar o rolamento. Esta funcionalidade é conseguida com uma pista de rolamento esférico que permite a movimentação e acomodação das esferas ao desalinhamento do eixo. Eles são amplamente utilizados em maquinaria pesada, devido à necessidade de evitar danos às deformações dos eixos, cargas provocadas pela expansão térmica e cargas dinâmicas.

## 3.2.3 Segundo o Elemento Rolante

Diversos elementos rolantes variam segundo as aplicações. Por exemplo, rolamentos rígidos de esferas podem suportar cargas radiais moderadas assim como cargas axiais pequenas. Possui baixa fricção e podem ser produzidas com uma grande precisão. Portanto, eles são preferidos para motores elétricos de pequeno e médio porte. Os rolamentos de cilindros podem suportar cargas radiais pesadas e é oscilante, o que permitem tomar flexões do eixo e pequenos desalinhamentos entre dois rolamentos que suportam o mesmo eixo. Essas propriedades os tornam muito populares para aplicações tais como: engenharia pesada, onde as cargas são fortes assim como as deformações

causadas pelas mesmas, em grandes máquinas também é comum certo desalinhamento entre suportes dos rolamentos.

### 3.1.3.1 Rolamentos rígidos de esferas

Eles são usados em uma grande variedade de aplicações. Eles são fáceis de desenhar, não separáveis, capazes de operar em alta velocidade e requerem pouca atenção ou manutenção em serviço. Estas características, juntamente com a sua vantagem de preço, os tornam os mais populares de todos os rolamentos.

Os mais utilizados são:

➤ Rolamentos rígidos de uma carreira de esferas

São particularmente versáteis, são de concepção simples, de tipo não separável, indicados para velocidades extremamente elevadas, resistentes no funcionamento exigindo pouca manutenção. As pistas profundas e a estreita conformidade entre as ranhuras das pistas e as esferas permitem que os rolamentos rígidos de esferas suportem, além de cargas radiais, cargas axiais em ambos os sentidos, mesmo em velocidades elevadas. Os rolamentos rígidos de uma carreira de esferas são o tipo de rolamento mais utilizado (Figura 3.6).



Figura 3.6. Vista explodida de um rolamento rígido de uma carreira de esferas [2].

➤ Rolamentos rígidos de duas carreiras de esferas

Os rolamentos rígidos de duas carreiras de esferas (Figura 3.7) correspondem em projeto aos rolamentos rígidos de uma carreira de esferas. As suas pistas são profundas e ininterruptas e possuem uma elevada conformidade entre as esferas e as pistas. Além das cargas radiais, conseguem suportar cargas axiais atuantes em ambas as direções. Os rolamentos rígidos de duas carreiras de esferas são muito adequados aos arranjos de rolamentos em que a capacidade de carga do rolamento de uma carreira é inadequada. Para os mesmos diâmetros externo e interno, os rolamentos de duas carreiras são ligeiramente mais largos do que os rolamentos de uma carreira.



Figura 3.7. Rolamento rígido de duas carreiras de esferas [2].

➤ Rolamentos rígidos de esferas com rasgos de entrada

Os rolamentos rígidos de uma carreira de esferas com rasgos de entrada possuem um rasgo de entrada em ambos os anéis interno e externo, permitindo incorporar esferas maiores e em maior quantidade que em rolamentos rígidos de esferas padrões. Os rolamentos com rasgos de entrada (Figura 3.8) apresentam uma capacidade de carga radial superior à dos rolamentos sem rasgos, no entanto, sua capacidade de carga axial é menor. Também não operam em temperaturas elevadas como os rolamentos sem rasgos.

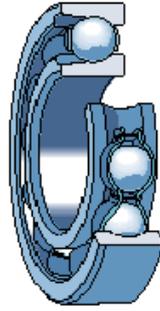


Figura 3.8. Rolamento rígido de uma carreira de esferas com rasgos de entrada [2].

### 3.1.3.2 Rolamentos de esferas de contato angular

Os rolamentos de esferas de contato angular possuem pistas condutoras nos anéis interno e externo, deslocadas uma em relação à outra, na direção do eixo do rolamento. Isso significa que eles são desenvolvidos para acomodar cargas combinadas, por exemplo, cargas axiais e radiais atuando simultaneamente. A capacidade de carga axial dos rolamentos de esferas de contato aumenta à medida que o ângulo de contato torna-se maior. O ângulo de contato  $\alpha$  é definido como o ângulo entre a linha unindo os pontos de contato da esfera e das pistas no plano radial, ao longo da qual a carga é transmitida de uma pista à outra, e uma linha perpendicular ao eixo do rolamento. (Figura 3.9).

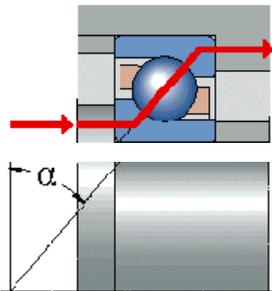


Figura 3.9. Ângulo de contato em rolamentos de esferas com contato angular [2].

Os mais utilizados são:

- Rolamentos de uma carreira de esferas de contato angular

Os rolamentos de uma carreira de esferas de contato angular (Figura 3.10) só podem acomodar cargas axiais atuantes em uma direção. Geralmente, um rolamento de uma carreira é ajustado em relação a outro rolamento.

Os rolamentos não podem ser separados e os anéis do rolamento apresentam um ressalto baixo e um alto. O ressalto baixo permite acrescentar um grande número de esferas ao rolamento, tornando a capacidade de carga do rolamento relativamente alta. Estes rolamentos são de design não desmontável.

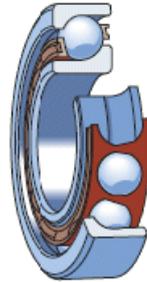


Figura 3.10. Rolamento de uma carreira de esferas de contato angular [2].

➤ Rolamentos de duas carreiras de esferas de contato angular

Os rolamentos de duas carreiras de esferas de contato angular (Figura 3.11) são iguais que os rolamentos rígidos de duas carreiras de esferas, e se utilizam quando a capacidade de carga de uma carreira é insuficiente porque estes têm uma capacidade de carga consideravelmente maior do que os rolamentos de uma carreira.

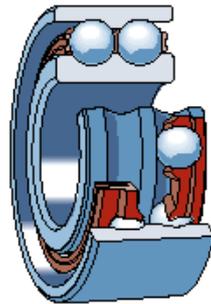


Figura 3.11. Rolamentos de duas carreiras de esferas de contato angular [2].

➤ Rolamentos de esferas de quatro pontos de contato

Os rolamentos de esferas de quatro pontos de contato (Figura 3.12) são rolamentos radiais de uma carreira de esferas de contato angular, com pistas que são desenhadas para suportar cargas axiais em ambas as direções. Para uma determinada carga axial, uma carga radial limitada pode ser suportada. Esses rolamentos ocupam

espaço axial consideravelmente menor do que os rolamentos de duas carreiras. Estes rolamentos tem um ângulo de contato de  $35^\circ$  ou  $45^\circ$ . O anel interno é dividido, isso permite acrescentar um grande número de esferas ao rolamento, fornecendo alta capacidade de carga. Os rolamentos são do tipo separável, isto é, o anel externo com o conjunto de esferas e gaiola pode ser montado de forma independente das duas metades do anel interno.



Figura 3.12. Rolamento de esferas de quatro pontos de contato [2].

### 3.1.3.3 Rolamentos de agulhas

Os rolamentos de rolos de agulhas são rolamentos com rolos cilíndricos de diâmetro pequeno. Apesar de sua baixa seção transversal, os rolamentos de rolos de agulhas possuem uma alta capacidade de carga, portanto, são extremamente indicados para arranjos de rolamentos, nos quais o espaço radial é limitado.

Os mais utilizados são:

➤ Conjunto de gaiola e rolos de agulhas

Os conjuntos, de gaiola e rolos de agulhas são componentes de rolamentos autônomos e prontos para montar. Eles são uma excelente escolha para aplicações que exigem um arranjo de rolamentos bastante rígido, bem como alta capacidade de carga. O eixo e o furo do mancal podem atuar como pistas, os conjuntos de gaiola e rolos de agulhas exigem um espaço radial mínimo (Figura 3.13).

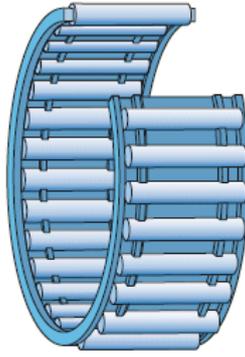


Figura 3.13. Conjunto de gaiola e rolos de agulhas [2].

➤ Rolamentos de agulhas com capa estampada

Os rolamentos de agulhas com capa estampada, como o nome sugere, são rolamentos de rolos de agulhas com um anel externo profundo e de parede fina com extremidade aberta ou fechada. Eles são caracterizados por uma altura transversal bastante baixa e alta capacidade de carga. Os rolamentos de agulhas com capa estampada costumam ser utilizados quando o furo do mancal não pode ser usado como pista para um conjunto de gaiola e rolos de agulhas, mas um arranjo de rolamentos econômico e bastante compacto é necessário (Figura 3.14).

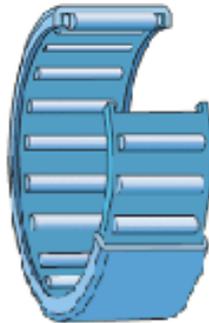


Figura 3.14. Rolamento de agulhas com capa estampada e extremidades abertas [2].

Os rolamentos de agulhas com capa estampada e com uma extremidade fechada são indicados para arranjos de rolamentos em pontas de eixos. O desenho perfilado da extremidade fechada acomoda forças de orientação axial pequenas. Geralmente, os rolamentos de agulhas com capa estampada são utilizados diretamente no eixo (Figura 3.15).

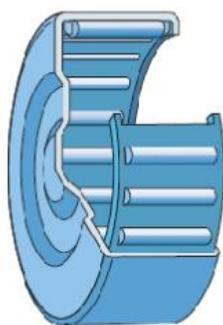


Figura 3.15. Rolamento de agulhas como capa estampada e com uma extremidade fechada [2].

A capa estampada de aço temperado e o conjunto de gaiola e rolos de agulhas desses rolamentos formam uma unidade não separável. O espaço disponível para lubrificante é suficientemente grande para permitir longos intervalos de relubrificação. Normalmente, os rolamentos de agulhas com capa estampada possuem uma única carreira de rolos. Os rolamentos de agulhas com capa estampada são montados com um ajuste interferente no furo do mancal. Portanto, não há necessidade de ressalto ou anéis de retenção para fixar o rolamento axialmente, de maneira que, o desenho do furo do mancal é simples e pode ser produzido de forma econômica. Para acomodar cargas radiais e axiais combinadas, um rolamento de agulhas com capa estampada pode ser combinado com um rolamento axial de rolos de agulhas com um anel de centragem.

➤ Rolamentos de rolos de agulhas com anéis usinados

Os rolamentos de rolos de agulhas com anéis usinados feitos de aço carbono-cromo para rolamentos que possuem baixa altura transversal e capacidade de carga muito alta para seu tamanho. Eles podem ser utilizados com ou sem anel interno, dependendo da aplicação.

Os rolamentos de rolos de agulhas sem anel interno (Figura 3.16) são uma excelente escolha para arranjos de rolamentos compactos nos quais o eixo pode ser temperado e retificado. Elimina a necessidade de separar o anel interno, permite um diâmetro maior do eixo em um arranjo mais rígido. O deslocamento axial do eixo em relação ao mancal é limitado somente pela largura da pista no eixo. Através da

usinagem das pistas do eixo de acordo com a precisão dimensional e de forma apropriada, é possível obter arranjos de rolamentos com elevada precisão de giro.

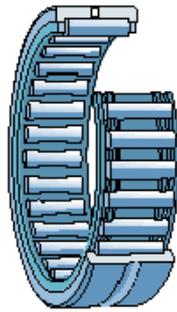


Figura 3.16. Rolamentos de rolos de agulhas sem anel interno [2].

Os rolamentos de rolos de agulhas com anel interno (Figura 3.17) são utilizados em arranjos nos quais não é possível ou não é economicamente viável temperar e retificar o eixo. Os rolamentos com anel interno só permitem o deslocamento axial do eixo em relação à caixa dentro de determinados limites. Se o deslocamento axial permitido proporcionado por um anel interno padrão não for suficiente, é possível utilizar um anel interno prolongado.

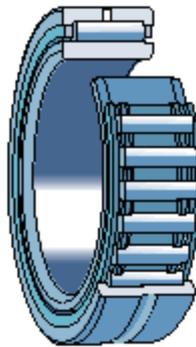


Figura 3.17. Rolamentos de rolos de agulhas com anel interno [2].

Para acomodar cargas radiais e axiais combinadas, rolamentos de rolos de agulhas de certos tamanhos podem ser combinados com rolamentos axiais de agulhas com um anel de centragem.

➤ Rolamentos de rolos de agulhas de alinhamento

Os rolamentos de rolos de agulhas de alinhamento possuem um anel externo com uma superfície externa esférica convexa. Dois anéis de assento de polímero com uma superfície interna esférica côncava e encapsulada em uma bucha de aço laminado trefilada são colocados sobre o anel externo permitindo que o rolamento alinhe a si próprio. Os rolamentos de rolos de agulhas de alinhamento são insensíveis ao desalinhamento estático do eixo em relação à caixa. É dada sem anel interno ou com anel interno. Os rolamentos sem anel interno (Figura 3.18) são a melhor solução para arranjos compactos nos quais o eixo pode ser temperado e retificado. Em aplicações nas quais não é possível ou não é econômico temperar e retificar o eixo deve-se usar rolamentos com anel interno.

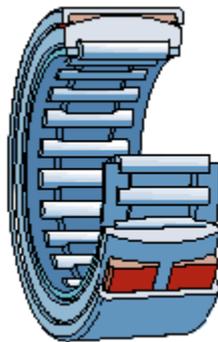


Figura 3.18. Rolamentos de agulhas alinháveis sem anel interno [2].

Os rolamentos com anel interno (Figura 3.19) permitem o deslocamento axial do eixo em relação ao mancal, dentro de determinados limites. Se houver deslocamentos axiais maiores previstos, é possível usar anéis internos prolongados, mais largos que os anéis internos padrão.

Os rolamentos são fornecidos sem graxa e não vedados. Dependendo da aplicação, eles podem ser lubrificados com graxa ou óleo.

As extremidades dos rolos de agulhas são levemente abauladas. A linha de contato modificada resultante entre os rolos e as pistas significa que a distribuição de cargas no rolamento é melhorada.



Figura 3.19. Rolamentos de agulhas alinháveis com anel interno [2].

#### 3.1.3.4 Rolamentos de rolos cônicos

Os rolamentos de rolos cônicos (Figura 3.20) têm pistas de anel internas e externas cônicas e rolos cônicos. Eles são adequados para suportar cargas combinadas, ou seja, cargas axiais e radiais atuando simultaneamente. As linhas de projeção das pistas convergem em um ponto comum no eixo do rolamento para oferecer movimento rolante autêntico e baixo atrito. A capacidade de carga axial dos rolamentos de rolos cônicos torna-se maior à medida que se aumenta o ângulo de contato. É comum ajustar um rolamento de uma carreira de rolos cônicos contra um segundo rolamento de rolos cônicos. Os rolamentos de uma carreira de rolos cônicos são separáveis, ou seja, o anel interno com conjunto de gaiola e rolos (cone) pode ser montado separadamente do anel externo.



Figura 3.20. Rolamento de rolos cônicos [2].

### 3.1.3.5 Rolamentos axiais de rolos cilíndricos

Os rolamentos axiais de rolos cilíndricos são adequados para arranjos destinados a suportar cargas axiais pesadas. Além disso, são relativamente insensíveis a cargas de choque, são muito rígidos e requerem pouco espaço axial. Em geral, esses rolamentos são de escora simples e podem suportar apenas cargas axiais atuantes em uma direção. São utilizados principalmente quando a capacidade de carga dos rolamentos axiais de esferas não é suficiente.

A superfície cilíndrica dos rolos é ligeiramente atenuada em direção às extremidades. O perfil de contato resultante praticamente elimina concentradores de tensões prejudiciais. Os rolamentos são separáveis, ou seja, os componentes individuais podem ser montados separadamente. (Figura 3.21).



Figura 3.21. Rolamentos axiais de rolos cilíndricos [2].

### 3.1.3.6 Rolamentos axiais autocompensadores de rolos

Os rolamentos axiais autocompensadores de rolos possuem pistas especialmente projetadas e contêm um grande número de rolos assimétricos. Os rolos têm conformidade ideal com as pistas da arruela para otimizar a distribuição de carga ao longo do comprimento do rolo. Portanto, eles podem suportar velocidades relativamente altas, cargas axiais pesadas em uma direção e cargas radiais pesadas. A carga é transmitida entre as pistas em um determinado ângulo com o eixo do rolamento. Os rolamentos axiais autocompensadores de rolos são insensíveis ao desalinhamento estático do eixo em relação ao mancal.

### 3.1.3.7 Rolamentos autocompensadores de esferas

O rolamento autocompensador de esferas possui duas carreiras de esferas e uma pista esférica comum no anel externo. Os rolamentos são conseqüentemente autocompensadores e insensíveis a deflexões do eixo e desalinhamentos angulares e do eixo relacionados ao mancal. Além disso, os rolamentos autocompensadores de esferas geram menos atrito que qualquer outro tipo de rolamento, o que permite que eles trabalhem com uma temperatura mais baixa, mesmo em altas velocidades.



Figura 3.22. Rolamento autocompensador de esferas [2].

### 3.1.3.8 Rolamentos de rolos cilíndricos

Os rolamentos de rolos cilíndricos normalmente compreendem de uma carreira de rolos com gaiola. Os rolamentos com gaiola podem suportar cargas radiais pesadas, acelerações rápidas e altas velocidades. Os rolamentos com número máximo de rolos são adequados para cargas radiais extremamente altas a velocidades moderadas.

### 3.1.3.9 Rolamentos autocompensadores de rolos

Os rolamentos autocompensadores de rolos possuem duas carreiras de rolos com uma pista esférica comum no anel externo e duas pistas no anel interno inclinadas em um ângulo em relação ao eixo do rolamento. O ponto central da esfera na pista do anel externo fica no eixo do rolamento. Portanto, os rolamentos são autocompensadores e insensíveis aos desalinhamentos do eixo em relação ao mancal, o que podem ser causado, por exemplo, por deflexões do eixo. Os rolamentos autocompensadores de

rolos são projetados para acomodar cargas radiais pesadas, assim como cargas axiais pesadas em ambas às direções.



Figura 3.23. Rolamento autocompensador de rolos [2].

#### 3.1.3.10 Rolamentos axiais de esferas de escora simples

Os rolamentos axiais de esferas de escora simples compreendem uma arruela de eixo, uma arruela da caixa de mancal e um conjunto de esferas e gaiola (Figura 3.24). Como o nome indica os rolamentos axiais de esferas de escora simples podem suportar cargas axiais e fixar um eixo axialmente, apenas em uma direção.

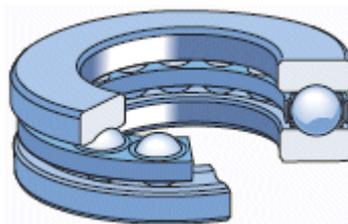


Figura 3.24. Rolamento axial de esferas de escora simples e arruela da caixa de mancal padrão [2].

## 3.2 Rolamentos Para Condições Especiais

### 3.2.1 Rolamentos híbridos

Os rolamentos híbridos (Figura 3.25) possuem anéis feitos de aço para rolamentos e corpos rolantes feitos de nitreto de silício com qualidade especial para rolamentos ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ). Como o nitreto de silício é um excelente isolante elétrico, os rolamentos híbridos podem ser usados para isolar efetivamente o mancal do eixo em motores CA e CC, assim como geradores.

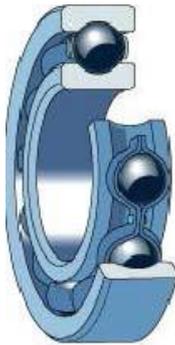


Figura 3.25. Rolamento híbrido [2].

Além de serem excelentes isolantes, os rolamentos híbridos têm capacidades de velocidade mais alta e proporcionam uma vida útil prolongada do rolamento, sob as mesmas condições operacionais dos rolamentos totalmente em aço com as mesmas dimensões. Os rolamentos híbridos também têm um excelente desempenho sob condições de vibração ou oscilação. Frequentemente, não é necessário pré-carregar o rolamento ou aplicar uma graxa especial sob essas condições.

### 3.2.2 Rolamentos com isolamento

Há risco para os motores elétricos, geradores e equipamentos associados quando uma corrente elétrica passa por um rolamento. Isso pode danificar as superfícies de contato dos corpos rolantes e pistas no rolamento (erosão elétrica) e degradar rapidamente a graxa. Um risco adicional para os motores e geradores elétricos advém das correntes de alta frequência, devido à capacitância parasita inerente. O risco de danos aumenta se a aplicação utilizar um inversor de frequência.

Para solucionar o problema foram desenvolvidos rolamentos que impedem que a corrente passe pelo rolamento. Os rolamentos são uma solução muito econômica em comparação a outros métodos de isolamento. Integrando as propriedades isolantes os rolamentos podem aumentar a confiabilidade e o tempo de funcionamento da máquina, praticamente eliminando o problema de erosão elétrica.

Este é um rolamento padrão com as superfícies externas de seus anéis interno ou externo pulverizadas com plasma de óxido de alumínio para a formação do revestimento. O revestimento é vedado com uma resina que protege contra os efeitos condutivos da água e umidade. O revestimento básico pode suportar tensões de até 1.000 V CC. Porém, revestimentos que suportam tensões de até 2.000, ou até mesmo 3.000 V CC.



Figura 3.26. Rolamento com isolamento [2].

### **3.2.3 Rolamentos para temperaturas extremas**

Para disposições de rolamentos que devem operar em temperaturas extremas (Figura 3.27) na margem de  $-150$  a  $+350$  °C ou que devem resistir a grandes diferenças de temperatura fazem com que os rolamentos normais não sejam adequados, para este fim se dá uma série de rolamentos a qual depende da aplicação.



Figura 3.27. Rolamento para temperaturas extremas [2].

Os produtos para temperaturas extremas incluem:

- Rolamentos rígidos de esferas (Figura 3.28 a)
- Rolamentos Y (Figura 3.28 b)
- Mancais de rolamento Y (Figura 3.28 c)
- Unidades flangeadas de rolamento Y



(a)

(b)

(c)

Figura 3.28. Rolamentos e mancais para temperaturas extremas [2].

### 3.2.4 Rolamentos com solid oil

Na maioria das aplicações, as graxas e óleos padrão proporcionam uma quantidade adequada de lubrificante ao rolamento. Porém, em casos nos quais a acessibilidade ao rolamento para fins de relubrificação é impraticável ou impossível, o Solid Oil é uma excelente solução (Figura 3.29).



Figura 3.29. Rolamento com Solid Oil [2].

O Solid Oil também pode ser usado com eficiência em aplicações nas quais a falha prematura do rolamento resulta de altos níveis de contaminação.

Condições típicas nas quais o Solid Oil é usado:

- Ambientes úmidos e sujos.
- Rolamentos de difícil acesso para relubrificação.
- Arranjos de eixo verticais.
- Aplicações expostas à força g.
- Aplicações nas quais há risco de falso brinelamento.
- Requisitos de higiene especiais.
- Movimentos oscilantes.

A maioria dos rolamentos de esferas e rolos SKF, assim como as unidades de rolamentos, pode ser fornecida com Solid Oil.

Alguns rolamentos de rolos de agulha e rolamentos com uma gaiola de grande volume são menos adequados para o Solid Oil, pois há muito pouco espaço livre para o óleo dentro do rolamento.

### 3.2.5 Rolamentos de material polimérico

Os rolamentos de esferas de polímero (Figura 3.30) consistem em:

- Anéis de polímero.
- Esferas feitas em aço inoxidável, vidro, polímero ou outros materiais.
- Uma gaiola de polímero.



Figura 3.30. Rolamentos de material polimérico [2].

Os rolamentos de esferas de polímero podem ser feitos em uma variedade de materiais e combinações de materiais. Os materiais selecionados dependem da aplicação. Os polímeros possuem propriedades significativamente diferentes do aço. Uma das propriedades mais exclusivas é a resistência à corrosão e a produtos químicos. Os polímeros utilizados na fabricação de rolamentos possuem baixo coeficiente de fricção e são altamente resistentes ao desgaste e à fadiga. Esses rolamentos autolubrificantes podem funcionar a seco, não exigindo nenhum relubrificante. No entanto, as cargas e as velocidades máximas que um rolamento de polímero pode acomodar são muito mais baixas do que as dos rolamentos convencionais, feitos totalmente em aço.

A alta resistência específica (proporção entre resistência e peso) é uma propriedade valiosa dos rolamentos de polímero, especialmente em aplicações nas quais o peso é uma consideração de projeto importante. Uma alta estabilidade dimensional por toda a vida útil é conseguida através da baixa tendência ao arrastamento dos polímeros utilizados.

Características e vantagens:

- Resistente à corrosão.
- Resistente a produtos químicos.
- Autolubrificante (não exige lubrificante algum).
- Leve (80% mais leve que o aço).
- Alguns podem ser utilizados em altas temperaturas.
- Baixo coeficiente de fricção.

- Giro silencioso.
- Boas propriedades de amortecimento.
- Isolante elétrico.
- Funções integradas para rolamentos especiais.
- Baixos custos de ciclo de vida.

### **3.2.6 Rolamentos com sensores**

As unidades de rolamentos monitorados são usadas para monitorar com precisão o status dos componentes lineares ou giratórios. Essas unidades são:

- Compactas.
- Robustas e confiáveis.
- Simples e prontas para montagem.

A seguir, é apresentada uma breve visão geral das soluções integradas de sensores desenhados. Essas soluções foram comprovadas em diversas aplicações industriais e automotivas, como motores elétricos, veículos elétricos, rolos compressores, tratores, empilhadeiras e esteiras transportadoras.

Usos típicos incluem:

- Gerenciamento de motores.
- Direção.
- Sensoriamento de velocidade e posição.
- Sensoriamento de temperatura e vibração.
- Medição da posição angular.



Figura 3.31. Rolamento com sensor [2].

### 3.2.7 Rolamentos Magnéticos

Um rolamento magnético é um tipo de rolamento que usa uma força magnética para suportar peças de máquinas, sem ter qualquer contato real com a peça em si, enquanto a máquina ainda está ligada. A força magnética é forte o suficiente para que ela levante uma pequena parte da máquina e permite que ela se mova enquanto ela está suspensa no ar. Isso elimina o atrito entre a peça e a máquina.

O uso de rolamentos magnéticos é essencial para todos os tipos de máquinas, na medida em que estes dispositivos fornecem a função de apoiar outra peça ou componente em uma posição desejada. Além disso, esses modelos de rolamentos também podem ser usados para apoiar um objeto de rotação ou eixo.

Algumas vantagens da utilização de um sistema de rolamentos magnéticos incluem o atrito praticamente inexistente aplicado às peças da máquina e a capacidade de trabalhar em um vácuo. Os rolamentos magnéticos também contam com a capacidade de trabalhar sem qualquer tipo de lubrificante. Estes rolamentos são importantes para algumas máquinas que não podem suportar outros modelos de rolamentos industriais.

No entanto, algumas desvantagens também existem. Para que os ímãs criem um forte elo, o suficiente para suspender e puxar a peça, eles precisam de uma fonte de energia constante que lhes é fornecida. Um sistema de back-up deve estar no local em

caso de avaria ou falha de energia enquanto a máquina está funcionando. Sem isso, em caso de queda de energia, os ímãs perderiam seu poder de atração e a peça suspensa viria a desabar.



Figura 3.32. Rolamento magnético [2].

### 3.3 Danos em Mancais de Rolamentos

Os rolamentos são um dos componentes mais importantes na imensa maioria das máquinas, exigindo-lhes uma grande capacidade de carga e a confiabilidade. Infelizmente, não tem uma vida infinita e, mais cedo ou mais tarde, acabam quebrando apesar de ser devidamente selecionados, lubrificados apropriadamente e não são usados de forma inadequada podendo durar tanto quanto as máquinas em que eles estão instalados. Este último não é sempre o caso, por várias razões se produzem falhas que exigem sua substituição, como mostra na Figura 3.33. Dada sua importância foram cuidadosamente estudados, o que permitiram dar-lhes uma vida de serviço comparável ao da máquina que os acolhe.

Cada um dos fatores que causam o mau funcionamento provoca seu próprio tipo de falha e imprimem seu padrão particular no rolamento. Portanto, na maioria dos casos, examinando um rolamento defeituoso é possível formar uma opinião sobre a causa da falha e tomar as medidas necessárias para prevenir a recorrência.

A vida de um rolamento pode ser definida como o número de revoluções que o rolamento realiza antes que ocorra uma falha incipiente. Isto não significa que o rolamento não pode ser usado depois.

O descascamento é um processo relativamente longo e persistente, manifestando sua presença pelo aumento dos níveis de ruído e vibração no rolamento. Portanto, como regra geral, há bastante tempo para se preparar para uma troca de rolamento. Mesmo nas condições mais favoráveis, um rolamento não pode trabalhar para sempre, porque, mais cedo ou mais tarde, ocorrerá a fadiga do material.

O período de tempo que decorre até o primeiro sinal de fadiga é função do número de revoluções que é submetido o rolamento e a magnitude da carga. No entanto, as grandes maiorias dos rolamentos não alcançam a vida nominal calculada. Isto pode ser devido a várias razões: lubrificação inadequada, cargas mais elevadas do que o previsto, selos ineficazes, ajustes demasiados fortes ou excessivos jogos internos etc.

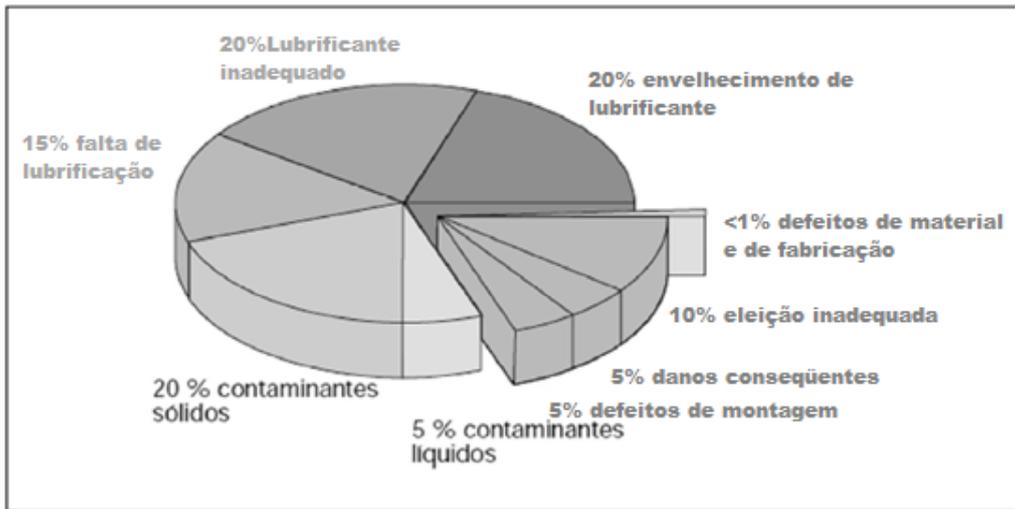


Figura 3.33. Causas dos defeitos nos rolamentos [3].

Cada uma das diferentes causas de falha dos rolamentos resulta em seus próprios danos característicos. Esses danos, conhecidos como danos primários, dão origem a danos secundários e induzem as falhas: descascamentos e rachaduras. Mesmo os danos primários podem exigir o descarte dos rolamentos em função de um excesso de folga interna, vibração, ruído, etc. Um rolamento com falha costuma apresentar uma combinação de danos primários e secundários.

Os tipos de danos podem ser classificados da seguinte forma:

**Tabela 3.1.** Classificação de tipos de danos em rolamentos.

<b>Danos primários</b>	<b>Danos secundários</b>
Desgaste	Descascamento
Endentações	Rachaduras
Espalhamento	
Fadiga superficial	
Corrosão	
Passagem de corrente elétrica	

### 3.3.1 Desgaste

Em condições normais, não existe desgaste apreciável nos rolamentos, no entanto, isto pode ocorrer como consequência da presença de partículas estranhas no rolamento quando a lubrificação é insatisfatória ou, devido à vibração em rolamentos que permanecem estacionários.

#### 3.3.1.1 Desgaste causado por partículas abrasivas

O desgaste devido à contaminação de partículas abrasivas, não ocorre apenas na superfície de deslizamento, mas também sobre as superfícies dos elementos rolantes. A quantidade de partículas se incrementa, gradualmente, à medida que o material vai se desprendendo das pistas de rolamento e gaiola. O desgaste se vai tornando em um processo acelerado, a ponto de inutilizar o rolamento. No entanto, não é necessário descartar os rolamentos ligeiramente desgastados já que podem ser utilizados novamente após uma boa limpeza. Estes defeitos são devido a uma falta de limpeza antes e durante a operação de montagem ou utilização de um lubrificante contaminado devido a partículas da gaiola de latão. O efeito geraria o aparecimento de pequenas endentações no contorno das pistas e elementos rolantes que dão superfícies opacas e desgastadas. Para evitar estes defeitos devemos desempacotar os rolamentos pouco antes de ser montado, manter limpa a oficina e usar ferramentas de limpeza, verificar e melhorar a vedação, e utilizar sempre lubrificante novo e limpo, limpando os lubrificadores e filtrando o óleo.

#### 3.3.1.2 Desgaste causado por lubrificação inadequada

Caso o lubrificante seja insuficiente ou se ele perdeu suas propriedades lubrificantes produzirá um contato metálico entre os elementos rolantes e pistas de rolamento (Figura 3.34). Os picos de rugosidade, restos do processo de fabricação, se desprendem e, ao mesmo tempo, se obtém certo efeito laminado. A fadiga superficial também pode surgir nesta fase. Se o lubrificante estiver completamente esgotado a temperatura vai subir rapidamente, então o material temperado é revenido e a superfície adquire tons entre o azul e marrom. A temperatura pode tornar-se suficientemente

elevada para provocar o gripado do rolamento. Para evitar tal defeito verifica-se se o lubrificante chega ao rolamento e dá-se relubrificação mais frequente.



Figura 3.34. Desgaste causado por uma lubrificação inadequada [2].

### 3.3.1.3 Desgaste causado por vibração

Quando um rolamento não vibra não se forma o filme de lubrificante entre os elementos rolantes e as pistas de rolamento. A ausência deste filme permite que o contato metálico e a vibração produzam pequenos movimentos relativos entre os elementos rolantes e os anéis (Figura 3.35). Como resultado deste movimento, se quebram pequenas partículas da superfície e isto leva à formação de depressões nas pistas de rolamento. Esta deterioração é conhecida como vibracorrosão (falsa impressão Brinell). As esferas produzem cavidades esféricas enquanto que os rolos produzem sulcos.



Figura 3.35. Anel interior e exterior de um rolamento de rolos cilíndricos expostos a vibrações [2].

Em muitos casos, é possível perceber ferrugem vermelha na parte inferior das depressões que é causada por oxidação (como um resultado da exposição ao ar) de

partículas retiradas que apresentam uma grande área em relação com seu volume. Nunca existe deterioração visível nos elementos rolantes, quanto maior é a energia de vibração, mais grave é a danificação. O período de tempo e a magnitude do jogo interno do rolamento também se faz notar, no entanto, as frequências das vibrações não parecem ter qualquer efeito significativo. Os rolamentos de rolos têm provado ser mais sensíveis a este tipo de dano que os rolamentos de esferas. Isso ocorre porque as esferas podem rolar em qualquer direção, enquanto os rolos podem rolar em uma única direção, e o movimento em outras direções se efetuam em forma de deslizamento. Os rolamentos deteriorados por vibração se encontram geralmente em máquinas que produzem vibrações. Para evitar este defeito se devem segurar o rolamento durante o transporte mediante pré-carga radial, fornecer uma base de anti-vibração, utilizar, se possível, rolamentos de esferas em vez de rolamentos de rolos e utilizar lubrificação por banho de óleo, se for possível.

### **3.3.2 Endentação**

As pistas e os corpos rolantes poderão sofrer endentação se a pressão de montagem for aplicada ao anel errado, de modo que, passe pelos corpos rolantes ou se o rolamento for sujeito a carregamento anormal enquanto não estiver em operação. Partículas estranhas no rolamento também causam endentações.

#### **3.3.2.1 Endentações causadas por falha na montagem ou sobrecarga**

Quando se produzem estes defeitos, a distância entre os pontos de contato é igual à do espaçamento dos corpos rolantes. Os rolamentos de esferas serão propensos a endentações se a pressão for aplicada ao passar pelas esferas durante as operações de montagem ou desmontagem. Os rolamentos autocompensadores de esferas são especialmente suscetíveis a danos nessas circunstâncias. Em rolamentos autocompensadores de rolos, os danos se originarão como espalhamento e, subsequentemente, se a pressão aumentar, ocorrerá uma moessa. As mesmas condições se aplicam a rolamentos de rolos cônicos que são pré-carregados incorretamente sem serem girados.

Os rolamentos que são montados com ajustes interferentes excessivamente pesados e rolamentos com furo cônico que são deslocados demais no assento ou na bucha do eixo também desenvolvem mossas.

Para evitar este defeito nos rolamentos, deve-se aplicar a pressão de montagem ao anel com o ajuste interferente evitando a sobrecarga ou usando rolamentos com classificações de carga estática maior.



Figura 3.36. Arruela de um rolamento axial de esferas sujeito a sobrecarga fora de operação. As endentações são estreitas e alinhadas radialmente, não esféricas como nos rolamentos radiais de esferas [2].

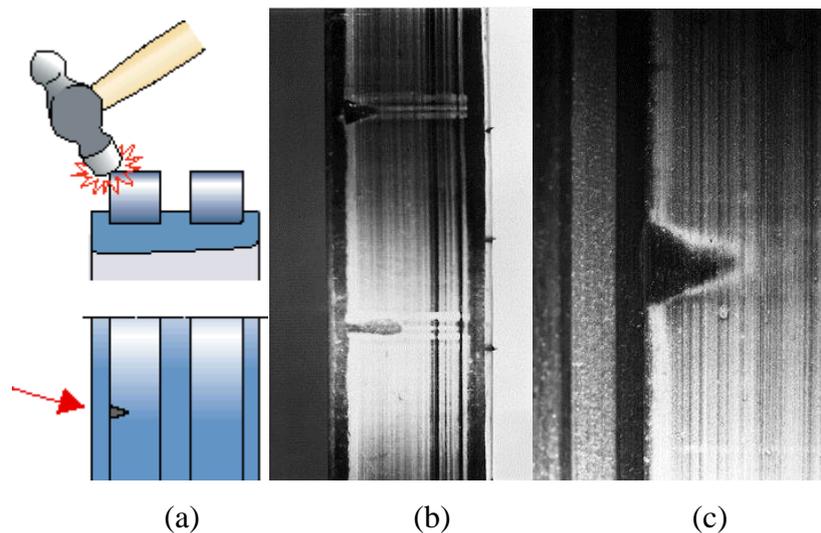


Figura 3.37. (a) Exemplo dos resultados de uma manipulação indevida em um rolamento de duas carreiras de rolos cilíndricos que sofreu impacto. (b) Uma visão de câmera periférica do rolo mostra duas endentações diametralmente opostas. (c) Por sua vez, o rolo endentou a pista do anel interno [2].

### 3.3.2.2 Endentação causada por partículas estranhas

Partículas estranhas, como limalhas e rebarbas, que conseguiram penetrar no rolamento causam endentações quando rolam para as pistas pelos corpos rolantes (Figura 3.38). As partículas que produzem endentações não precisam ser rígidas. Exemplos disso são pedaços finos de papel e fios de panos velhos usados para secagem. As endentações causadas por essas partículas são, na maioria dos casos, distribuídas por todas as pistas.

Para evitar este defeito nos rolamentos, deve-se observar a limpeza durante a operação de montagem utilizando lubrificante não contaminado.

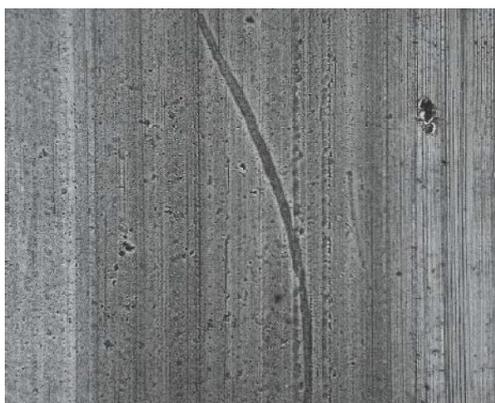


Figura 3.38. Endentações causadas por sujeira [2].

### 3.3.3 Espalhamento

O espalhamento é um fenômeno que ocorre quando duas superfícies lubrificadas deslizam uma contra a outra, baixa carga e o material que é transferido de uma para outra provocando um desgaste de superfícies. Quando isto ocorre, o material alcança altas temperaturas, geralmente levando ao revenir. Isto produz concentrações de fadiga localizadas que podem causar a fissuração ou descascamento. Nos rolamentos de rolos os deslizamentos se produzem principalmente entre superfícies no extremo de rolo-flange de guia. A adesão também pode surgir quando os rolos são submetidos à severa aceleração ao entrar na zona de carga. Se os anéis giram respeito a seu assento no eixo ou suportes, também podem causar aderências no furo, diâmetro exterior ou faces laterais dos referidos anéis. Nos rolamentos axiais de esferas, o espalhamento pode ocorrer se a carga é demasiadamente leve em comparação com a velocidade de rotação.

### 3.3.3.1 Espalhamento de extremos de rolos e flange de guia

Em rolamentos de rolos e cônicos, e em rolamentos de rolos com flanges de guia, podem produzir espalhamentos sob as faces de guia dos flanges e extremos dos rolos. Isto é atribuído à lubrificação insuficiente entre os flanges e rolos (Figura 3.39). Isso ocorre quando uma carga axial forte atua em um sentido durante um longo tempo, por exemplo, quando os rolamentos de rolos cônicos estão submetidos à excessiva pré-carga. Nos casos em que a carga axial muda de sentido, o espalhamento é menos comum, porque, quando o extremo do rolo fica descarregado há uma maior oportunidade para que o lubrificante entre. Mediante um lubrificante adequado pode-se evitar em grande parte estes espalhamentos.



Figura 3.39. Rolo cilíndrico com espalhamento no extremo, infligida por forte carga axial e lubrificação inadequada [2].

### 3.3.3.2 Espalhamento por patinado de rolos e pistas de rolamento

Em certas circunstâncias podem-se apresentar espalhamentos sob superfícies de rolos e em pistas de rolamento de rolos cilíndricos e autocompensadores (Figura 3.40). Isto se produz ao estar retardada a rotação dos rolos sem carga, quando estes não são conduzidos pelos anéis. Conseqüentemente sua velocidade de rotação é menor quando estão na zona com carga. Os rolos estão submetidos a uma rápida aceleração e o deslizamento resultante é tão grande que pode produzir espalhamento.

Estes defeitos se poderiam evitar utilizando um lubrificante mais adequado e reduzindo o jogo interno do rolamento.

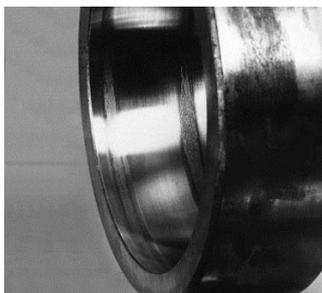


Figura 3.40. Espalhamento sob a superfície de um rolo de um rolamento autocompensador de rolos [2].

### 3.3.3.3 Espalhamento de pistas a faixas correspondentes ao espaçamento entre os rolos

Muitas vezes, quando os rolamentos de rolos cilíndricos estão sendo montados, o conjunto do anel com rolos e gaiola é introduzido de maneira inclinada chegando a girar. Então os rolos marcam a pista de rolamento do outro anel, em forma de linhas longas e transversais. Este tipo de falha pode ser evitado se o rolamento estiver lubrificado e um dos anéis se gira. Pode surgir um dano similar se os anéis do rolamento se montam com ajuste muito forte em relação ao jogo interno, como acontece com a pré-carga (Figura 3.40). Os traços de espalhamento (Figura 3.41) também podem aparecer entre as pistas de rolamentos autocompensadores de rolos ou cônicos. Estas linhas são o resultado de práticas inadequadas de montagem ou de práticas incorretas de montagem. Impactos fortes ou pressões aplicadas ao anel errado, sem girar o rolamento, fazem que os rolos produzam marcas transversais estreitas de espalhamento nas pistas de rolamento.

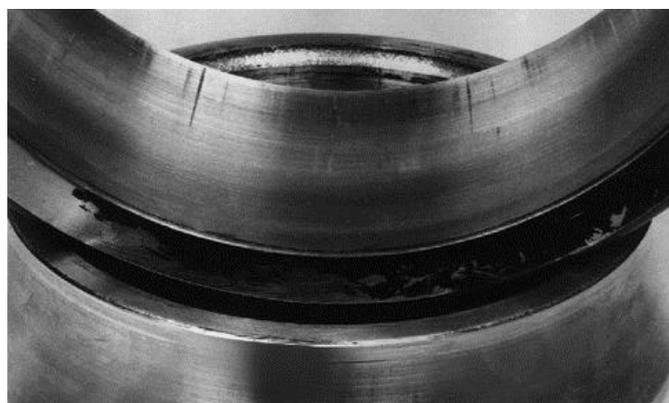


Figura 3.41. Pista de rolamento do anel exterior de um rolamento autocompensador de rolos com traços de espalhamento produzido por um golpe contra o anel interior [2].

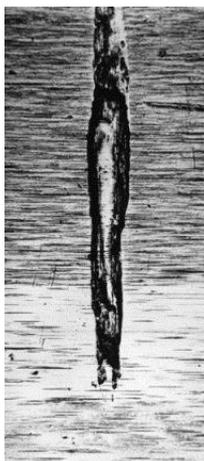


Figura 3.42. Detalhe de um dos traços de espalhamento [2].

#### 3.3.3.4 Espalhamento de superfícies externas.

O espalhamento pode aparecer sobre superfícies externas de rolamentos fortemente carregados. O espalhamento, neste caso, é o resultado de movimentos relativos entre o anel de rolamento e seu eixo ou suporte, produzindo uma superfície deteriorada e descolorida tanto na superfície externa do anel interno como do anel externo (Figura 3.43). Este espalhamento somente ocorrerá quando os ajustes estiverem estreitos como para impedir o movimento do anel com respeito a seu assento correspondente. Uma compressão axial mais forte não funciona.



Figura 3.43. Superfície exterior com espalhamento no anel exterior de um rolamento autocompensador de rolos [2].

### 3.3.3.5 Espalhamento de superfícies internas

Este tipo de espalhamento ocorre em rolamentos axiais de esferas quando a velocidade de rotação é fortemente alta em relação à carga (Figura 3.44) uma vez que a força centrífuga impulsiona as esferas para a parte externa dos caminhos de rolamento onde as esferas não rolam satisfatoriamente pelas pistas. Isto leva à formação de marca diagonal na parte externa das pistas de rolamentos. Tal deterioração pode ser evitada submetendo ao rolamento a uma carga adicional como, por exemplo, a aplicação de molas.

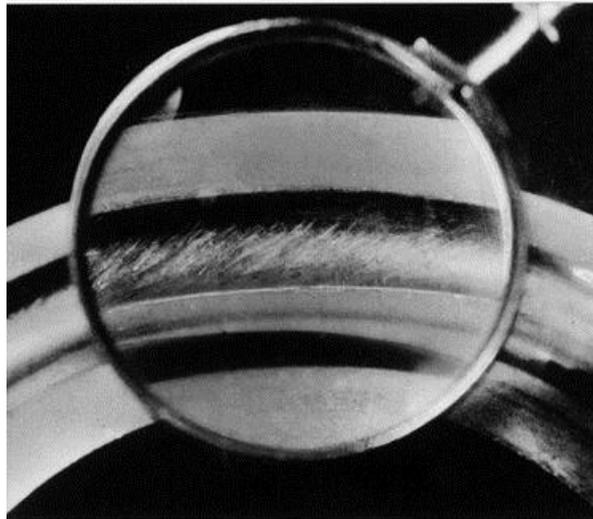


Figura 3.44. Caminho de rolar de rolamento axial de esfera com marcas devido a uma velocidade de giro demasiadamente elevada em relação com a carga [2].

### 3.3.4 Fadiga superficial

Se o filme lubrificante entre as pistas de rolamentos e os elementos rolantes chega a ser extremamente fina, as cristas de asperezas superficiais entram momentaneamente em contato entre si, então, se produzem pequenas rachaduras na superfície, o qual se conhece como fadiga superficial (Figura 3.45). Estas rachaduras não devem ser confundidas com as rachaduras de fadiga, que se originam debaixo da superfície e levam ao descascamento, as rachaduras de fadiga superficial são microscopicamente pequenas e crescem gradualmente até um tamanho que interfere na maneira de rolar o rolamento. Estas rachaduras podem acelerar a formação de rachaduras de fadiga abaixo da superfície, sendo assim, encurta a vida do rolamento. Se a lubrificação for mantida

satisfatória, ou seja, o filme lubrificante não chega a ser muito fino, não existe o risco de fadiga superficial.



Figura 3.45. Fadiga superficial em forma de uma faixa em torno o rolo de um rolamento autocompensador de rolos [2].

### 3.3.5 Corrosão

Haverá formação de corrosão se água ou agentes corrosivos atingirem o interior do rolamento em tal quantidade que o lubrificante não possa fornecer proteção às superfícies de aço, como se mostram nas figuras (Figuras 3.46, 3.47 e 3.48). Esse processo logo leva à ferrugem profundamente incrustada. Outro tipo de corrosão é a corrosão por contato.



Figura 3.46. Corrosão no anel interior de um rolamento cônico. A corrosão tem um espaço equivalente a distancia entre elementos rolantes. A corrosão é produzida pela presença de água no lubrificante [2].



Figura 3.47. Corrosão no anel interior de um rolamento autocompensador de rolos, produzido pela entrada de água no rolamento [2].



Figura 3.48. Corrosão no anel exterior de um rolamento cônico. A corrosão tem um espaço equivalente à distância entre elementos rolantes. A corrosão é produzida pela presença de água no lubrificante [2].

#### 3.3.5.1 Ferrugem profundamente incrustada

Uma fina película protetora de óxido se forma em superfícies limpas de aço expostas ao ar. Porém, esse filme não é impenetrável, e, se água ou elementos corrosivos entrarem em contato com as superfícies de aço, haverá formação de faixas de corrosão. Esse desenvolvimento logo leva à ferrugem profundamente incrustada.

A ferrugem profundamente incrustada é um grande perigo para os rolamentos, pois pode dar início a descascamento e rachaduras. Líquidos ácidos corroem o aço rapidamente, enquanto soluções alcalinas são menos perigosas. Os sais que estão presentes na água potável constituem, em combinação com a água, um eletrólito que causa corrosão galvânica, conhecida como corrosão por água. Portanto, a água salgada, assim como a água marinha, é altamente perigosa para os rolamentos.

Estes defeitos se poderiam evitar aprimorando a vedação e utilizando um lubrificante com melhores propriedades inibidoras de ferrugem.

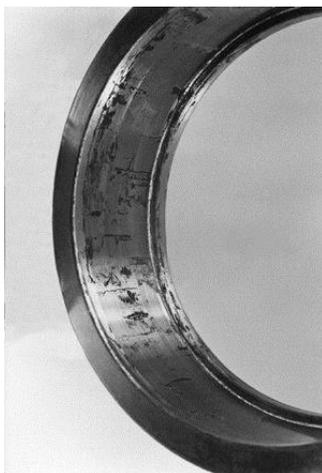


Figura 3.49. Ferrugem profundamente incrustada no anel externo de um rolamento de rolos cilíndricos [2].

### 3.3.5.2 Corrosão por contato

Se o filme fino de óxido for penetrado, a oxidação entrará mais ao fundo no material. Um exemplo disso é a corrosão que ocorre quando há movimento relativo entre o anel do rolamento e o eixo ou o mancal, porque o ajuste está solto demais. Esse tipo de dano é chamado de corrosão por contato e pode ser relativamente profundo em alguns locais. O movimento relativo também pode fazer com que pequenas partículas do material se desprendam da superfície. Essas partículas se oxidam rapidamente quando expostas ao oxigênio na atmosfera.

Como resultado da corrosão por contato, os anéis dos rolamentos podem não ter um apoio uniforme, o que tem um efeito prejudicial sobre a distribuição de carga nos rolamentos. Áreas enferrujadas também agem como entalhes de fratura. Este defeito se poderia evitar com ajuste os assentos.

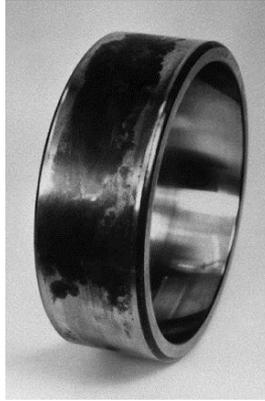


Figura 3.50. Corrosão por contato no anel externo de um rolamento autocompensador de rolos [2].

### 3.3.6 Avaria produzida por passagem de corrente elétrica

Quando uma corrente elétrica passar por um rolamento, ou seja, passar de um anel ao outro através dos corpos rolantes, ocorrerão danos. Nas superfícies de contato, o processo é semelhante à soldagem elétrica por arco. O material é aquecido a temperaturas entre níveis de têmpera e fusão. Isso leva ao aparecimento de áreas desbotadas de tamanho variado, onde o material foi temperado, recimentado ou derretido. Também podem se formar pequenas crateras, onde o metal derreteu. A passagem de corrente elétrica frequentemente leva à formação de estriamento (enrugamento) em pistas de rolamentos. Os rolos também estão sujeitos ao estriamento, enquanto houver apenas uma descoloração escura das esferas.

Pode ser difícil distinguir entre danos causados por corrente elétrica e por vibração. Uma característica do estriamento causado por corrente elétrica é o fundo escuro dos enrugamentos (Figura 3.51), em oposição à aparência brilhosa ou enferrujada no fundo do estriamento induzido por vibração. Outra característica é a falta de danos aos corpos rolantes de rolamentos com estriamento na pista causado por vibrações.

Tanto a corrente contínua quanto a corrente alternada podem causar danos aos rolamentos. Mesmo correntes de baixa amperagem são perigosas. Rolamentos sem rotação (Figura 3.52) são muito mais resistentes a danos por corrente elétrica do que rolamentos em rotação. A extensão dos danos depende de uma série de fatores:

intensidade e duração da corrente; carga, velocidade e lubrificante do rolamento. A única forma de prevenir danos dessa natureza é evitar que haja passagem de corrente elétrica pelo rolamento.



Figura 3.51. Estriamento, causado pela passagem de corrente elétrica, no anel externo de rolamento autocompensador de rolos [2].

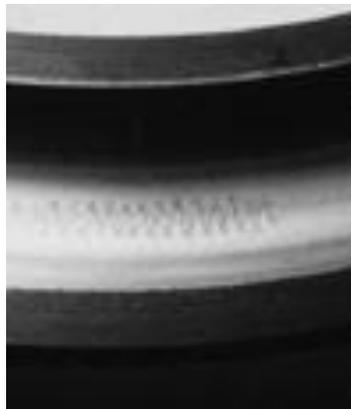


Figura 3.52. Rolamento rígido de esferas com danos causados por corrente elétrica em padrão de zigue-zague. Supõe-se que, queimaduras dessa configuração ocorram quando a passagem momentânea de corrente de alta amperagem é acompanhada de vibração axial [2].

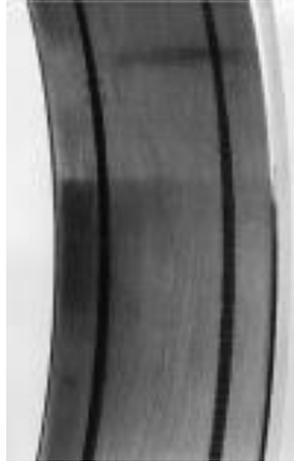


Figura 3.53. O anel externo de um rolamento autocompensador de esferas danificado por corrente elétrica [2].

### 3.3.7 Descascamento

O descascamento ocorre como resultado de fadiga normal, isto é, o rolamento atingiu o fim de sua vida útil normal. No entanto, essa não é a causa mais comum de falha do rolamento. O descascamento detectado nos rolamentos normalmente pode ser atribuído a outros fatores. Se o descascamento for descoberto em um estágio inicial, quando o dano ainda não é extenso, geralmente é possível diagnosticar a causa e adotar a ação necessária para evitar a recorrência do problema.

Quando o descascamento chegou a um determinado estágio, sua presença é identificada na forma de ruídos e vibrações, que servem de aviso de que é hora de trocar o rolamento.

As causas do descascamento prematuro podem ser carga externa mais pesada do que previsto, pré-carregamento devido a ajustes incorretos ou deslocamento excessivo em assento cônico, distorção oval devido à perda de circularidade do assento do eixo ou do mancal, compressão axial, por exemplo, como resultado de expansão térmica. O descascamento também pode ser causado por outros tipos de danos, como endentações, ferrugem profundamente incrustada, danos por corrente elétrica ou espalhamento.

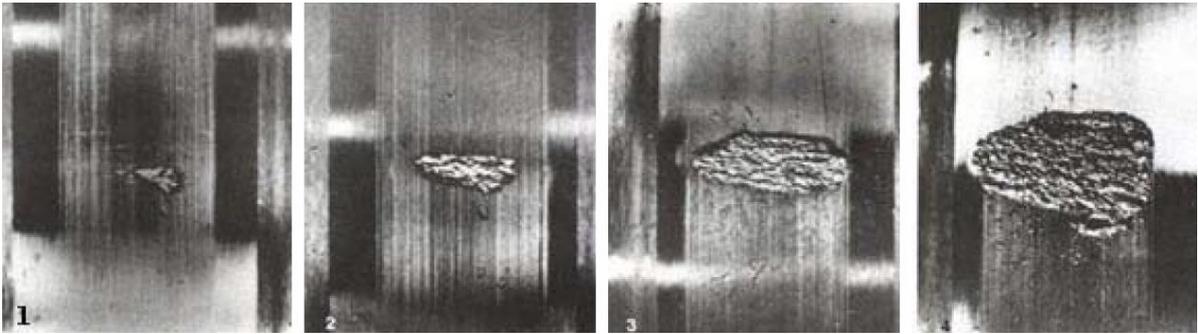


Figura 3.54. Fases progressivas de descascamento [2].

### 3.3.7.1 Descascamento causado por pré-carregamento

Neste tipo de descascamento se dá um padrão de carga bastante marcado nas pistas. O descascamento geralmente ocorre na zona de carga mais pesada. A causa é o pré-carregamento devido a ajustes apertados demais, excesso de deslocamento em assento cônico, rolamentos de uma carreira de esferas de contato angular ou rolamentos rolos cônicos ajustados para dar pré-carga excessiva, ou diferencial de temperatura entre os anéis interno e externo é grande demais (Figura 3.55).



Figura 3.55. Descascamento causado por cargas pesadas e lubrificação inadequada [2].

### 3.3.7.2 Descascamento causado por compressão oval

A aparência apresenta um padrão de caminho bastante marcado em duas seções diametralmente opostas em qualquer anel do rolamento, causados por eixo oval ou assento de mancal oval (Figura 3.56). A ação a tomar geralmente é fabricar um eixo novo ou um mancal novo para corrigir esse defeito. Uma alternativa é borrifar metal nos

componentes e, a seguir, retificar. Se for uma questão de eixo oval com o rolamento montado em uma bucha, é possível ajustar o eixo por retificação em determinados casos.

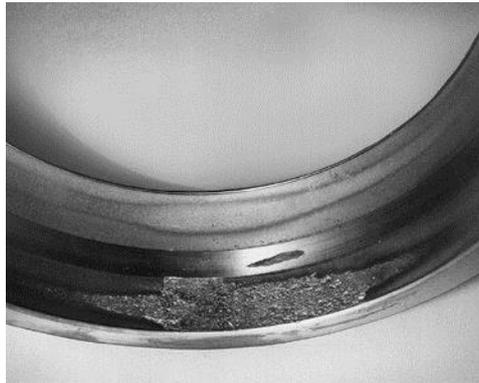


Figura 3.56. Descascamento causado por furo em mancal oval [2].

### 3.3.7.3 Descascamento causado por compressão axial

Para este tipo de descascamento, dependendo do tipo de rolamento ao que este danificado pode apresentar vários aspectos:

- Rolamentos rígidos de esferas: padrões de caminho bastantes marcados deslocados para um lado dos dois anéis.
- Rolamentos autocompensadores de esferas e rolamentos autocompensadores de rolos: padrões de pista severamente marcados de uma carreira dos corpos rolantes. (Figura 3.57).

Este defeito é produzido por uma montagem incorreta que resulta em carga axial, por exemplo, pré-carregamento excessivo de rolamentos de esferas de contato angular. Também pode ser causado se o diferencial de temperatura entre o eixo e o mancal não puder ser reduzido, oferecendo maior liberdade de movimento. Para evitar estes descascamentos tem-se que verificar os ajustes durante a montagem dos rolamentos, verificar o ajuste e lubrificar as superfícies.

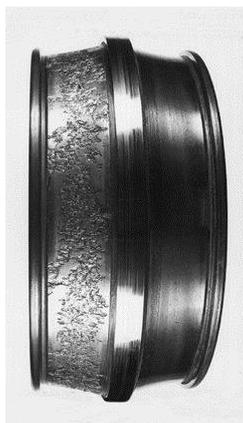


Figura 3.57. Descascamento em anel interno de um rolamento autocompensador de rolos. A extensão do descascamento ao redor de uma pista inteira indica que a carga axial foi muita pesada em relação à carga radial [2].

### 3.3.8 Descascamento causado por desalinhamento

Para este tipo de descascamento, igualmente que o anterior pode apresentar vários aspetos dependendo do tipo de rolamento:

- Rolamentos rígidos de esferas: padrão de caminho diagonal, severamente marcado nas duas seções diametralmente opostas.
- Rolamentos de rolos cilíndricos: descascamento na borda da pista.

Este descascamento se dá por assentos do rolamento fora de alinhamento.

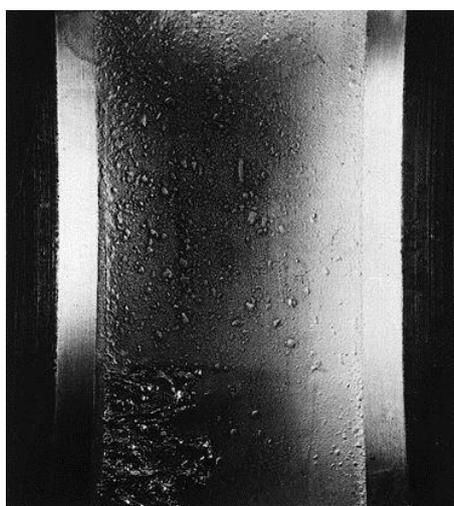


Figura 3.58. Anel interno do rolamento de rolos cilíndricos com descascamento em um lado da pista, como resultado de sobrecarga devido a desalinhamento [2].

### 3.3.8.1 Descascamento causado por endentações

Este tipo de descascamento é produzido por endentações resultantes de prática de montagem defeituosa ou sobrecarga do rolamento fixo ou endentações feitas por partículas estranhas.



Figura 3.59. Descascamento causado por endentações [2].

### 3.3.8.2 Descascamento causado por espalhamento

Este tipo de descascamento é produzido por espalhamento deslizante, espalhamento transversal resultante de prática de montagem defeituosa dando descascamento no início da zona de carga em pistas de rolamentos de rolos ou coincidindo com espaçamento dos rolos, em pistas de rolamentos de rolos.

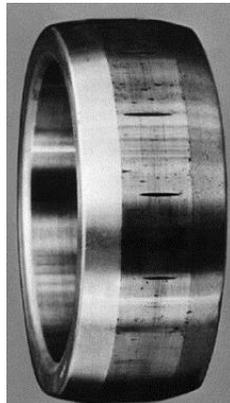


Figura 3.60. Anel interno de um rolamento de rolos cilíndricos com espalhamento, em intervalos correspondentes ao espaçamento dos rolos, causado por montagem incorreta [2].

### 3.3.8.3 Descascamento causado por ferrugem profundamente incrustada e por corrosão por contato

Este tipo de descascamento é originado por ferrugem profundamente incrustada ou por corrosão por contato dando descascamento na pista do anel interno ou externo.

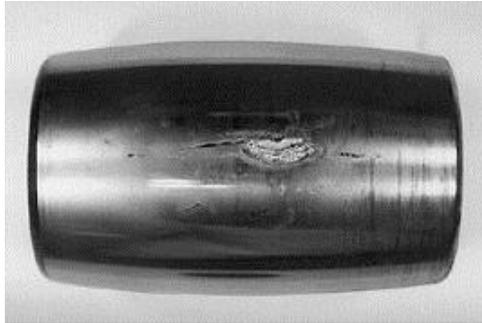


Figura 3.61. Descascamento com origem em ferrugem profundamente incrustada no rolo de um rolamento autocompensador de rolos [2].



Figura 3.62. Descascamento nas pistas do anel externo de um rolamento autocompensador de rolos. Área correspondente de corrosão por contato avançada na superfície externa (para esta foto, o anel foi colocado na frente de um espelho) [2].

### 3.3.8.4 Descascamento causado por estriamento ou crateras

Este tipo de descascamento é originado por desgaste resultante de vibrações enquanto o rolamento não estava em operação ou por danos por corrente elétrica, dando-se descascamento em conjunto com estriamento ou crateras brilhosas ou corroídas como escuras ou queimadas.



Figura 3.63. Descascamento causado por crateras por passagem de corrente elétrica [2].

### 3.3.9 Rachaduras

Pode haver formação de rachaduras nos anéis dos rolamentos por diversos motivos. A causa mais comum é o tratamento inadequado durante a montagem ou desmontagem dos rolamentos. Golpes de martelo, aplicados diretamente sobre o anel ou usando-se uma talhadeira dura, podem causar a formação de pequenas rachaduras, resultando na quebra de pedaços do anel quando o rolamento é colocado em operação.

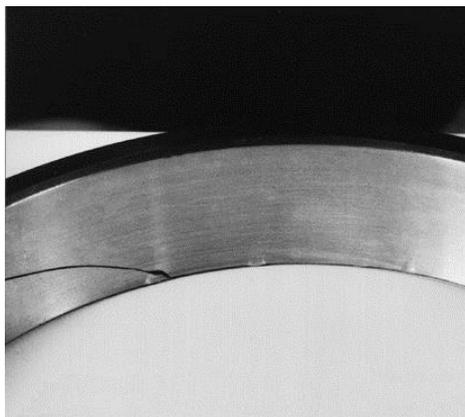


Figura 3.64. Anel externo fraturado de um rolamento autocompensador de esferas. As endentações visíveis na borda inferior do anel foram causadas por tratamento inadequado, e a rachadura teve origem em uma dessas endentações [2].

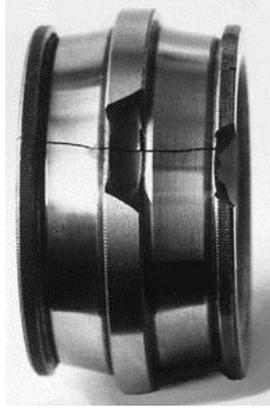


Figura 3.65. Rachadura em anel interno de um rolamento autocompensador de rolos [2].

Um rolo foi removido para que a pista à esquerda da foto pudesse ser examinada. O rolo foi recolocado com ajuda de um martelo, causando o desprendimento de parte do flange centrado. Os impactos foram transmitidos por um rolo na outra carreira e parte do flange externo também se desprendeu. Ao mesmo tempo, o anel rachou por completo.

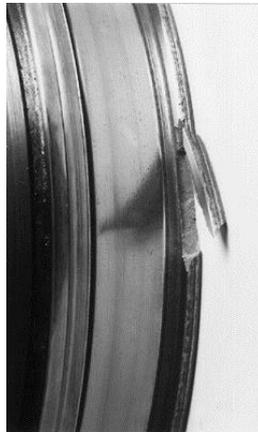


Figura 3.66. Anel interno de um rolamento autocompensador de rolos com fratura no flange externo produzida por martelamento direto [2].

O deslocamento excessivo em um assento cônico é outra causa de rachadura no anel. Os esforços de tensão, que surgem nos anéis por consequência de deslocamento excessivo, produzem rachaduras quando o rolamento é colocado em operação. O mesmo resultado pode ser obtido quando os rolamentos são aquecidos e, a seguir, montados em eixos fabricados com as tolerâncias incorretas.

O espalhamento descrito em uma seção anterior também pode produzir rachaduras em ângulos retos em relação ao deslizamento. Rachaduras desse tipo produzem fraturas nos anéis como se pode observar na figura 3.26.

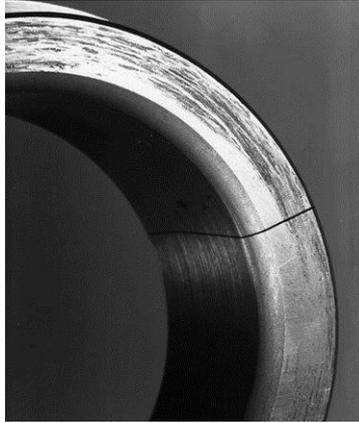


Figura 3.67. Anel interno do rolamento autocompensador de rolos que rachou por completo após espalhamento de uma face. O anel foi montado para servir de encosto a um espaçador que não teve ajuste suficientemente apertado no eixo. Consequentemente, o espaçador girou em relação ao eixo e ao anel do rolamento [2].

O descascamento, seja qual for o motivo pelo qual ocorreu, age como um entalhe de fratura e pode levar à rachadura do anel do rolamento. O mesmo se aplica à corrosão por contato, dando-se as rachaduras transversais nos anéis internos e rachaduras geralmente longitudinais nos anéis externos, em conjunto com corrosão por contato, como se pode observar na figura 3.27 e 3.28.



Figura 3.68. Anel interno do rolamento autocompensador de rolos com corrosão por contato e rachadura transversal por todo o anel. A corrosão por contato causou a rachadura [2].



Figura 3.69. Rachadura longitudinal no anel externo do rolamento rígido de esferas com corrosão por contato [2].

### 3.3.10 Danos à gaiola

Se ao examinar um rolamento com falha, a gaiola estiver danificada, em muitos casos pode ser difícil determinar a causa. Geralmente, outros componentes do rolamento também estão danificados, o que dificulta ainda mais descobrir o motivo do problema. No entanto, existem certas causas principais de falha na gaiola, por exemplo, vibração, excesso de velocidade, desgaste e obstrução. Excesso de acelerações induzidas por impacto (situação de martelamento).

#### 3.3.10.1 Vibração

Quando um rolamento é exposto à vibração, as forças de inércia podem ser tão grandes que causam rachaduras por fadiga no material da gaiola após um determinado período (Figura 3.29). Mais cedo ou mais tarde, essas rachaduras levam à fratura da gaiola.

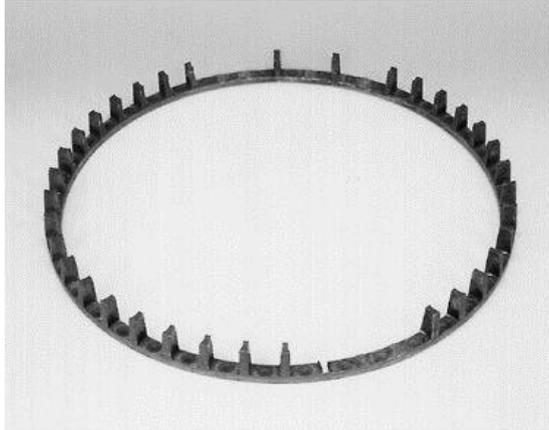


Figura 3.70. Gaiola de um rolamento autocompensador de rolos, rachaduras por fadiga se formaram nos filetes [2].

#### 3.3.10.2 Excesso de velocidade

Se o rolamento operar em velocidade acima daquela para a qual a gaiola é projetada, a gaiola é submetida a forças intensas de inércia que podem levar a fraturas. Com frequência, quando altas velocidades estão envolvidas, é possível selecionar rolamentos com gaiolas de projeto especial.

#### 3.3.10.3 Desgaste.

O desgaste da gaiola pode ser causado por lubrificação inadequada ou por partículas abrasivas.

Com rolamentos, a ideia é, naturalmente, evitar o atrito deslizante. No entanto, quando se trata da gaiola, não se pode eliminar o deslizamento nos contatos com os outros componentes do rolamento. Isso explica por que a gaiola é o primeiro componente a ser afetado quando a lubrificação se torna inadequada (Figura 3.30). A gaiola sempre é feita de material mais macio do que os outros componentes do rolamento e, por consequência, seu desgaste é comparativamente mais rápido. À medida que as bolsas da gaiola aumentam de tamanho devido ao desgaste, a orientação do elemento rolamento se deteriora, o que também se aplica à gaiola nos casos em que ela está centrada nos corpos rolantes. As forças resultantes podem levar à falha na gaiola em um curto período de tempo.



Figura 3.71. O desgaste na gaiola de um rolamento de esferas é causado pela lubrificação inadequada [2].

#### 3.3.10.4 Obstrução

Fragments de material descascado ou outras partículas duras podem formar uma cunha entre a gaiola e um corpo rolante, evitando que este gire em torno do próprio eixo. Isso leva à falha na gaiola.

#### 3.3.10.5 Outras causas de danos à gaiola

Se os anéis de um rolamento rígido de esferas estão ajustados fora de alinhamento entre si, o caminho das esferas tem uma configuração oval. Se a gaiola estiver centrada nas esferas, ela precisa mudar de forma para cada revolução realizada. Rachaduras por fadiga se formam no material e, mais cedo ou mais tarde, levam a fraturas.

Existe um caso semelhante quando um rolamento axial de esferas é ajustado junto com rolamentos planos radiais. Se ocorrer folga nos rolamentos planos, as arruelas do rolamento axial se deslocam umas em relação às outras. Portanto, as esferas não seguem seu caminho normal e pode haver tensões intensas na gaiola.

As gaiolas em rolamentos submetidos à aceleração e retardo intensos, em conjunto com flutuações de velocidade, são afetadas por forças de inércia. Estas dão origem à pressão considerável entre as superfícies de contato, resultando em desgaste excessivo.

## Capítulo 4 - Técnicas de Análise de Falhas Utilizando Sinais de Vibração

Os rolamentos atuam como uma fonte de ruído e vibrações levando um sinal (assinatura) de vibração devido às circunstâncias de sua fabricação, montagem e aplicação, essa vibração não significa defeito e sim uma condição de trabalho, portanto o que deve ser observado são as alterações que sofrem essas assinaturas de vibração. Isso pode indicar um problema que esteja acontecendo durante o surgimento ou evolução de um defeito. Os defeitos nos rolamentos também podem ser classificados como tipo localizado (furos, pequenos lascamentos) e os defeitos distribuídos (corrosões, ondulações, etc.) levando com ele a assinatura de vibração.

### 4.1 Falhas em Rolamentos

A detecção de falhas incipientes deve estar diretamente relacionada com a observação das possíveis causas, a fim de se tomar as medidas necessárias para mitigar o problema.

#### 4.1.1 Falhas comuns em rolamentos

Um mancal de rolamento pode apresentar falha prematura por uma série de razões [54]. Dentre as diversas causas de falhas, pode-se destacar:

- **Lubrificação inadequada:** O lubrificante tornou-se, gradualmente, escasso permitindo o contato entre os componentes do rolamento, ou, ocorrendo à perda das propriedades lubrificantes, ou, em último caso, o lubrificante era inadequado.
- **Montagem incorreta:** Pressão para montagem no anel inadequado, 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.
- **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 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 [55].

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 seu uso [56]. Na Figura 4.1, pode-se observar o surgimento de uma falha no anel externo de um rolamento.

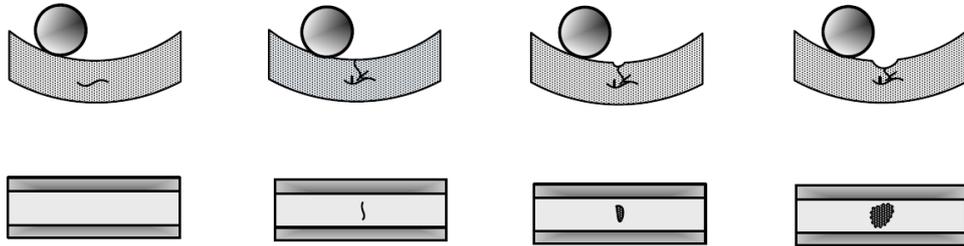


Figura 4.1. Surgimento da falha na superfície de um rolamento [40].

Este processo pode ocorrer em qualquer elemento do mancal que sofre carregamento alternado (anéis internos, externos e elementos girantes).

#### 4.1.2 Frequências de falhas

Quando uma superfície com defeito entra em contato com outro elemento, um impulso é gerado, produzindo, periodicamente, uma serie harmônica com uma frequência fundamental, que depende da localização do defeito. Por exemplo, supondo a existência de uma cavidade na pista interna de um mancal, a passagem de um elemento rolante sobre esse defeito, como mostra a Figura 4.2 (a), gera um sinal de aceleração análogo ao apresentado na Figura 4.2 (b), onde um pulso em forma de onda com amplitude  $R$  e duração  $L$  representa a entrada e a saída da esfera da cavidade. Esse pulso será repetido a cada período  $P$  devido à passagem de cada esfera [57].

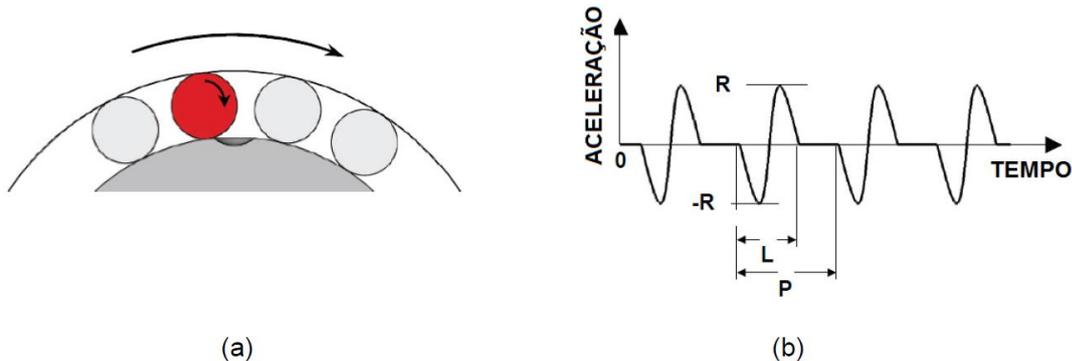


Figura 4.2. (a) Passagem de um elemento girante sobre um defeito e (b) Sinal de aceleração gerado (Adaptado [57])

Estes impulsos irão ocorrer periodicamente com uma frequência que é determinada, unicamente, pela localização do defeito, sendo ele na pista interna, na pista externa, na gaiola ou no elemento girante (esferas).

Sinais de vibração típicos de um mancal de rolamento com falhas nos diferentes componentes é apresentada na Figura 4.3, considerando o caso de uma pista externa estacionária e carga vertical unidirecional

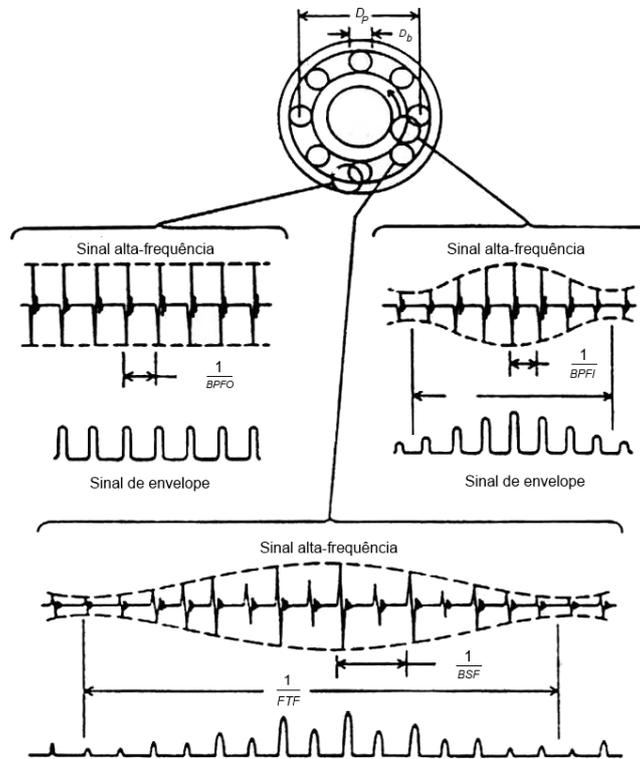


Figura 4.3. Típico sinal de vibração gerado por falhas nos mancais de rolamento (pista externa estacionária) BPFO = Frequência de defeito na pista externa; BPFI = Frequência de defeito na pista interna; FTF = Frequência de defeito na gaiola; BSF = Frequência de defeito na esfera [58].

Os impulsos serão gerados periodicamente e suas características dependerão da localização do defeito (pista interna, pista externa, gaiola ou nas esferas) e da posição da zona de carga. Eles vão excitar ressonâncias no mancal e na máquina.

Para carga vertical unidirecional e uma pista externa estacionária (a direção da carga é fixa com relação à pista externa), tal como indicado na Figura 4.3, uma falha na pista externa seria localizada na zona de carga, originando uma série de respostas de impulso uniformes. A taxa de geração de impulsos é chamado de "frequência de passagem das esferas pela pista externa" (BPFO é apresentado na equação (4.2)).

As amplitudes das falhas no elemento rolante e na pista interna variam enquanto passam através da zona de carga. Isto tem o efeito de modulação de trem de impulsos tanto pela velocidade da gaiola (falha no elemento rolante) quanto pela rotação do eixo (falha na pista interna) ([12], [59]).

Uma falha na pista interna passa através da zona de carga à velocidade de rotação do eixo, e uma série de respostas de impulso de "frequência de passagem das esferas pela pista interna" (BPFI, a equação (4.1)) (pista externa fixa) é modulada por essa frequência.

Uma falha no elemento rolante passa através da zona de carga à velocidade da gaiola conhecida como "frequência característica da gaiola" ou FTF (equação (4.3)), (pista externa fixa) e uma série de respostas de impulso são moduladas com essa frequência. Nesse caso, a chamada "frequência de giro das esferas" (BSF) é a frequência com que a falha na esfera atinge a mesma pista, contudo, como o mancal possui duas pistas, existem normalmente dois pulsos por rotação da esfera, que não são necessariamente idênticos, de modo que a frequência fundamental é ainda a BSF (equação (4.4)).

As equações (4.1-4.4) [60] abaixo são utilizadas para calcular as frequências teóricas de defeito de um mancal de esferas com pista externa estacionária:

Frequência característica de defeito na pista interna (BPFI)

$$f_{BPFI} = \frac{n_b f_{interna} \left(1 + \frac{D_b}{D_p} \cos(\alpha)\right)}{2} \quad (4.1)$$

Frequência característica de defeito na pista externa (BPFO)

$$f_{BPFO} = \frac{n_b f_{interna} \left(1 - \frac{D_b}{D_p} \cos(\alpha)\right)}{2} \quad (4.2)$$

Frequência característica de defeito na gaiola (FTF) relativa à pista externa

$$f_{FTF} = \frac{f_{interna} \left( 1 - \frac{D_b}{D_p} \cos(\alpha) \right)}{2} \quad (4.3)$$

Frequência característica de defeito nas esferas (BSF) em torno de seu eixo

$$f_{BSF} = \frac{f_{interna} D_p}{2 D_b} \left( 1 - \left( \frac{D_b}{D_p} \cos(\alpha) \right)^2 \right) \quad (4.4)$$

Onde  $n_b$  é o número de elementos rolantes,  $D_p$  e  $D_b$  são os diâmetros do elemento rolante e diâmetro do rolamento mancal primitivo respectivamente.  $f_{interna}$  é a frequência de rotação de pista interna (velocidade de eixo) e  $\alpha$  é o ângulo de contato (radial).

## 4.2 Análise no Domínio do Tempo

As técnicas de análise de sinais de vibração no domínio do tempo destacam-se, devido às características de periodicidade dos defeitos comumente encontrados em equipamentos e devido à sua simplicidade. É igualmente útil na análise de fenômenos não-estacionários e impulsivos, como são, por exemplo, as falhas incipientes nos mancais de rolamento.

Abaixo, apresentam-se as várias equações para o cálculo de parâmetros estatísticos de sinais no domínio do tempo.

### 4.2.1 Valor eficaz (RMS)

O valor eficaz (ou RMS) de um sinal de vibração mede a potência contida no sinal de vibração. O valor RMS é muito efetivo na detecção do nível de vibração no rolamento (faixa de banda de 10 Hz a 10 kHz) quando o valor medido é comparado com os padrões de referência estabelecidos para rolamentos saudáveis. O valor RMS é

conhecido como uma medida de severidade vibração, mas não é suficientemente sensível para detectar falhas incipientes em mancais de rolamento [61].

O valor eficaz (RMS) é definido pela equação (4.5) abaixo:

$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x(i))^2}{N}} \quad (4.5)$$

#### 4.2.2 Valor de pico (Peak value)

É o valor máximo registrado no sinal de vibração. Ela é definida pela equação (4.6):

$$x_{peak} = \max(x_i) \quad \text{para } i = 1 \dots N \quad (4.6)$$

O valor pico-a-pico é muito útil porque indica quando uma peça da máquina atinge valores críticos quando se considera tensões máximas ou folga mecânica. É usado para indicar níveis máximos de sinais transientes (de curta duração) em choques.

É Particularmente útil para monitorar mudanças na quantidade de impulsividade do sinal de vibração, possivelmente devido ao aumento do dano de pulso. Esse recurso não é 100% confiável, já que existem outros efeitos que podem aumentar a amplitude de sinal de pico, como movimentos bruscos do sensor ou interferências próximas.

#### 4.2.3 Curtose

A curtose é definida como o quarto momento da distribuição e mede os picos ou vales relativos da distribuição comparada com uma distribuição normal (por exemplo, número e amplitude dos picos presentes no sinal). Esta característica tem a grande vantagem de que o seu valor é independente das variações de carga e velocidade [62].

A curtose é definida como:

$$\gamma_4 = \frac{\sum_{i=1}^N (x(i) - T_1)^2}{(N - 1)T_2^2} \quad (4.7)$$

$$T_1 = x_{RMS}$$

$$T_2 = x_{Desvio\ Padr\til{a}o}$$

Considere as duas funções da densidade da probabilidade conforme a Figura 4.4. O gráfico da direita tem uma curtose maior do que o da esquerda.



Figura 4.4. Ilustração de Curtose [62]

Curtose é um parâmetro estatístico proposto por alguns autores como um estimador na detecção de falhas incipientes em rolamentos [63], que enfatiza aumentos de impactos de um sinal no tempo. Ela está relacionada com a distribuição de probabilidade, pois é um momento estatístico que indica quão longe o sinal está de uma distribuição normal com o mesmo desvio-padrão. Este foi desenvolvido para a detecção de falhas em rolamentos e engrenagens por The British Steel Corporation, em 1978 [64].

Muitos sinais aleatórios possuem um comportamento que descrevem com bastante aproximação a distribuição de Gaussiana [65]. A Figura 4.5 ilustra o comportamento da curtose do sinal de vibração com a evolução do desgaste em mancais de rolamentos. Tem sido mostrado que o valor de curtose superior a 3 (que é considerado como o início de falhas de rolamentos [64]) podem ser obtidos apenas se o sinal for do tipo impulsivo, característica esta que não é cumprida para certos tipos de falhas como, por exemplo, quando as pistas estão rachadas, o que gera um pulso mais uniforme,.

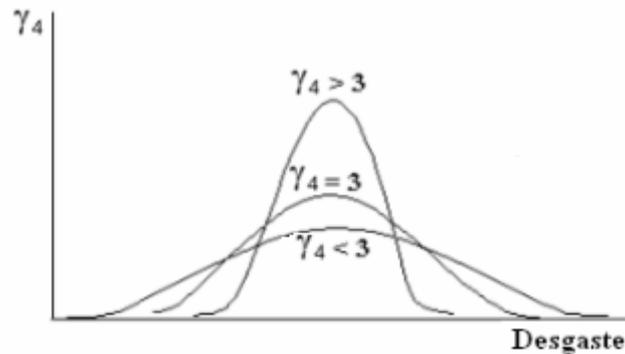


Figura 4.5. Comportamento da curtose com a evolução do desgaste em mancais de rolamentos [64].

A curtose de uma distribuição normal é igual a 3. Valores de curtose muito maiores do que 3 indicam o início de uma falha pontual. Com o crescimento da falha o valor da curtose tende a diminuir, enquanto o valor RMS aumenta.

#### 4.2.4 Assimetria (Skewness)

O terceiro momento estatístico normalizado pode ser tão eficaz como a curtose, se os dados são retificados inicialmente. A vantagem deste momento sobre o valor de curtose tradicional é sua menor susceptibilidade a vibrações espúrias, que é considerado um dos inconvenientes de momentos estatísticos de ordem superior. A sensibilidade deste momento à mudança de carga e velocidade é menor que a da curtose.

$$x_{\text{Skew}} = \frac{\sum_{i=1}^N (x(i) - T_1)^3}{(N - 1)T_2^3} \quad (4.8)$$

#### 4.2.5 Fator crista (FC ou Crest Factor)

A forma mais simples de quantificar os defeitos no domínio do tempo é utilizando o valor RMS do sinal de vibração. Porém, o nível RMS não apresenta mudanças significativas em estágios iniciais de danos em engrenagens e mancais de rolamentos [66]. O fator de crista (FC), que é definido como a relação do valor de pico (VP) do sinal em relação ao nível RMS é um estimador melhor. Portanto, os picos nas séries temporais vão resultar num aumento no FC.

O fator de crista é a proporção entre o valor de pico e o valor RMS. Este parâmetro detecta o aumento do pico em relação ao valor médio, e tem sido proposto como uma medida da tendência. O FC é utilizado para detecção de falhas em rolamentos e, assim como a curtose, é um indicador de ocorrências fora da normalidade.

$$FC = \frac{VP}{RMS} \quad (4.9)$$

Para equipamentos operando normalmente, o FC pode ficar entre 2 e 6. Um valor maior do que 6 geralmente está associado com defeitos. Esse recurso é usado para detectar alterações no padrão do sinal devido a fontes de vibração impulsivas como um

dente lascado em uma engrenagem ou um defeito na pista externa do rolamento. O FC não é considerado uma técnica muito sensível.

#### 4.2.6 Fator K

O fator K foi proposto por Adolf Sturm como sendo um parâmetro muito sensível ao impacto. Ao contrário do fator de crista, o seu valor não é reduzido quando uma falha está no seu estágio final. Este parâmetro leva em conta o fato de que quando se desenvolve uma falha, este vai aumentando seu valor RMS e diminuindo o nível dos impactos produzidos. Assim, o fator K é referido como o valor de pico vezes o valor RMS, conforme mostra a equação (4.10). Com o aumento do valor RMS ou do valor do pico o fator K aumenta [22].

$$K = x_{peak} \cdot x_{RMS} \quad (4.10)$$

Vale lembrar que para um rolamento em boas condições, o sinal de vibração emitido pelo mesmo é de natureza aleatória, e seu comportamento tende à distribuição normal ( $\gamma_4 \approx 3$ ). Com o aparecimento de uma falha pontual, o valor da curtose aumenta significativamente e com a evolução da mesma, como no caso do fator de crista, o seu valor volta a diminuir. Para compensar esta diminuição definiu-se o fator K (Equação de K), onde o valor da curtose é multiplicado pelo valor RMS do sinal, o qual é sempre crescente com a evolução do defeito [67].

$$K = x_{RMS} \gamma_4 \quad (4.11)$$

Existe uma lista maior de estimativas que podem ser utilizadas, tais como o fator de folga, fator de impulso, etc. mas que são considerados desnecessários, uma vez que fornecem informações redundantes com relação aos apresentados, ver, por exemplo, referências [22] e [64].

O monitoramento do nível de vibração no tempo constitui uma ferramenta muito útil na análise de máquinas, apesar de suas limitações. Sua grande vantagem reside na simplicidade de sua aplicação e na sua capacidade de informar a severidade da vibração, permitindo assim estabelecer níveis confiáveis de alarme para proteção do equipamento monitorado.

### 4.3 Análise no Domínio da Frequência

A análise no domínio da frequência proporciona muito mais informações sobre as falhas do mancal de rolamento [68] sendo conhecidas as frequências de falha para cada um dos elementos do mancal. A análise no domínio da frequência é o principal método de análise de vibração de mancais. Geralmente podem-se considerar três faixas de frequências para análise e diagnóstico de falhas: a região de baixa frequência, a região de frequência intermediária e região de alta frequência. Geralmente a detecção de falhas em rolamentos incide sobre os dois últimos. A análise espectral possui algumas vantagens listadas abaixo:

- O significado físico é geralmente mais fácil de obter no domínio da frequência do que no domínio do tempo na descrição de sinais e sistemas.
- Os sistemas mecânicos são muitas vezes modelados por um sistema linear, descrito por equações diferenciais lineares. Usando a transformada de Fourier, podemos converter estas equações em algébricas.
- A diferença da medição dos valores globais com a análise espectral é que esta possibilita estabelecer onde está a falha: pista interna, externa, etc.
- Pode-se identificar diretamente do espectro o valor de frequência sem cálculos adicionais. Também é possível identificar qual é o componente que mais influencia no nível total de vibração.
- Por meio da integração digital, pode-se analisar o espectro de frequência nas unidades desejadas: velocidade, aceleração ou deslocamento.
- Pode-se concentrar a análise sobre a largura de banda de interesse com o uso de filtros digitais.

### 4.3.1 Técnica do envelope

A técnica do envelope é considerada uma das técnicas mais poderosas para detectar e diagnosticar falhas em rolamentos. Através desta técnica é possível determinar com precisão onde está o defeito

Em 1971, a NASA em Huntsville, apoiou um programa para investigar a detecção de defeitos em rolamentos, mostrando que a técnica utilizada até aquele momento, não foi capaz de detectar rolamentos defeituosos, quando eles estavam em sua fase incipiente.

Para investigar este fenômeno, foi implantado um pequeno defeito na pista interna de um mancal, sendo colocada num banco de ensaio onde foi captada através de vários sensores: o sinal de vibração gerado por este rolamento defeituoso, o sinal acústico e temperatura. Depois de analisar cuidadosamente todos os sinais obtidos, nenhum deles mostrou a presença do defeito. A Figura 4.6 mostra a diferença nos espectros do sinal de vibração de um mancal novo e do rolamento defeituoso testado.

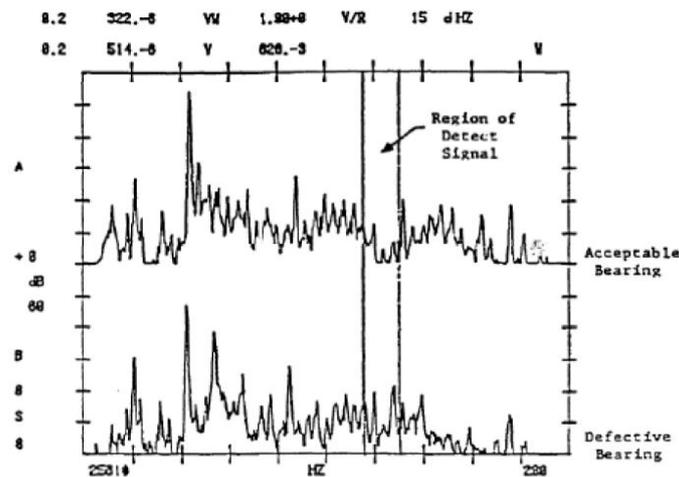


Figura 4.6. Comparação de espectros de vibração de um mancal novo e de um defeituoso [69].

Decidiram então, colocar um osciloscópio para observar o sinal temporal, diretamente (Figura 4.7).

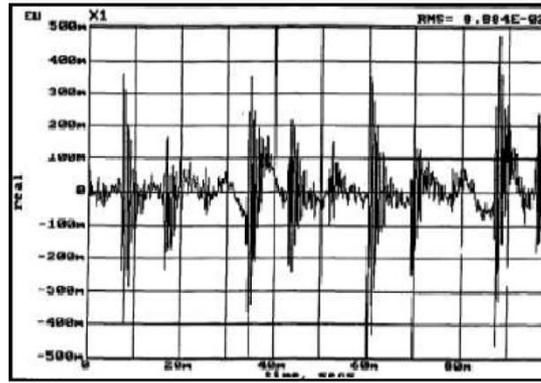


Figura 4.7. Sinal temporal do rolamento defeituoso [69].

O tempo entre os sinais de impacto foi medido e quando foi convertido em frequência, obteve-se o valor da frequência de defeito para um mancal com defeito de pista interna. Se pudesse ser traçada uma linha em torno do sinal, como mostra a Figura 4.10, então, o espectro deste novo sinal (envelope), deveria mostrar a frequência de defeito. Para se obter o envelope do sinal, é utilizado um demodulador semelhante aos utilizados para a detecção de ondas de rádio de amplitude modulada.

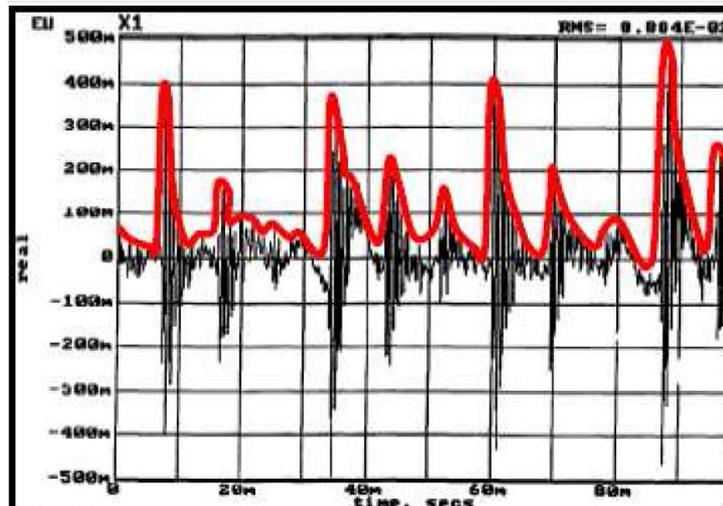


Figura 4.8. Envelope do sinal temporal do rolamento defeituoso [69].

A Figura 4.11 amostra o espectro do envelope, sendo que a falha é agora evidente com uma elevada amplitude na frequência de defeito.

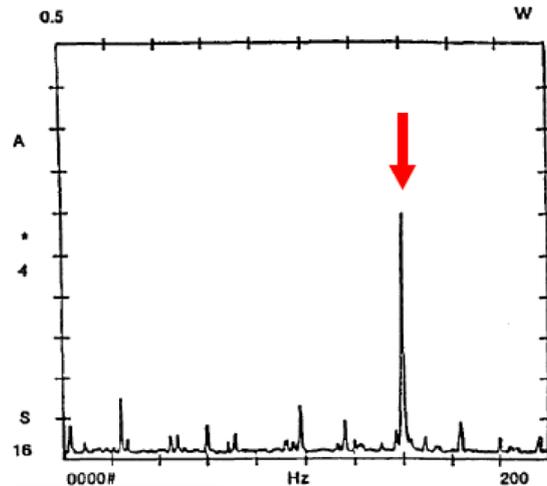


Figura 4.9. Espectro do envelope do sinal temporal do malcal defeituoso [69].

Através desse trabalho mostrou-se que a análise direta do espectro de baixa frequência para o sinal de defeito é muito menos sensível que a análise do espectro do envelope.

Folgas excessivas e falhas iniciais em componentes de máquinas produzem uma série de impactos, os quais são equivalentes a uma excitação do tipo impulsiva, a qual atua sobre a estrutura, ou seja, a máquina é excitada em suas frequências naturais. Matematicamente, diz-se que a frequência de excitação é modulada pelas frequências naturais da máquina. Como estes impactos são, em geral, de curta duração, contêm uma taxa muito alta de energia que é distribuída em todo o espectro de frequências. Uma vez que nas médias e baixas frequências o espectro de vibração das máquinas encontra-se repleto de componentes, o efeito desses impactos é melhor visualizado nas ressonâncias de frequências mais altas, em especial no caso de falhas em mancais de rolamentos, os quais têm rigidez muito elevada.

Na prática, a utilização dessa técnica segue os seguintes passos:

- i. Inicia-se com a mudança de domínio do tempo para o domínio da frequência por meio da FFT.

- ii. Em seguida, ocorre a filtragem do sinal por meio de um filtro-passa banda em torno de uma frequência de falha ou de alterações indicadas a partir da observação do gráfico da FFT.
- iii. Este sinal filtrado pode ser então demodulado, a fim de, eliminar os componentes de alta energia, o que permite uma detecção mais precoce e precisa dos defeitos do rolamento. Duas abordagens podem ser utilizadas para a realização da demodulação: a) construção de um sinal analítico complexo, no domínio do tempo, por meio da transformada de Hilbert, no qual a parte imaginária é a transformada de Hilbert da parte real; b) retificação e suavização do sinal por meio de um filtro passa-baixa, buscando-se eliminar a frequência portadora.
- iv. Calcula-se o espectro do sinal do envelope, tomando-se a envoltória das amplitudes, em módulo, do gráfico obtido no passo anterior.
- v. Através do emprego da FFT, é realizada uma nova mudança de domínio para possibilitar a extração das frequências características de falha do mancal.

A extração do envelope do sinal utilizando-se a Transformada de Hilbert é exemplificada na Figura 4.10, abaixo:

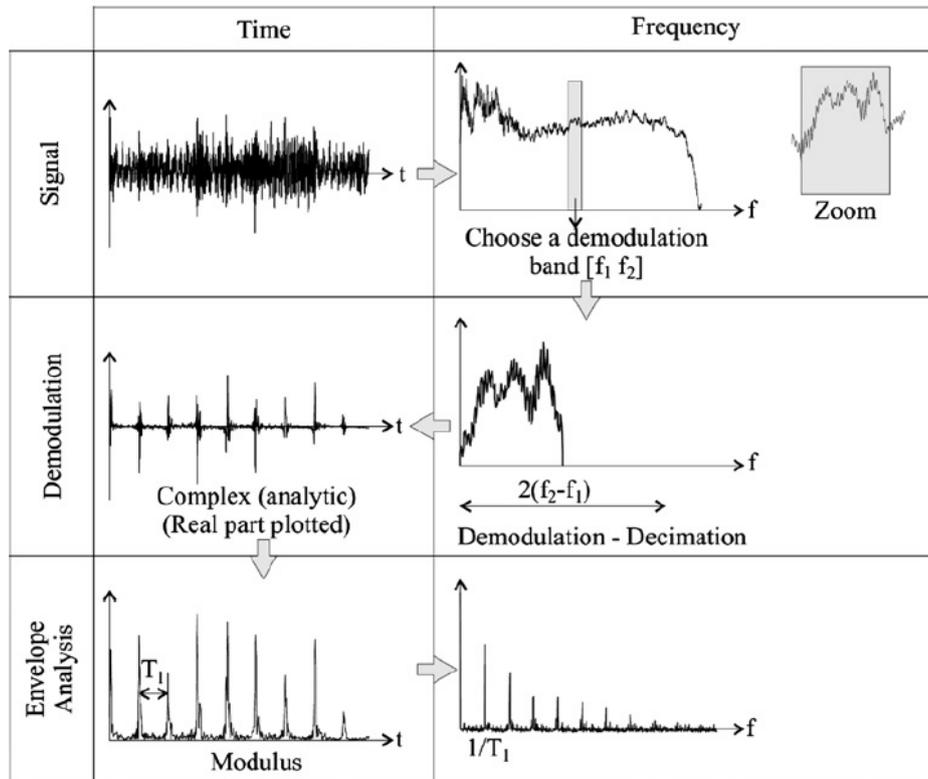


Figura 4.10. Procedimento de análise do envelope utilizando a transformada de Hilbert [70].

## 4.4 Análise no Domínio Tempo-Frequência

A maioria dos sinais são não-estacionários. A amplitude e o espectro de um sinal podem variar no tempo. Um exemplo é a emissão acústica de um navio, com variações devido às mudanças de velocidade e o liga e desliga das máquinas a bordo. A caracterização completa de sinais não-estacionários no domínio da frequência deve incluir também o aspecto temporal, com o que se obtêm a análise tempo e frequência de um sinal.

Se o espectro do sinal é dependente do tempo, é necessário utilizar segmentos suficientemente pequenos, onde o espectro é constante, para analisá-lo.

#### 4.4.1 A Transformada de Fourier de Tempo Curto (STFT)

A transformada de Fourier é uma ferramenta através da qual podemos obter informações sobre como a energia do sinal é distribuída através de seus vários componentes de frequência, ou seja, podemos conhecer todos os componentes de frequência existentes no sinal e suas respectivas contribuições energéticas.

A transformada de Fourier tem perfeita resolução de frequência, que a torna uma ferramenta muito útil para a análise de sinais estacionários. No entanto, ela não pode ser aplicada com o objetivo de obter informações precisas, de quando ou onde os diferentes componentes de frequência são encontrados no sinal, como é o caso dos sinais quase-estacionários ou não-estacionários cujas propriedades estatísticas mudam com o tempo. Em outras palavras a transformada de Fourier tem uma resolução de tempo nula.

Num esforço para resolver o problema de resolução no tempo da transformada de Fourier, Denis Gabor (1946) adaptou a transformada utilizando um procedimento chamado de janelamento. Este procedimento consiste em dividir um sinal  $x(t)$  em pequenos segmentos através do tempo, para que se possa assumir que para cada segmento, o sinal é estacionário e assim calcular a transformada de Fourier para cada segmento do sinal.

A forma de dividir o sinal é realizada por uma função do tempo  $w(t)$ , cuja largura corresponde ao comprimento de cada segmentação do sinal. Com a função janela, enquadraremos o sinal em torno de um instante de tempo e calculamos sua transformada de Fourier, logo, deslizamos a função janela até que não se sobreponha com a anterior, cobrindo uma nova parcela do sinal, voltando a calcular sua transformada de Fourier. Este processo é repetido até que se tenha coberto a totalidade do sinal.

Considere um sinal não-estacionário definido pela equação (4.12):

$$x(t) = \sum A_i e^{-a_i(t-t_i)} \cos(2\pi f_i t + \varphi_i) \mu(t - t_i) \quad (4.12)$$

Com diferentes parâmetros:

· Amplitudes  $A_i$

- Tempos de início  $t_i$
- Frequências dominantes  $f_i$
- Fases iniciais  $\varphi_i$
- Coeficientes de amortecimento  $a_i$

Onde  $\mu(t - t_i)$  é a função escalão unitário, que vale 1 para  $t > t_i$  y 0 em qualquer outro caso.

Se fizermos a transformada de Fourier  $X(f)$ :

- $|X(f)|$  fornece informações sobre os componentes harmônicos  $f_i$  y das respectivas amplitudes  $A_i$ .
- A fase de  $X(f)$  inclui informações sobre outros parâmetros.

Ou seja, a transformada de Fourier identifica componentes harmônicos, mas não trás nenhuma informação sobre quando e como estas frequências estão distribuídas ao longo do tempo, daí a vantagem da análise através de STFT.

#### 4.4.1.1 STFT de Tempo Contínuo

No caso de uma função contínua no tempo, ela é multiplicada por uma função janela que só é diferente de zero apenas durante um pequeno período de tempo. A transformada de Fourier do sinal resultante é feita por uma janela que “desliza” ao longo do eixo do tempo, resultando numa representação bidimensional do sinal, como mostra a equação (4.13).

$$STFT \{s(t)\} = X(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)w(t - \tau)e^{-i\omega t} dt \quad (4.13)$$

Onde:  $\omega = 2\pi f$

Onde  $w(t)$  é a função janela, freqüentemente uma janela Hanning ou Gaussiana é centrado em zero e  $x(t)$  é o sinal a ser transformado,  $X(\tau, \omega)$  é, essencialmente, a Transformada de Fourier de  $x(t)w(t - \tau)$  sendo uma função complexa que representa a fase e magnitude do sinal sobre o tempo e a frequência. Muitas vezes, a fase instantânea é utilizada junto como o eixo do tempo  $\tau$  e o eixo da frequência  $\omega$  para suprimir qualquer descontinuidade por salto na fase resultante no STFT.

Há a um problema implícito na STFT que é a exatidão da representação de tempo x frequência de um sinal, isto é, não se podem saber quais componentes espectrais existem em um determinado instante, mas sim, os intervalos de tempo durante os quais existe certa banda de frequências, isto é, há um problema de resolução da STFT, que levou ao aparecimento de outras técnicas de análise no dompinio tempo-frequência, como por exemplo, a transformada Wavelet.

#### 4.4.1.2 STFT de Tempo Discreto

No caso de tempo discreto, o sinal a ser processado é dividido em segmentos geralmente com sobreposição. O STFT é definida pela equação (4.14):

$$STFT \{x[n]\} = X(m, \omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]w[n - m]e^{-i\omega n} \quad (4.14)$$

Onde,  $x[n]$  é um sinal e  $w[n]$  é a janela.

Vale ressaltar que o quadrado da magnitude do STFT Oe denominado de Espectrograma.

$$\text{Espectrograma} = \{x(t)\} \equiv |X(\tau, \omega)|^2$$

#### 4.4.1.3 Efeito do janelamento na STFT

O termo resolução, difundido amplamente na área de tratamento de sinais, é definido como o número de pontos amostrais que compõem cada linha de uma imagem digital (pontos por unidade de comprimento) [71]. Outra definição, talvez mais elegante, é da resolução ser a menor separação (distância) entre dois pontos da imagem que podem ser distinguidas ou visualizadas [72]. Extrapolando essas definições para o gráfico da STFT, a resolução em frequência é o conjunto de componentes espectrais que se consegue distinguir ou identificar em uma banda de frequências, a qual é limitada pelo intervalo de tempo (resolução de tempo).

As resoluções de frequência e tempo dependem da largura da função-janela usada, que por sua vez, é designada pelo termo técnico de suporte da janela. Se a função-janela for estreita, se diz que o suporte é compacto.

O suporte da janela é um parâmetro muito importante, pois através deste, pode-se estabelecer o grau de resolução em tempo e frequência que se quer. Se a janela é muito estreita uma parcela muito pequena do sinal é analisado, o que permite ter uma resolução de tempo boa, mas a resolução da frequência é pequena já que se conhecerá apenas uma fração do espectro total que existe no sinal. Por outro lado, se a janela é muito grande, têm-se uma boa resolução em frequência, mas uma resolução pequena no tempo.

Portanto, um defeito da STFT é que ele não pode dar uma boa resolução em tempo e frequência ao mesmo tempo já que o suporte da janela é fixo. Consequentemente, há um compromisso entre boa resolução em tempo ou boa resolução em frequência. Para se obter um sinal estacionário, é escolhida uma janela suficientemente estreita. Quanto mais estreita a janela, melhor será a resolução no tempo e, portanto, uma melhor representação de estacionariedade do sinal e pior resolução em frequência.

Assim, o problema consiste na escolha de uma janela para a análise do sinal dependendo da aplicação. Se que os componentes espectrais estão bem separados no sinal original, pode-se sacrificar a resolução em frequência e tentar melhorar a resolução no tempo, como pode ser visto nos exemplos da Figura 4.11.

No primeiro caso, é utilizada uma melhor resolução no tempo à custa da perda de resolução em frequência e, no segundo caso, a resolução em frequência é aumentada à custa da perda de resolução em tempo.

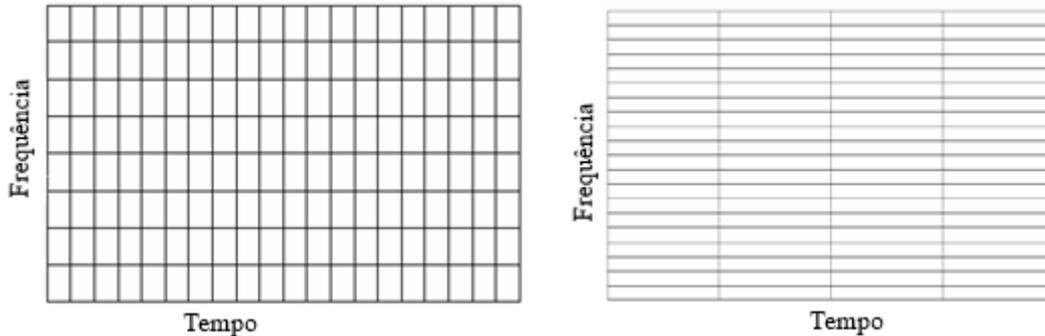


Figura 4.11. Possibilidades de resoluções em tempo-frequência [73].

A largura fixa da janela limita a precisão na extração da informação no domínio da frequência. Esta condição leva necessariamente a uma relação de compromisso na resolução tempo-frequência. Com isto percebe-se que a STFT não é adequada para análise de sinais onde se tem componentes de baixa e alta frequências presentes no sinal. Isto é, se for analisar o conteúdo de baixa frequência de um sinal, deseja-se uma função de janela ampla no tempo. Caso contrário, se se está interessado em fenômenos de alta frequência, uma janela de curta duração seria preferível [74].

## 4.5 Remoção de Sinais Determinísticos

Uma das principais fontes de mascaramento dos sinais de mancais de rolamento relativamente fracas é a frequência determinística ou discreta de rotações de eixos ou engrenagens, já que tais sinais são geralmente muito fortes, mesmo na ausência de falhas nestes.

Mesmo em diferentes máquinas, normalmente haverá fortes componentes de frequência discretos que podem contaminar as bandas de frequência em que o sinal do mancal seria de outra forma dominante. Geralmente é vantajoso remover esse ruído de frequência discreta antes de se prosseguir com o diagnóstico [59].

Para ilustrar o conteúdo de uma medição de sinal de vibração de um mancal de rolamento com defeito, um modelo simples do processo de geração é apresentado na Figura 4.12. O símbolo " $*h$ " representa a convolução da combinação do sinal de vibração de sinais determinísticos, sinais de defeito e ruído do mancal. Na realidade, o mecanismo é muito mais complexo, já que envolve um número de fontes de vibração que podem ser adicionados ou convoluídos em diferentes formas.

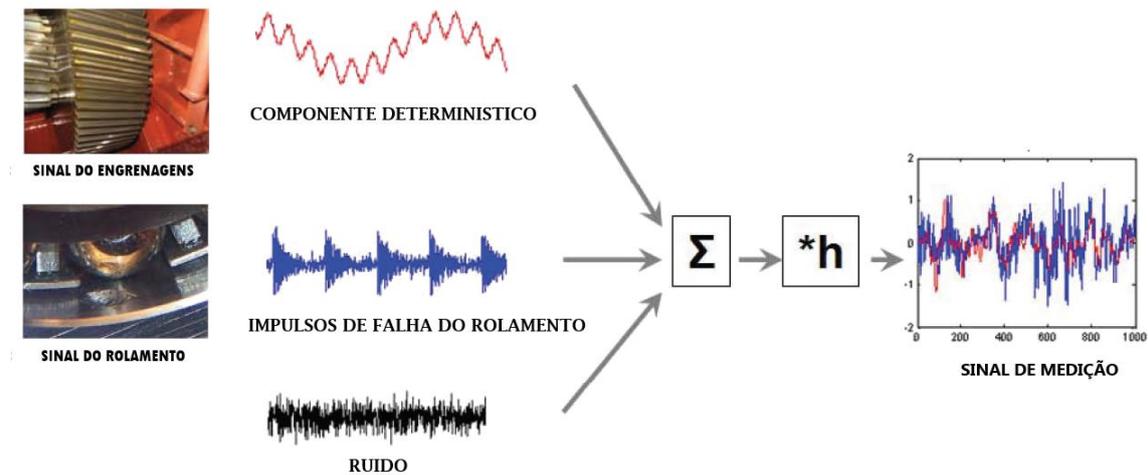


Figura 4.12. Modelo de geração de sinais de vibração de uma máquina com engrenagens e mancal rolamentos [75].

Para um melhor diagnóstico da falha em mancais de rolamento há uma série de técnicas para separar componentes determinísticos do rolamento, tais como: predição linear, tempo de média síncrona (TSA), cancelamento de ruído adaptativo (ANC), cancelamento de ruído auto-adaptativo (SANC) e separação aleatória discreta (DRS). Esta dissertação vai focar em duas dessas técnicas: predição linear e cancelamento de ruído adaptativo (ANC).

#### 4.5.1 Predição Linear

Estes filtros formam uma classe particular dentre os filtros digitais, caracterizada pela obtenção de seus coeficientes a partir de considerações sobre as estatísticas do sinal de entrada.

A idéia básica por trás da predição linear é a de que o valor de uma amostra pode ser aproximado (predito), por combinação linear dos valores prévios (predição forward) sobre uma combinação de valores subsequentes (predição backward) ou ambos (predição forward- backward), tirando partido da correlação entre estas. A parte residual (imprevisível) do sinal é então obtida por subtração do sinal original.

O modelo utilizado para a predição linear é o modelo "auto-regressivo " ou AR, descrito pela equação (15):

$$y(n) = - \sum_{k=1}^p a(k)x(n - k) \quad (4.15)$$

Onde o valor previsto  $y(n)$  é obtido como uma soma ponderada dos valores de  $p$  (ordem preditor) anteriores.

O valor atual é dado pela soma do valor previsto e parte residual  $e(n)$  que contém o ruído e os impulsos, que tem um espectro branco.

$$x(n) = y(n) + e(n) \quad (4.16)$$

O método mais comum de determinação dos coeficientes do modelo AR é usando a função autocorrelação (característica estatística de segunda ordem) do sinal.

Os coeficientes de predição  $a(k)$  do modelo auto-regressivo (AR), representada por  $y(n)$ , podem ser obtidos utilizando as equações de Yule-Walker, frequentemente utilizando o chamado algoritmo de Recursão Levinson-Durban (LDR) [76].

Note-se que as equações (4.15) e (4.16) podem ser escritas como:

$$x(n) + \sum_{k=1}^p a(k)x(n - k) = e(n) \quad (4.17)$$

E sua transformada de Fourier como:

$$X(f)A(f) = E(f) \quad (4.18)$$

Ou

$$X(f) = \frac{E(f)}{A(f)}$$

que pode ser considerada como a saída  $X(f)$  de um sistema com função de transferência  $A^{-1}(f)$ , quando é excitada pela função força  $E(f)$ . A função de transferência é então um filtro todos os polos, e pode ser interpretado como uma sistema auto-regressivo (AR). A função fexcitadora  $E(f)$  contém ruído branco “*whitened*” (não correlacionada), que contém ruído branco e impulsos, e sua contraparte de domínio de tempo  $e(n)$  é chamado de “*pre-whitening*”. Assim, a remoção de componentes determinísticos (frequência discreta) deixa o sinal residual com uma versão de *pre-whitening* do sinal original que inclui o sinal do mancal defeituoso devido à aleatoriedade desta última.

Um diagrama de blocos que ilustra o conceito de um filtro AR derivado da equação (4.15) é apresentado na Figura 4.13. O filtro de predição linear calcula os coeficientes de predição de forma a minimizar o erro quadrático médio na saída do sistema. Ou seja, os coeficientes  $a(k)$  procuram minimizar  $E[e^2(n)]$ .

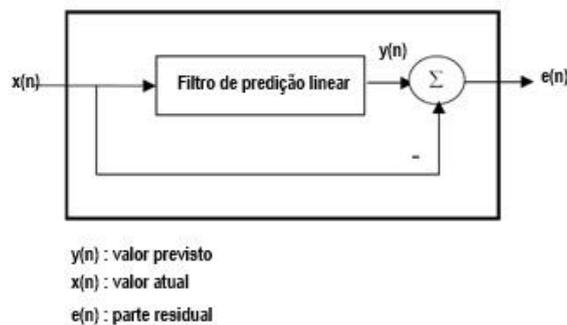


Figura 4.13. Filtragem predição linear

Vários critérios e procedimentos têm sido propostos para selecionar a ordem ideal do modelo.

O *Akaike Information Criterion* (AIC) é um dos critérios mais populares na literatura, e determina a ordem do modelo  $p$  minimizando a informação teórica em função de  $p$  [77],  $AIC(p)$  é definido pela equação (3.7).

$$AIC(p) = N(\ln(\sigma_p^2)) + 2p \quad (4.19)$$

Onde  $N$  é o número de amostras, e  $\sigma_p^2$  é o estimador de variância do ruído branco. O termo  $2p$  é uma "penalidade" para a utilização de adicional de coeficientes de AR que não reduzem substancialmente a parte residual.

Outro critério popular é o *Final Prediction Error*, que seleciona a ordem  $p$  do modelo minimizando a função FPE ( $p$ ), definida como [78]:

$$FPE(p) = \sigma_p^2 ((N + p + 1)/(N - p - 1)) \quad (4.20)$$

O termo  $(N + p + 1)/(N - p - 1)$  aumenta com  $p$  e representa as imprecisões ao estimar os parâmetros AR [79].

O modelo AR pode ser útil como um filtro de *pre-whitening do sinal de vibração original do mancal*. No diagnóstico de falhas em rolamentos o objetivo principal é o de maximizar a impulsividade do sinal residual (assumindo que esta é dominada pela falha de rolamento) e em [80] foi demonstrado que esta pode ser frequentemente alcançada com uma ordem  $p$  pequena, utilizando o critério AIC.

A Figura 4.14 mostra um resultado de [81], onde um modelo de ordem 4 (AR (4)) foi capaz de remover o sinal discreto dominante das engrenagens, aumentando o valor de curtose de -0,04 para 5,7.

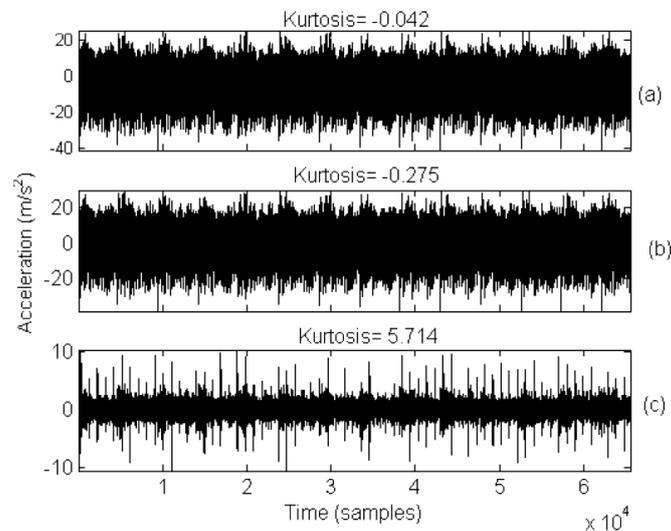


Figura 4.14. (a) Sinal bruto (b) Parte determinística AR (4) (c) AR (4) residual (sinal *pre-whitened*) [81]

## 4.5.2 Filtro adaptativo para cancelamento de ruído (ANC)

Em contraste com as técnicas de concepção de filtros convencionais, filtros adaptativos não têm coeficientes constantes e nenhuma informação à priori é conhecida.

Um filtro adaptativo é aquele cujos coeficientes são atualizados usando-se um algoritmo que atende a um critério pré-definido. O filtro adaptativo ajusta seus coeficientes para minimizar um sinal de erro e podem ser do tipo resposta finita ao impulso (FIR) ou resposta infinita ao impulso (IIR). A forma mais comum de filtro adaptativo é o filtro transversal usando o algoritmo de mínimos quadrados (LMS). Neste trabalho, o ruído é definido como qualquer tipo de sinal indesejável, desde elétrico, acústico ou vibrações de outros componentes que não o mancal.

Cancelamento de ruído adaptativo (ANC) é um procedimento onde através de um sinal primário que contém dois componentes, não-correlacionados, podem ser separados nesses componentes por meio da utilização de um “sinal de referência” contendo apenas um deles. O “sinal de referência”, não tem que ser idêntico à parte correspondente do sinal principal, só apenas relacionado por uma função de transferência linear. A técnica do ANC considera que a função de transferência pode subtrair o sinal de referência modificado a partir do sinal principal, deixando o componente de interesse.

Basicamente, o ANC é uma matriz de duas entradas e de laço fechado do sistema de realimentação adaptativo como ilustra na Figura 4.15.

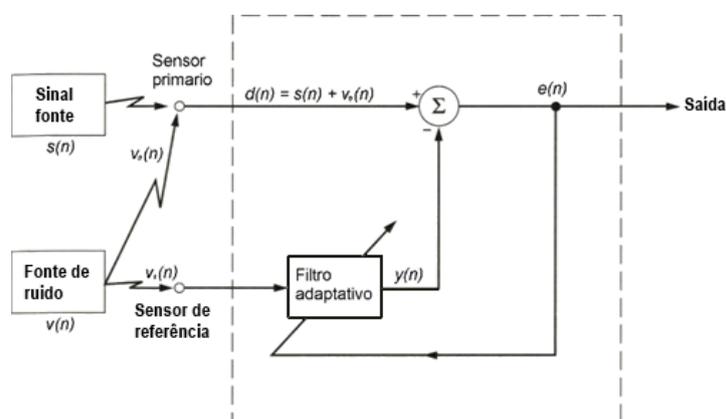


Figura 4.15. Cancelamento de ruído adaptativo

Derivam-se as duas entradas do sistema de um par de sensores: um sensor primário e um sensor de referência (auxiliar). Especificamente, tem-se o seguinte:

1. O sensor primário recebe um sinal que leva informação  $s(n)$  corrompida por um ruído aditivo, como mostra a equação (4.21).

$$d(n) = s(n) + v_0(n) \quad (4.21)$$

O sinal  $s(n)$  e o ruído  $v_0(n)$  não são correlacionados, isto é:

$$E[s(n)v_0(n-k)] = 0 \quad \text{para todo } k \quad (4.22)$$

2. O sensor de referência recebe um ruído  $v_1(n)$  que não tem correlação com o sinal  $s(n)$  mas está correlacionado com o ruído  $v_0(n)$ , o qual é obtido com o sensor primário junto ao sinal que se deseja recuperar, isto é:

$$E[s(n)v_1(n-k)] = 0 \quad \text{para todo } k \quad (4.23)$$

e

$$E[v_0(n)v_1(n-k)] = p(k) \quad (4.24)$$

$p(k)$  é uma correlação cruzada desconhecida para o atraso  $k$ .

O sinal de referência  $v_1$  é processado por um filtro adaptativo para produzir a saída:

$$y(n) = \sum_{k=0}^{M-1} \hat{w}_k(n)v_1(n-k) \quad (4.25)$$

Onde  $\hat{w}_k(n)$  são os valores dos coeficientes (real) ajustáveis do filtro adaptativo. A saída do filtro de  $y(n)$  é subtraída do sinal primário  $d(n)$ , conhecido como a "resposta desejada" para o filtro adaptativo. O sinal de erro é definido por:

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (4.26)$$

Assim, substituindo a equação (4.21) em (4.26) se obtém:

$$e(n) = s(n) + v_0(n) - y(n) \quad (4.27)$$

O sinal de erro é utilizado para ajustar os valores de coeficientes do filtro adaptativo e o laço de controle em torno das operações do filtrado e subtrações, estão relacionados. Nota-se que o sinal que leva a informação é uma parte do sinal  $e(n)$ , como mostra a equação (4.27).

O sinal de erro  $e(n)$  constitui a saída total do sistema. Da equação (4.27) se pode ver que o componente de ruído na saída do sistema é  $(v_0(n) - y(n))$ . O filtro adaptativo começa minimizando o valor quadrático médio do sinal de erro  $e(n)$ . O sinal essencial  $s(n)$ , que leva a informação não é afetado pelo cancelador de ruído adaptativo.

Assim, minimizar o valor quadrático médio do sinal de erro  $e(n)$  é equivalente a minimizar o valor quadrático médio do ruído de saída  $v_0(n) - y(n)$ . Como o sinal  $s(n)$  permanece essencialmente constante, isto leva a que a minimização do valor quadrático médio do sinal de erro é o mesmo que o da maximização da razão sinal-ruído da saída do sistema.

A função do algoritmo de adaptação é para ajustar os coeficientes dos filtros digitais para minimizar o valor médio quadrático da  $e(n)$ . Uma técnica para ajustar a velocidade de convergência é o algoritmo LMS.

#### 4.5.2.1 LMS no problema de detecção de falhas em mancais de rolamento utilizando cancelamento de ruído

A maioria dos algoritmos adaptativos busca os coeficientes ótimos através do método do gradiente descendente (*Gradient Descent*) ou método da máxima descida (*Steepest Descent*) segundo a direção oposta do gradiente da superfície do erro. Quando esta superfície corresponde ao erro quadrático instantâneo e se utiliza um filtro FIR, o

algoritmo em questão se denomina LMS (*Least Mean Square*). Este algoritmo é muito utilizado devido a sua eficiência e simplicidade. O desenvolvimento do algoritmo implementado em LABVIEW é visto no Apêndice B.

A característica de falha do mancal de rolamento é detectada pela remoção de componentes determinísticos e do ruído residual através de ANC.

Se a característica de falha do mancal é considerada como o sinal primário, e aqueles componentes determinísticos e o ruído residual são considerados como ruídos (sinal de referência), que não estão correlacionados com a falha no mancal, são estimados pelo filtro adaptativo e depois cancelados por suas estimativas.

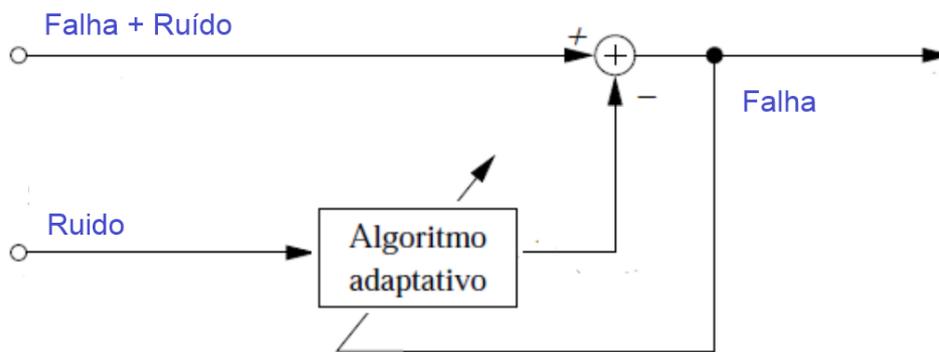


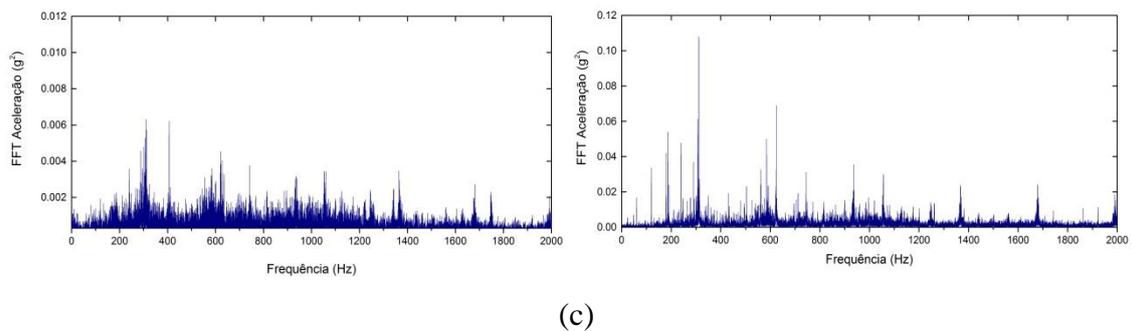
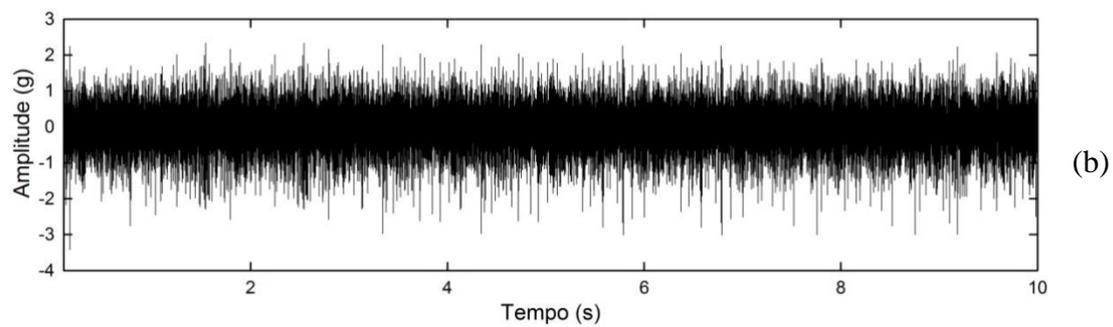
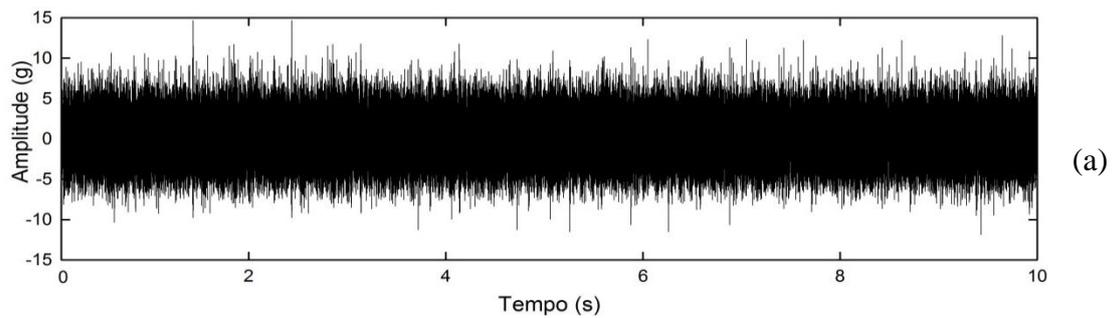
Figura 4.16. Cancelamento de ruído adaptativo para mancais de rolamento.

Especificamente, nós temos o seguinte:

1. O sensor primário recebe um sinal que leva informação da falha do rolamento  $s(n)$  corrompida por um ruído aditivo (sinal determinístico e ruído residual), como mostra a equação (4.21). O sinal que leva informação das falhas do rolamento não tem correlação um com o outro.
2. O sensor de referência recebe um ruído (sinal determinístico e ruído residual)  $v_1(n)$  que não tem correlação com o sinal  $s(n)$  mas está correlacionado com o ruído  $v_0(n)$ , sinal determinístico e ruído residual, o qual é obtido com o sensor primário junto ao sinal que se deseja recuperar (falha do rolamento).
3. O sinal de referência  $v_1$  é processado por um filtro adaptativo para produzir a saída  $y(n)$ , a saída do filtro de  $y(n)$  é subtraída do sinal primário  $d(n)$ , conhecida como a "resposta desejada" para o filtro adaptativo.

4. O sinal desejado (sinal que leva informação da falha no rolamento) é utilizado para ajustar os valores de coeficientes do filtro adaptativo e o laço de controle em torno das operações de filtrado e subtrações estão relacionadas.

A Figura 4.17 mostra o resultado da aplicação do filtro ANC com o algoritmo LMS, no sinal do mancal de rolamento 1, utilizando no caso de estudo a uma rotação de 3600 RPM e com defeito na gaiola.



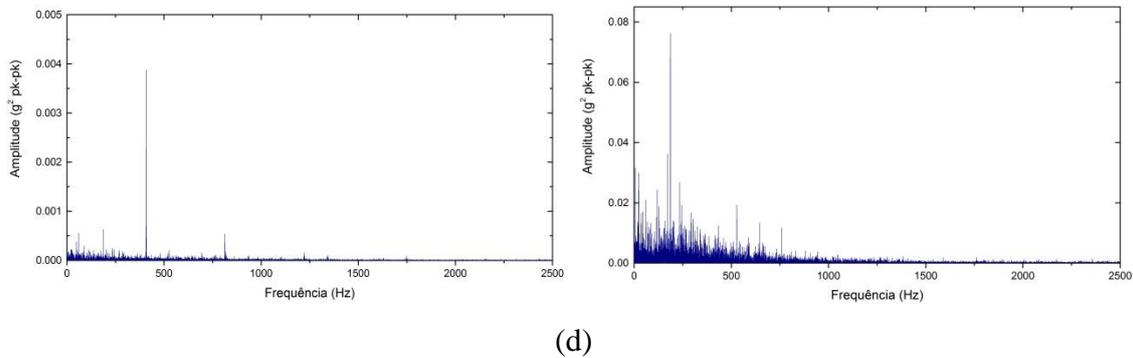


Figura 4.17. (a) Sinal de vibração original no domínio do tempo (b) Sinal com filtro ANC no domínio do tempo (c) FFT para sinal com e sem filtro ANC (d) Envelope para sinal com e sem filtro ANC.

A comparação entre o sinal filtrado e o não filtrado no domínio do tempo é apresentada na Figura 4.17 (a) e (b) observando a redução das amplitudes e maior o número de picos do sinal filtrado. Na Figura 4.17 (c) é gerado o gráfico FFT para o sinal com e sem filtro ANC onde se percebe a ausência dos componentes determinísticos (harmônicos do eixo) do sinal com filtro ANC. Na Figura 4.17 (d) se observa a comparação dos espectros dos envelopes dos sinais com e sem a filtragem, onde se nota claramente o destaque que o sinal filtrado dá ao pico efetivamente relacionado ao defeito, atenuando as bandas laterais e a presença de outros componentes (ruído).

## 4.6 Realce da Assinatura de Falha Utilizando um Filtro de Predição Linear

Mesmo após da remoção da frequência determinística, o sinal de rolamento, muitas vezes é mascarado, onde outros componentes da máquina ou até máquinas vizinhas podem estar gerando picos no sinal. Muitas técnicas foram desenvolvidas para capturar assinaturas mecânicas por meio de um tratamento específico. No entanto, a dificuldade persistente de que os sinais de vibração são muitas vezes severamente danificados por fortes níveis de ruído de fundo, englobam todas as outras fontes de vibração na máquina sob inspeção. Este problema pode ser formulado primeiro com a melhora da impulsividade com a utilização do *pre-whitening* e com a detecção de sinais

transitórios em um forte ruído aditivo, que é exatamente a situação adequada para a curtose espectral.

#### 4.6.1 Melhora da impulsividade por *Pre-whitening*

Outro passo de pre-processamento recomendado é o *pre-whitening* do sinal residual [81]. Um dos objetivos de se usar o *pre-whitening* em sinais de mancais de rolamento é maximizar a impulsividade do sinal (que é a assinatura da falha) num ambiente de forte ruído aditivo. O *pre-whitening* pode ser conseguido através da utilização da modelagem autorregressiva (AR), já descrita.

Como exemplo, BARSZCZ [75] apresenta a potencialidade do *pre-whitening* utilizando o modelo autorregressivo, o autor mostra os sinais no domínio do tempo de um rolamento com falha na pista externa (BPFO) para diferentes fases de processamento. O sinal bruto no domínio de tempo tem um valor de curtose baixa (2,99) e não mostra nenhum padrão significativo de impacto que poderia ser atribuído a uma falha do mancal. Na segunda fase de processamento, o sinal foi filtrado via média síncrona no tempo (TSA), onde os harmônicos do eixo foram removidos, sendo que essa remoção teve um efeito mínimo sobre o aumento da curtose do sinal. Na terceira fase, mostra os resultados de *pre-whitening*, que tem um padrão de repetição de impacto atribuído a uma falha que o autor constata com a técnica de envelope.

A Figura 4.18a mostra o sinal de vibração no domínio de tempo do mancal 1 que possui uma falha na gaiola (FTF) e é utilizado nesta dissertação como caso de estudo. O sinal original no domínio de tempo, apresentado na Fig. 4.18a tem um valor de curtose baixo (5.43) e não mostra nenhum padrão significativo de impacto que poderia ser atribuído a uma falha do mancal. Na segunda fase de processamento (fig. 4.18b), o sinal da Fig. 4.18a foi filtrado via ANC, onde os harmônicos do eixo foram removidos. Nota-se que a remoção dos harmônicos do eixo teve um efeito mínimo sobre o aumento da curtose de sinal (5.7). Na figura 4.18c mostram-se os resultados de *pre-whitening*., Note que se tem um padrão de repetição de impacto devido a uma falha e que pode ser constatado com a técnica de envelope.

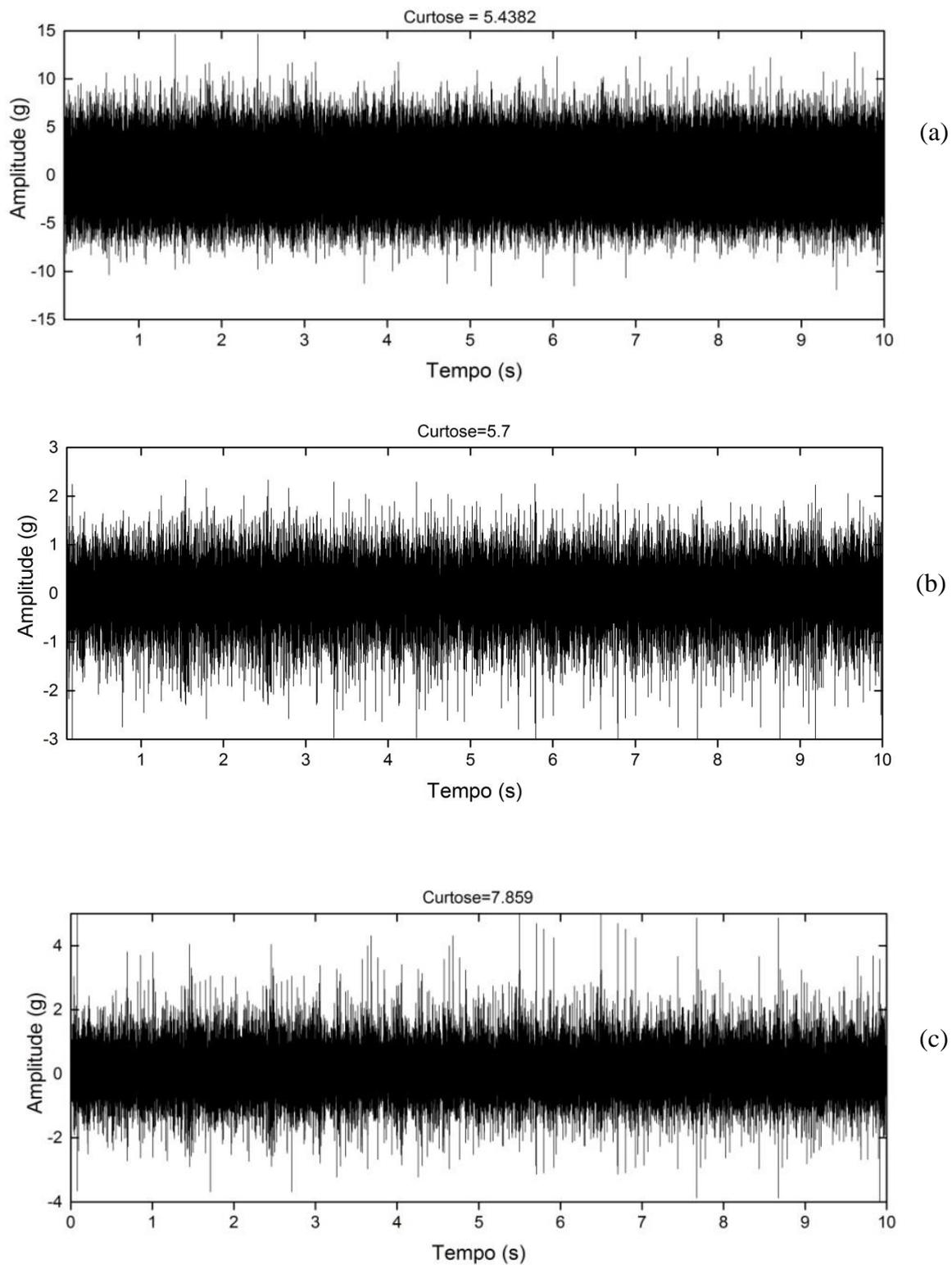


Figura 4.18. Sinais de vibração (aceleração) para o caso de falha na gaiola mancal 1: a) Sinal bruto, b) Após a remoção por ANC, c) sinal (b) após o *pre-whitening* (AR = 4).

## 4.7 Curtose espectral

A curtose espectral (SK) é uma ferramenta estatística que pode indicar a presença de uma série de transientes e sua localização no domínio da frequência. Já que as falhas em mancais de rolamento provocam uma série de respostas de impulsos curtos devido ao choque dos elementos rolantes com as falhas nas pistas, o SK é potencialmente útil para determinar as bandas de frequência dominadas por sinais de falha, e que geralmente contêm frequências de ressonância excitadas pelas falhas. Esta informação é necessária, a fim de se selecionar a banda de frequência ideal para realizar a “análise de envelope” dos sinais de rolamento. O espectro original de um sinal de mancal defeituoso contém pouca informação de diagnóstico, sendo dominado pela excitação de frequências de outros componentes ou equipamentos, enquanto o sinal de envelope, obtido pela demodulação de amplitude, contém as informações necessárias sobre frequência de repetição de impactos e qualquer modulação causada pela passagem da falha através da zona de carga.

O SK foi introduzido nos anos 80 para detectar transientes de um radar [82]. Após esta única aplicação, foi recentemente reintroduzido na comunidade de processamento de sinal para fazer a distinção entre diferentes tipos de sinais [83]. Em ambas as aplicações o SK do sinal  $x(t)$  foi definido em termos STFT  $X(t, f)$ , de forma a obter um diagrama de tempo/frequência de um sinal.

Tal como ilustrado na Figura 4.19, a STFT é obtida movendo-se uma janela de tempo curto, tal como Hanning, ao longo do sinal em etapas que se sobrepõem. Os espectros para cada posição da janela estão dispostos em um diagrama 3D com o tempo em um eixo e a frequência do outro.

O SK é então calculado para cada linha de frequência na direção de tempo. Isto mostra o resultado de tempo-frequência  $|X(t, f)|$  mas seu quadrado representa os valores do espectro de potência em cada posição de tempo.

A curtose pode ser calculada tomando a quarta potência do  $H(t, f)$  de cada tempo e a média de seu valor ao longo de todo o registro e, em seguida, normalizado pelo quadrado do valor médio ao quadrado. Pode ser demonstrado que, se 2 é subtraído dessa relação indicada pela equação (4.28), o resultado será zero para um sinal com distribuição Gaussiana [52].

$$K(f) = \frac{\langle |H(t, f)|^4 \rangle}{\langle |H(t, f)|^2 \rangle^2} - 3 \quad (4.28)$$

A interpretação da curtose espectral é ilustrada na Figura. 4.19 para o caso de um mancal de rolamento de sinal  $x(t)$  modelado como uma série de respostas de impulso  $g(t)$  excitado por impulsos  $X$  de tempos  $\tau_k$ .

$$x(t) = \sum_k g(t - \tau_k)X(\tau_k) \quad (4.29)$$

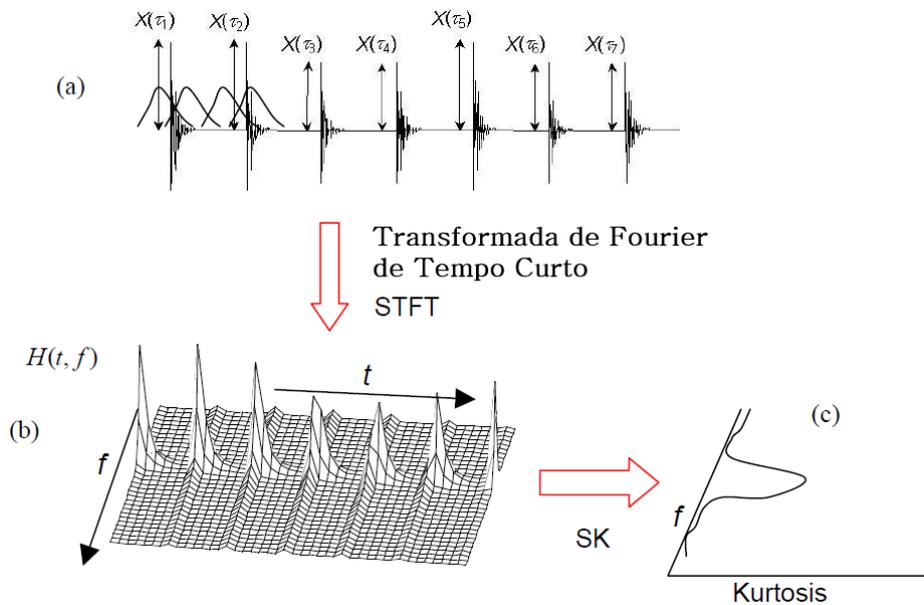


Figura 4.19. Cálculo do SK com STFT de um sinal de falha de rolamento simulado: (a) Sinal simulado tempo, (b) STFT, e (c) SK como uma função da frequência [84].

## 4.8 Seleção de Banda de Demodulação do sinal

Tem ocorrido há muito tempo o debate sobre o melhor método de escolha da banda de frequência para a demodulação do sinal de vibração por análise de envelope. O método mais lógico é baseado na comparação dos espectros, antes e após a ocorrência de uma mudança provavelmente devido a uma falha de mancal de rolamento.

No entanto, se a alteração é devido a uma falha, a diferença em dB iria indicar onde a relação sinal/ruído do sinal do mancal é mais alta e isso resultaria em um guia adequado para a seleção da frequência central ideal da banda de demodulação. A equação (4.30) define a diferença em dB dos sinais dos mancais defeituoso e saudável:

Diferença dB

$$Diferença\ dB = 20 \log \left( \frac{A_s}{A_n} \right) \quad (4.30)$$

SAWALHI [84] compara os espectros de um teste de uma caixa de engrenagem com e sem falha na pista interna do mancal. O intervalo do espectro vai de 0-24 kHz, mas se vê que a falha só provoca um aumento do espectro acima de 8 kHz. O espectro do mancal defeituoso parece com ruído branco e, portanto, não contém informações de diagnóstico. Também mostra o espectro de diferença dB e SK. Onde o SK tem praticamente a mesma forma que o espectro da diferença de dB e, portanto, podem ser igualmente bem utilizados para selecionar a largura de banda de demodulação ótima.

Surpreendentemente, os valores reais de curtose e diferença dB são aproximadamente os mesmos. Isto também se verificou ser o caso de uma falha na pista externa de menor extensão, onde os valores, tanto para diferença dB e SK foram de aproximadamente 6. No entanto, a escala real de SK é afetada pelo tamanho da janela utilizado [84].

A figura 4.20 compara os espectros para o defeito na gaiola do mancal de rolamento (mancal 1), utilizado como caso de estudo. O intervalo do espectro vai de 0-10 kHz, e se vê que a falha provoca um aumento do espectro de 4 a 6 kHz e 7 a 10 kHz. A Figura 4.20b mostra o espectro de diferença dB, enquanto a figura 4.20c mostra o

gráfico da curtose espectral (SK). Vê-se que o SK tem praticamente a mesma forma que o espectro da diferença de dB e, portanto, podem ser igualmente bem utilizadas para selecionar a largura de banda de demodulação ótima.

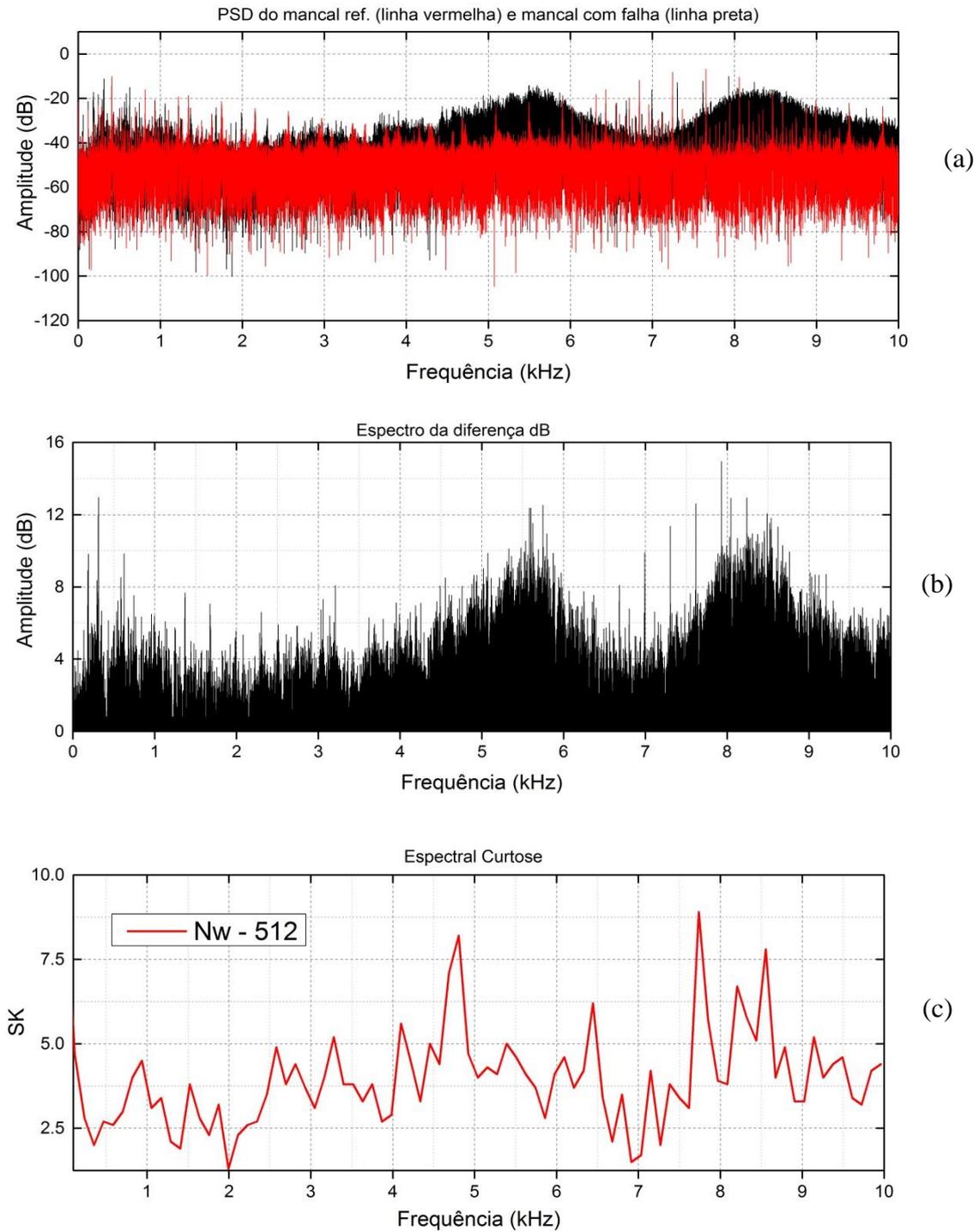


Figura 4.20. (a) Comparação com espectro dB com e sem falhas na gaiola (b) espectro de diferença dB (c) Curtose espectral.

## 4.9 Metodologia de Identificação de Falhas em Mancais de Rolamento

A metodologia para a identificação de falhas em mancais de rolamento foi dividida em cinco etapas:

1) A primeira etapa foi a aquisição dos sinais de vibração no domínio do tempo de 03 mancais defeituosos e 01 mancal normal.

2) A segunda etapa foi a separação do sinal do mancal em componentes determinísticos, neste caso os harmônicos da rotação do eixo, com a utilização do filtro adaptativo para cancelamento de ruído (ANC) que utiliza minimização do erro médio quadrático entre a saída do filtro e um sinal de referência (mancal sem defeito). A escolha deste filtro foi feita pela qualidade oferecida em seus espectros de envelope sem a utilização do sinal de tacômetro.

3) A terceira etapa foi o realce da assinatura de falha do mancal (sinal residual), utilizando o *pre-whitening* com o modelo auto-regressivo (AR) que aumenta os componentes impulsivos no sinal.

4) A quarta etapa foi a análise via SK para escolher a largura de banda ótima para a demodulação do sinal com a assinatura de falha realçada, através da análise do envelope.

5) A última etapa é a análise do sinal utilizando a técnica do envelope para identificar a frequência característica de falha presente.

A metodologia de identificação de falha utilizada pode ser descrita esquematicamente usando a Figura 4.21.

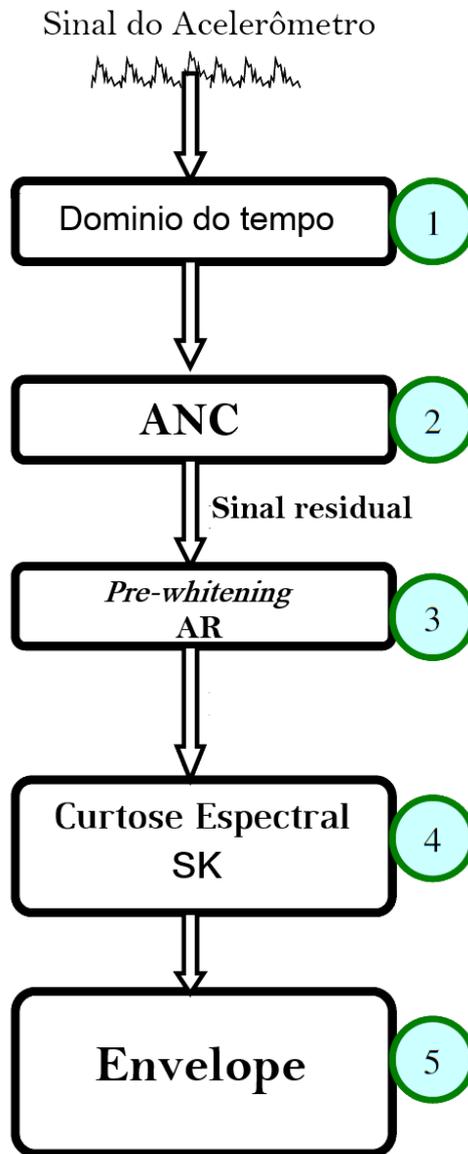


Figura 4.21. Diagrama de bloco das etapas da metodologia.

## Capítulo 5 - Estudo de Casos e Análise dos Resultados

Neste capítulo a metodologia proposta para a identificação de falhas é utilizada na análise de três mancais de rolamento defeituosos:

- Mancal 01 com defeito na gaiola;
- Mancal 02 com defeito na pista externa;
- Mancal 03 com defeito no elemento rolante (esfera)

### 5.1 Descrição do Aparato Experimental

Os mancais defeituosos foram montados, um de cada vez, num rotor-kit modelo ABVT (*Alignment / Balance Vibration Trainer*) que simula a operação de uma máquina rotativa. As falhas nos mancais foram introduzidos intencionalmente. Os mancais defeituosos e o rotor-kit utilizados nos experimentos podem ser vistos nas Figuras 5.1 (a) e (b).

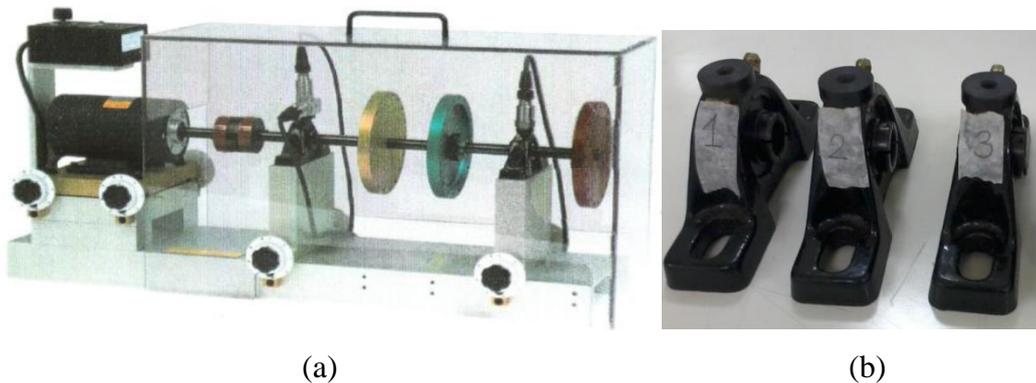


Figura 5.1. (a) Rotor Kit ABVT™ (b) Mancais defeituosos utilizados no experimento

As informações técnicas a respeito dos mancais do rotor-kit são as seguintes:

Número de elementos rolantes: 8 esferas;

Diâmetro da esfera: 0,7145 cm;

Diâmetro da gaiola: 2,8519 cm;

FTF: 0,375 CPM/RPM;

BPFO: 2,998 CPM/RPM;

BPFI: 5,002 CPM/RPM;

BSF: 1,871 CPM/RPM;

Um resumo teórico das frequências de defeito é mostrado abaixo na Figura 6.2.

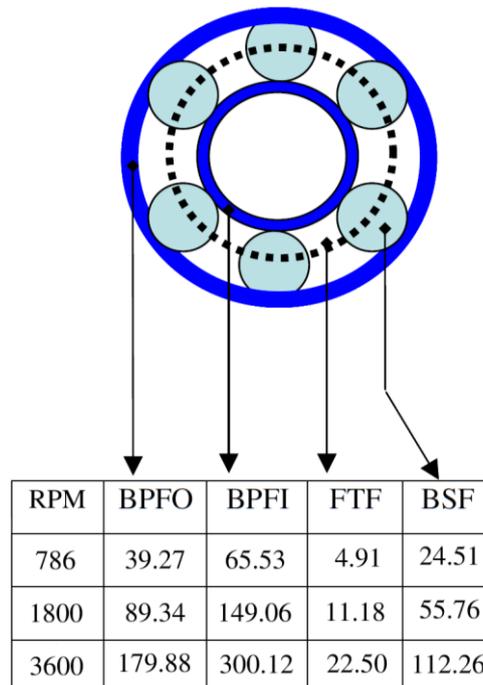


Figura 5.2. Cálculo das frequências características de falhas.

## 5.2 Aquisição de Dados

A aquisição de dados foi realizada no Laboratório de Ensaio Dinâmico e Análise de Vibrações (LEDAV) utilizando-se acelerômetros piezoelétricos e um sistema de aquisição de dados acoplado a um notebook. Os acelerômetros foram fixados usando-se uma base colada na carcaça do mancal, que têm contato direto com a pista externa.

Os sinais de vibração foram adquiridos na direção vertical, com uma taxa de aquisição de 60.000 amostras por segundo, durante 10 segundos, totalizando 600.000 amostras e tendo um espectro com frequência final de 30.000 Hz. Contudo, o acelerômetro utilizado responde linearmente até 10 kHz, e a sua frequência de ressonância fica em torno de 12.kHz.

Os dados foram adquiridos para três rotações diferentes do rotor-kit: 800 RPM, 1800 RPM e 3600 RPM.

### 5.2.1 Análise do mancal 01 com falha na gaiola

A Figura 5.3 mostra o sinal do mancal 01 com defeito na gaiola. Para se identificar este defeito foi utilizado o sinal adquirido com 3600 RPM. Para aplicar a metodologia sugerida nos capítulos anteriores, foram utilizados os seguintes passos:

1º Passo: - Sinais do acelerômetro no domínio do tempo

A Figura 5.3 mostra os sinais de vibração do mancal sem defeito (Mancal SD) e do mancal defeituoso (Mancal 01). A diferença entre os dois sinais é evidente, tanto na amplitude quanto no tipo de sinal. O mancal bom corre suavemente, sem impactos, enquanto que o mancal 01 apresenta amplitudes maiores e picos mais pronunciados.

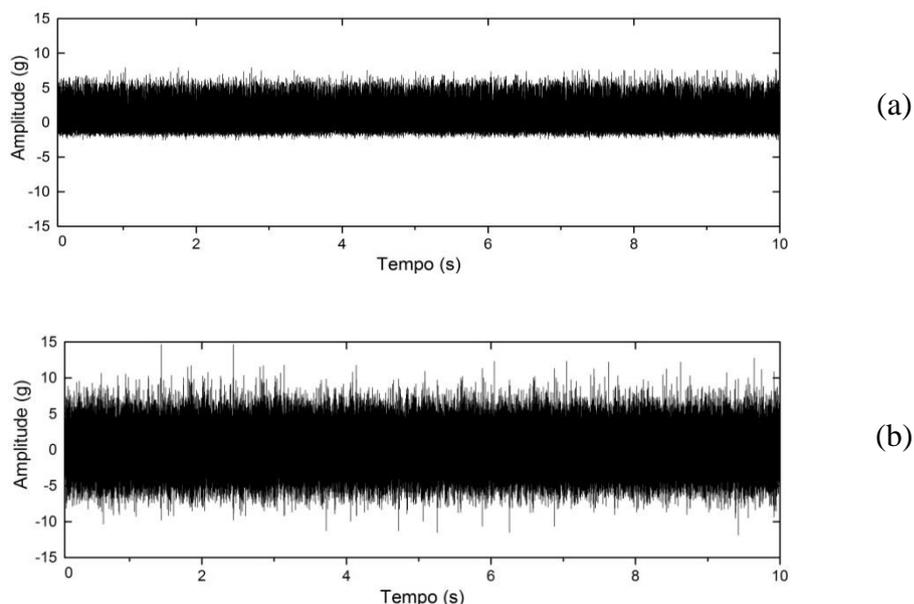


Figura 5.3. (a) Sinal de vibração do mancal sem defeito (b) Sinal do mancal com defeito.

A Figura 5.4 mostra os parâmetros estatísticos calculados para os dois tipos de mancais e incluem o valor RMS, valor de pico (peak), fator K e curtose (no tempo).

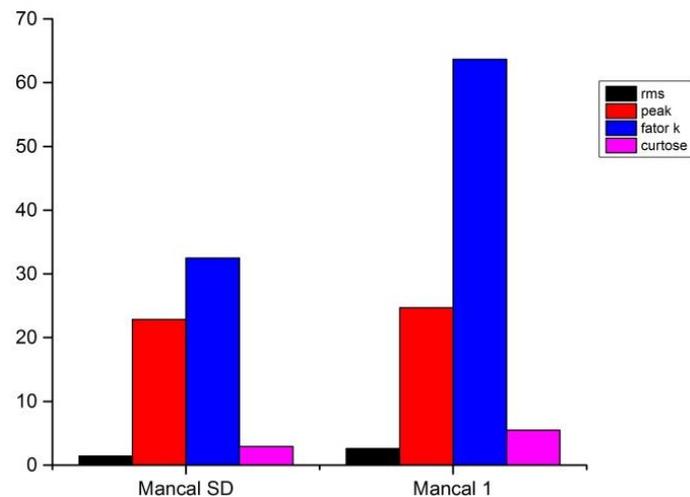
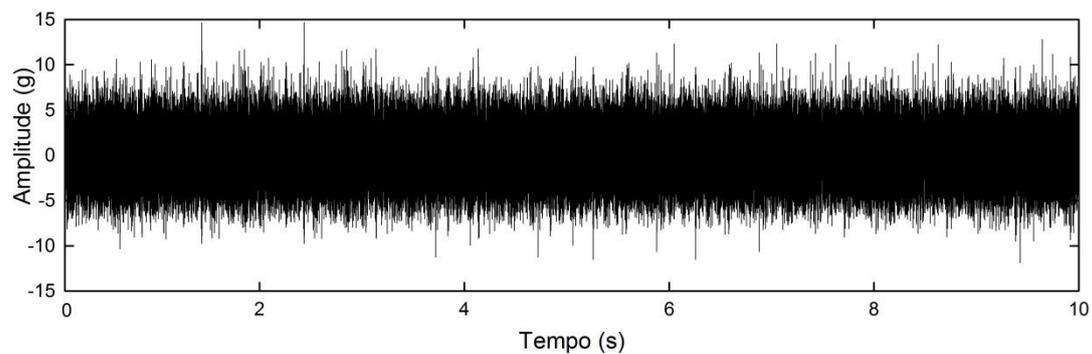


Figura 5.4. Gráfico comparando os parâmetros estatísticos para os mancais com e sem defeitos.

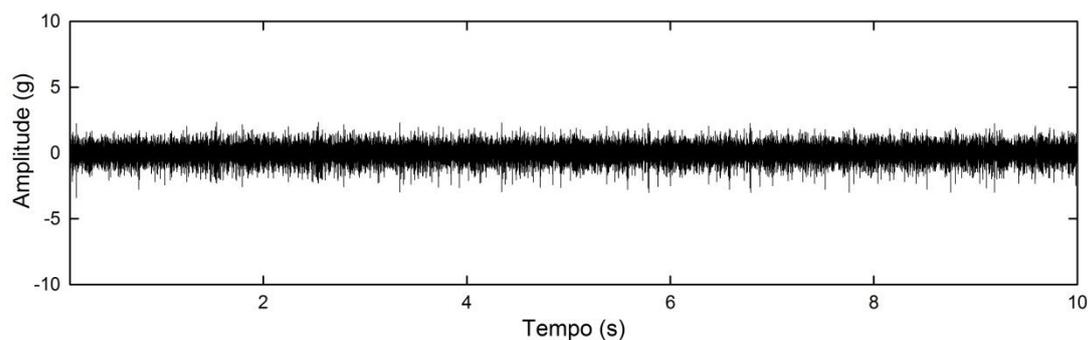
Percebe-se que houve um aumento nos parâmetros estatísticos para o mancal 01 que indica que ele está operando numa condição anormal. Os parâmetros estatísticos que mostram a maior diferença entre os dois conjuntos são o curtose e o fator k. O mancal 01 tem uma curtose superior a 3 (que é considerado como um indicativo de falha no rolamento) e tem um fator k elevado (que é um parâmetro muito sensível ao impacto).

2º Passo: - Remoção de componentes determinísticos utilizando o filtro ANC.

Para analisar a fonte dos impactos, o sinal original foi processado usando-se o filtro ANC, a fim de remover a parte determinística (harmônicos da rotação do eixo) e obter a parte residual do sinal. O resultado é mostrado na Figura 5.5b.



(a)



(b)

Figura 5.5. (a) Sinal original do mancal 01. (b) Parte residual do sinal após a filtragem.

Os valores estatísticos calculados para o sinal residual, após a aplicação do filtro ANC, estão mostrados na Figura 5.6 e são comparados com os valores apresentados na Figura 5.4. Um aumento da curtose indica que os impactos estão mais realçados após o processo de filtragem. Observa-se que o valor RMS do sinal foi muito reduzido mostrando que grande parte do conteúdo energético do sinal era devido aos componentes discretos de frequência.

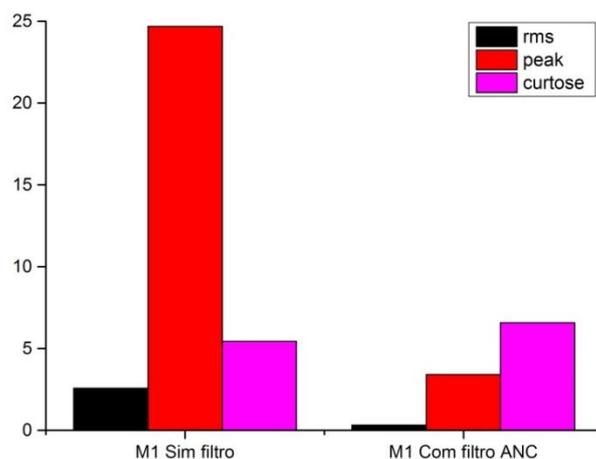


Figura 5.6. Gráfico comparando os parâmetros estadísticos para o mancal sim e com filtro ANC.

O uso do ANC para remover a parte determinística resultou num aumento significativo na curtose do sinal. Isso permitirá uma comparação por PSD ou SK para ver onde é maior diferença de defeito do mancal e demodular o sinal de defeito.

### 3º Passo: - Realce da assinatura de falha

O sinal residual do mancal 01, mostrado na Figura 5.5b, é processado utilizando o modelo de predição linear com o objetivo de realçar os impactos presentes nesse sinal aleatório.

A seleção da ordem ideal para o modelo linear implementado é baseada na maximização da curtose do sinal residual, discutida anteriormente.

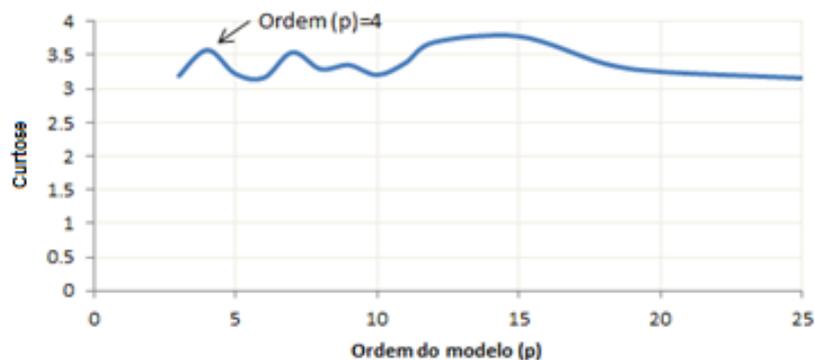


Figura 5.7. Seleção da ordem do modelo para o *pre-whitening* do sinal.

A Figura 5.7 mostra que a ordem do modelo que maximiza a curtose para do sinal residual do mancal 01 é 4 (AR (4)). Um modelo auto-regressivo (AR) com uma ordem maior do que 10 aumentaria demasiadamente o “achatamento” do sinal, eliminando os impulsos.

A Figura 5.8 mostra o sinal obtido após a utilização do filtro AR(4). O valor de curtose de 7.8 é maior que o do sinal original, de 5.4. A Figura 5.9 compara os valores de curtose dos sinais ao longo das etapas de identificação de falhas.

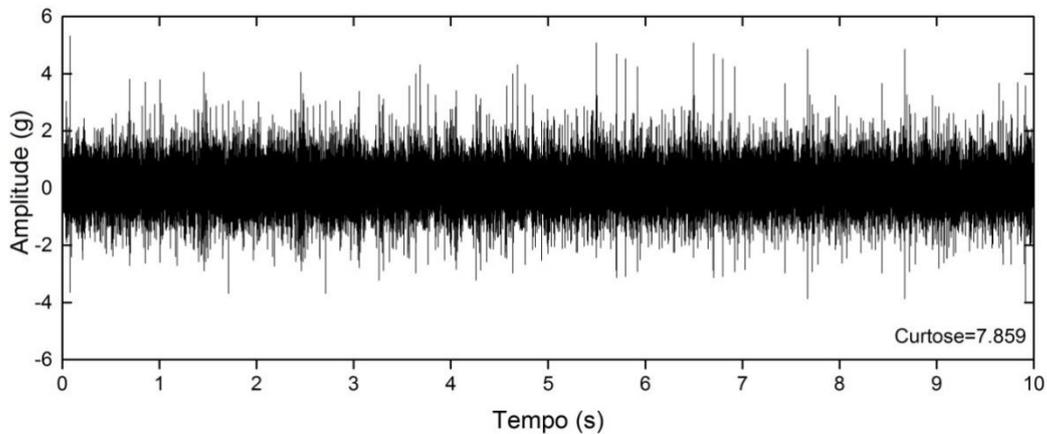


Figura 5.8. Sinal residual após o realce dos impactos pelo modelo AR (4)

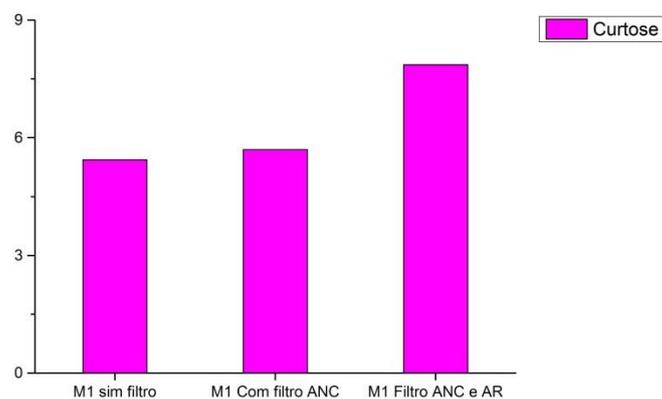


Figura 5.9. Comparação de valores de curtoses ao longo das etapas de filtragem do sinal.

#### 4º Passo: - Cálculo da curtose espectral (SK)

O sinal residual da Figura 5.8 é utilizado no cálculo da SK para a seleção da banda de frequência dominada pelo sinal de defeito do mancal para, posteriormente ser demodulado através da análise do envelope.

Como já foi mencionado, o cálculo de SK depende da escolha de alguns parâmetros de análise e, principalmente, do comprimento da janela. Na Figura 5.10, o SK foi calculado para comprimentos de janela ( $N_w$ ) de 128, 256, 512 e 1024 amostras. Para janelas com 128 e 256 amostras, a resolução em frequência é insuficiente, enquanto que para janelas com amostras maior do que 1024, não se identifica uma banda ótima para a seleção.

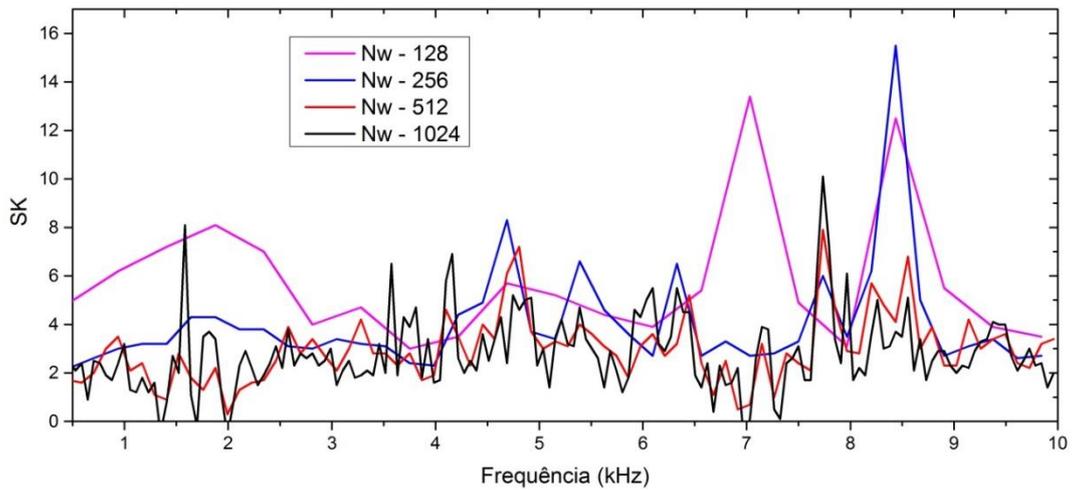


Figura 5.10. Cálculo de SK para janelas (Nw) com 128, 256, 512 e 1024 amostras.

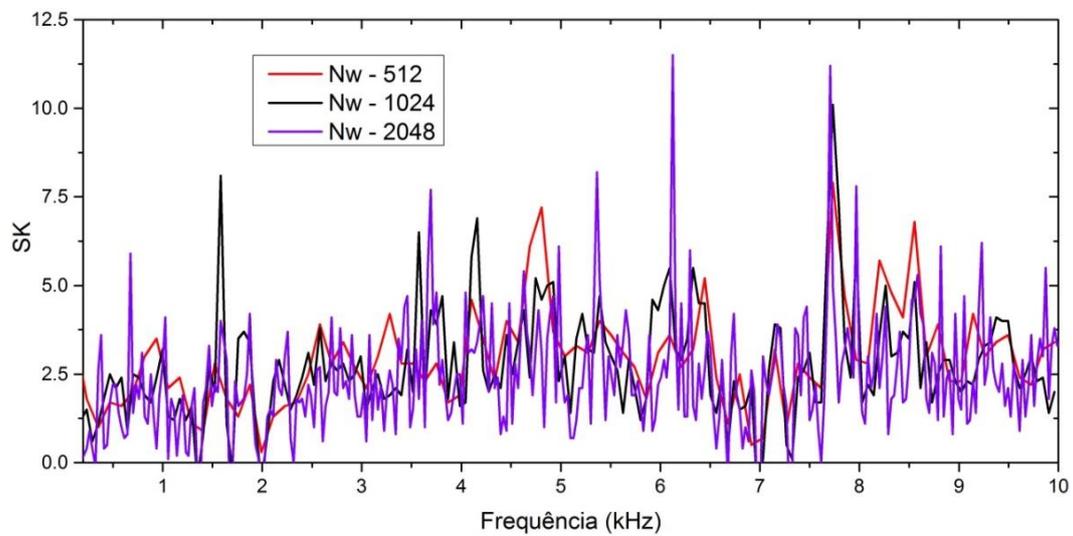


Figura 5.11. Cálculo de SK para janelas (Nw) com 512, 1024 e 2048 amostras.

A Figura 5.12 mostra o cálculo da kurtose espectral (SK) utilizando-se uma janela de 512 amostras, que foi selecionada como a janela ideal de análise. A faixa de frequência selecionada para demodulação está centrada na frequência de maior kurtose (7,734 kHz) e com uma largura de banda de 1 kHz, conforme recomendada por BUCHNER [63] de 3% a 24% em torno de frequência central escolhida.

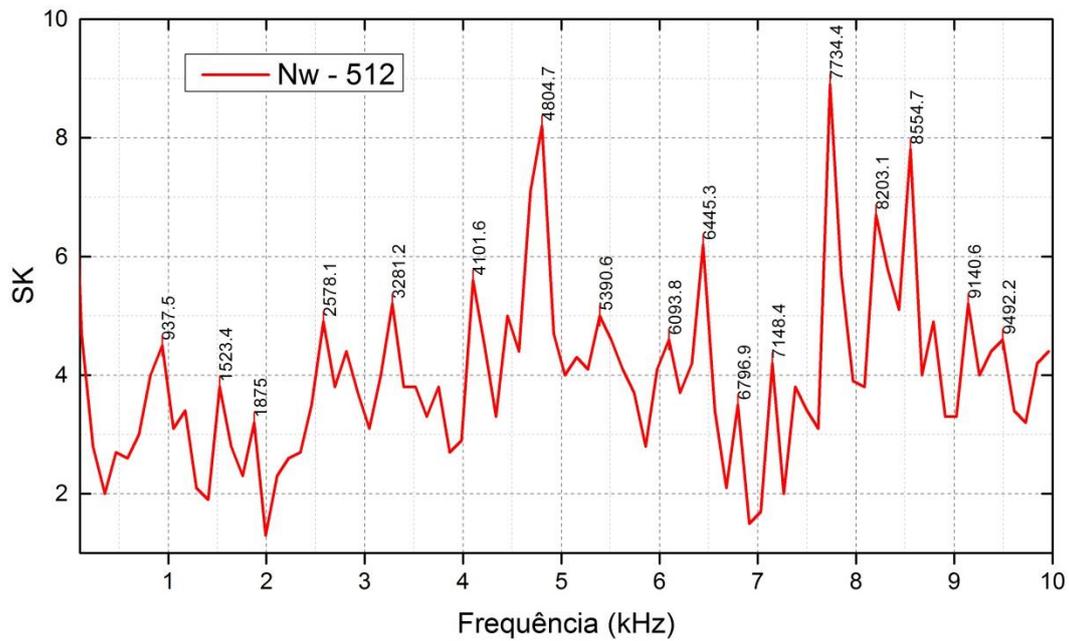


Figura 5.12. Cálculo de SK para Nw-512.

#### 5º Passo: - Análise Envelope

O último passo do processamento é a análise do envelope do sinal residual, após o realce dos impactos, com a finalidade de identificar a frequência dos impactos contidos nesse sinal.

A banda de demodulação selecionada foi de 1 kHz centrada em 7,73 kHz. Foi observado que, para outras frequências centrais correspondentes a picos de curtose, consegue-se identificar corretamente a falha do mancal 01.

A Figura 5.13 mostra o espectro de envelope, onde pode ser identificada a frequência de 407,12 Hz, relativa ao defeito provocado na gaiola, cujo valor teórico foi previamente calculada como múltiplo de 22,5 Hz (405 Hz).

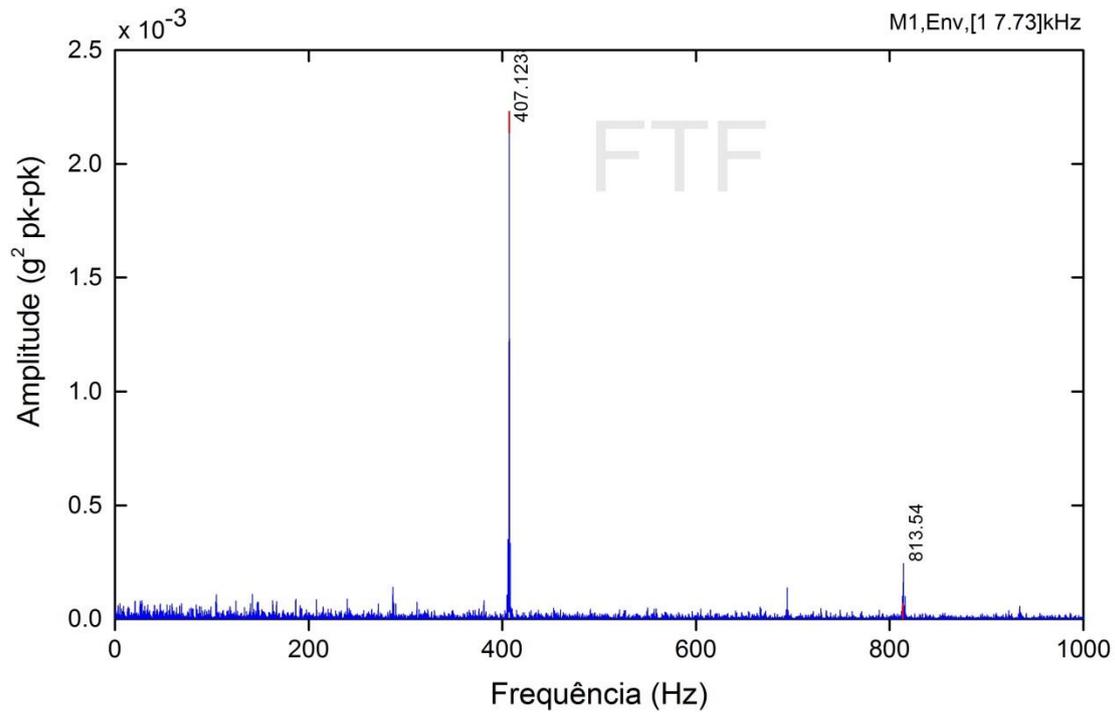


Figura 5.13. Espectro de envelope para o mancal 1, largura de banda 1kHz e banda central 7.73 kHz.

### 5.2.2 Análise do mancal 02 com falha na pista externa

Para se analisar a falha no mancal 02, foi utilizado o mesmo procedimento do mancal 01. Abaixo, serão apresentados os resultados da análise.

A Figura 5.14 mostra o sinal do mancal 02 que possui um defeito na pista externa. A falha neste mancal foi identificada quando o mancal 02 estava a uma rotação de 1800 RPM.

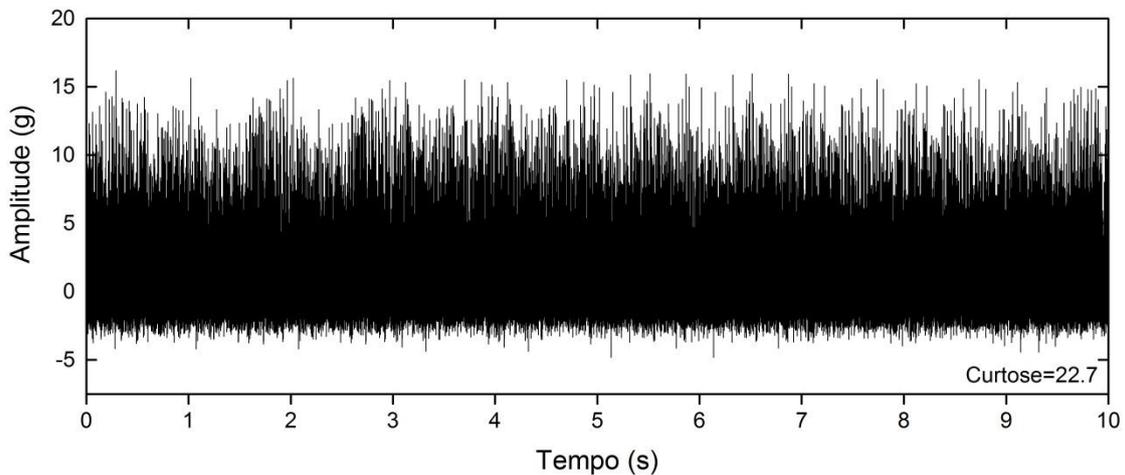


Figura 5.14. Sinal original do mancal 02

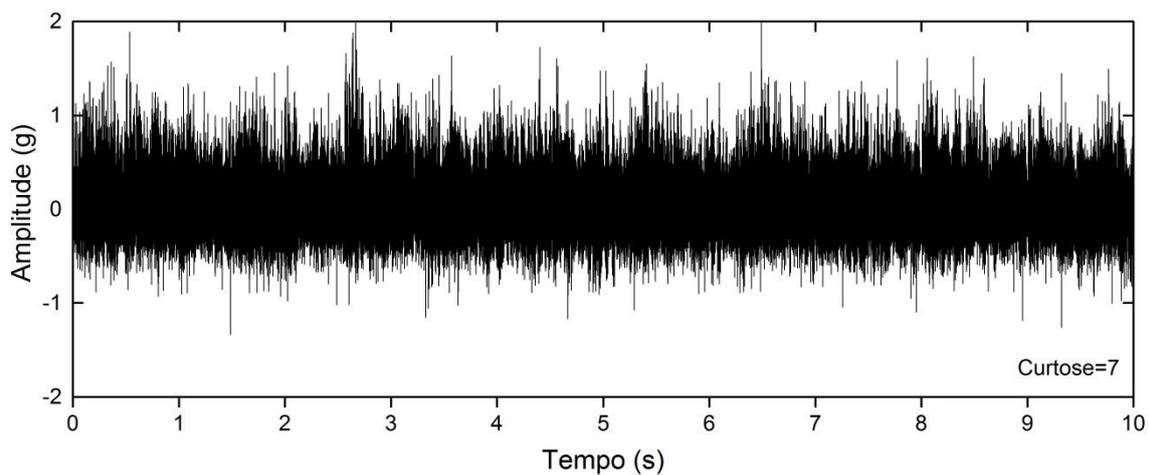


Figura 5.15. Sinal do mancal 02 após o realce dos impactos utilizando o filtro AR (4).

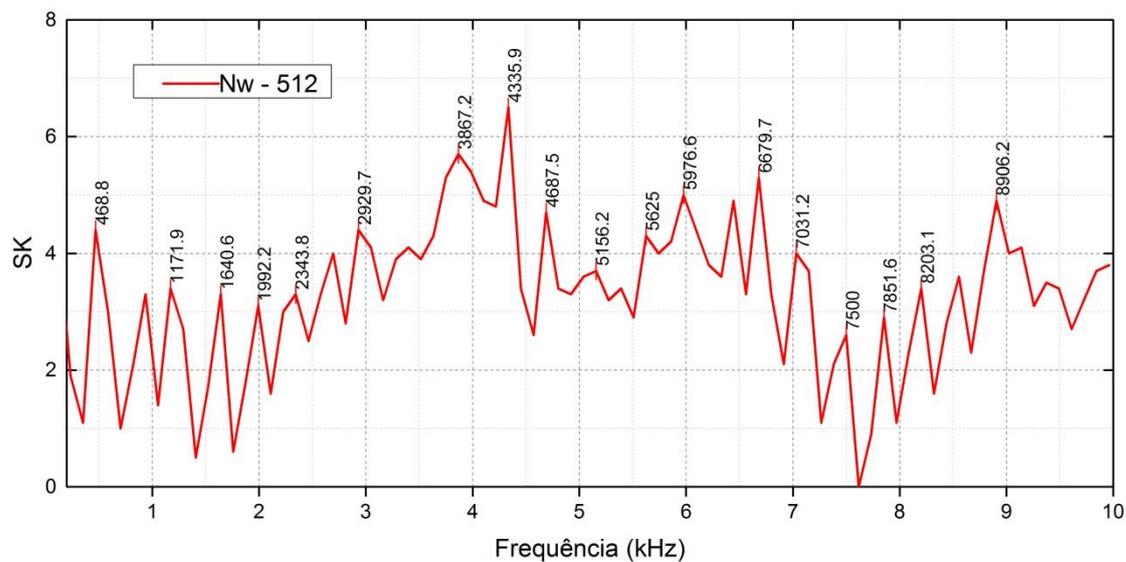


Figura 5.16. Cálculo de SK utilizando a janela (Nw) ótima de 512 amostras.

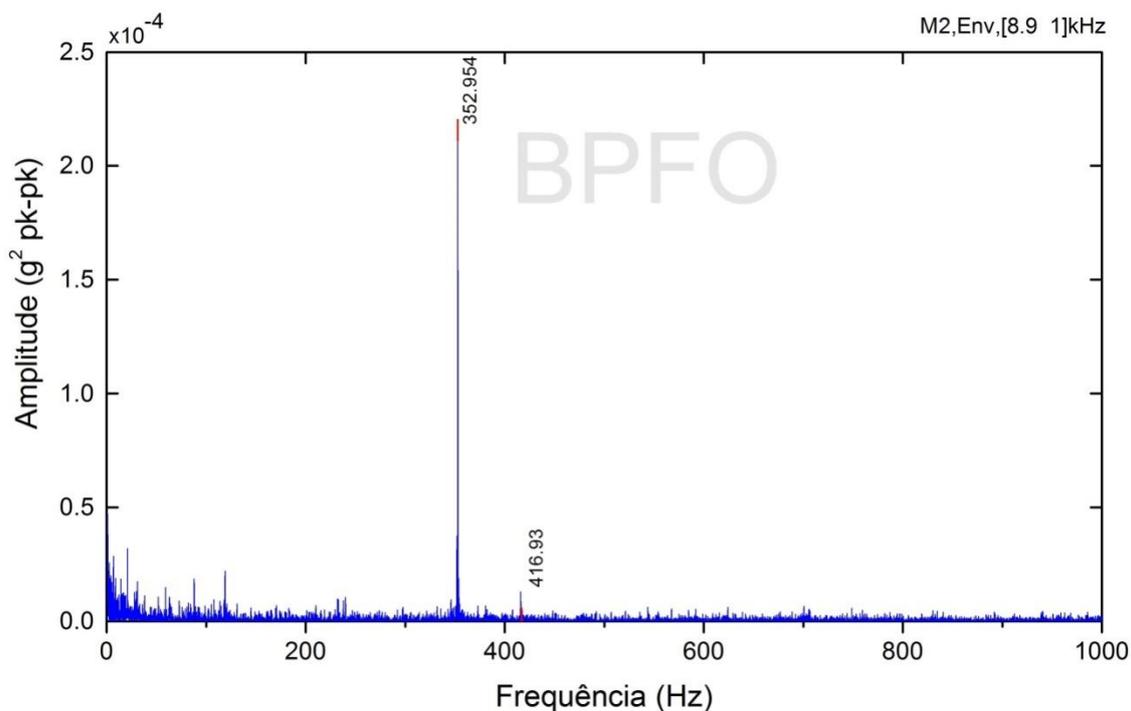


Figura 5.17. Espectro de envelope para o mancal 02, com frequência central de 8,9 kHz e largura de banda de 1 kHz.

A Figura 5.16 mostra o espectro de envelope, onde pode ser identificada a frequência de 352,95 Hz, relativa ao defeito provocado na pista externa, a qual foi previamente calculada, com os dados do mancal, como múltiplo de 89,34 Hz (357,36 Hz).

### 5.2.3 Análise do mancal 03 com falha no elemento rolante ( esfera)

A Figura 5.17 mostra o sinal de um rolamento com defeito nas esferas. Para identificar este tipo de defeito foi utilizado sinais de vibração do mancal 03 operando a 800 RPM.

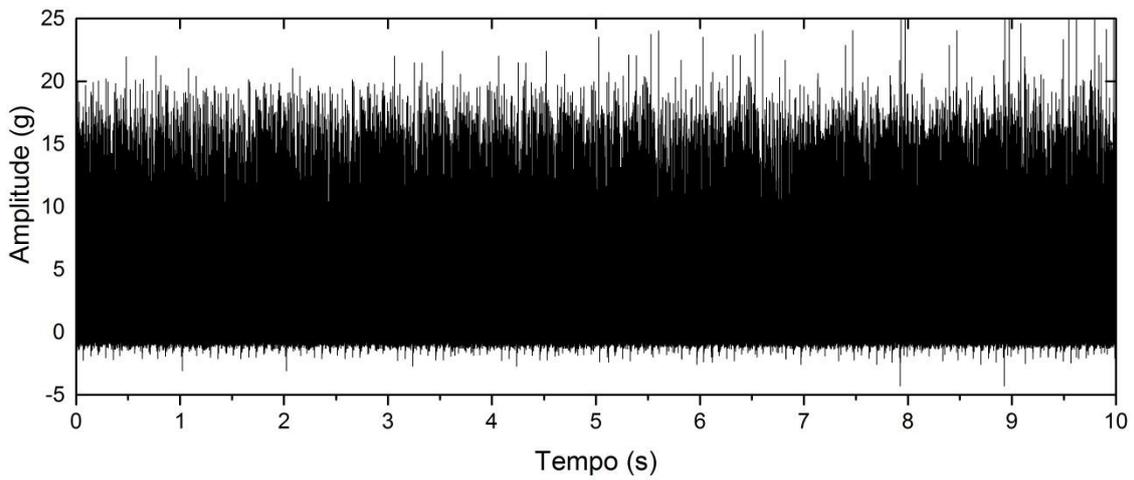


Figura 5.18. Sinal original do mancal 03.

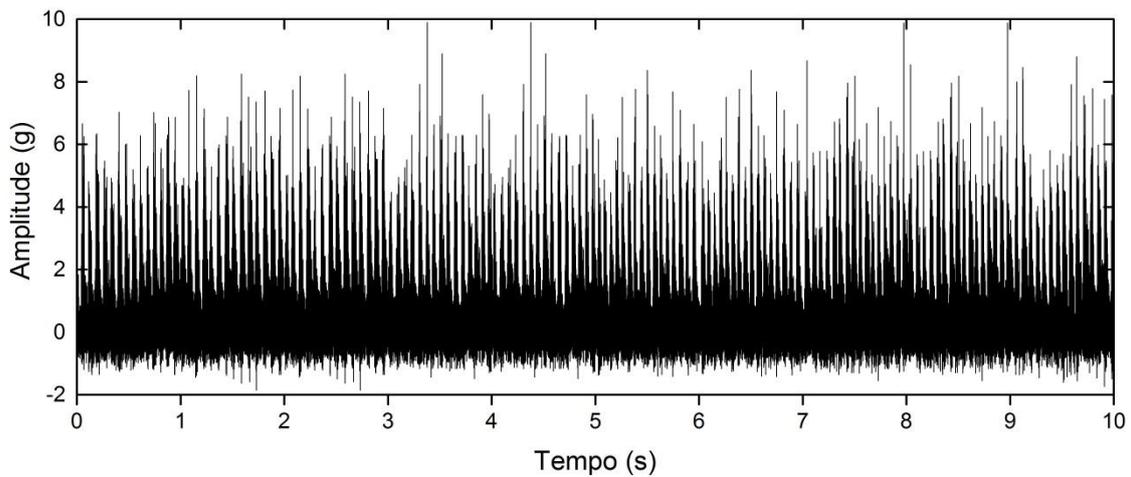


Figura 5.19. Sinal do mancal 03 após o realce dos impactos utilizando o filtro AR (4).

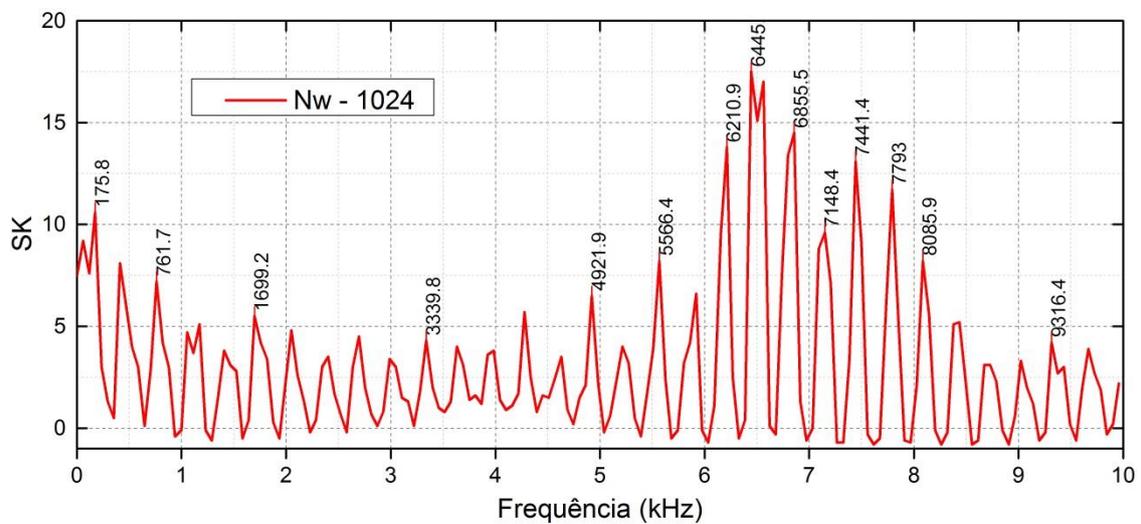


Figura 5.20. Cálculo de SK utilizando a janela (Nw) ótima de 1024 amostras

A Figura 5.19 mostra a presença dos picos na frequência de defeito na gaiola, que é de 15 Hz e na esfera, que é de 320 Hz. As frequências características de falha desse mancal foi previamente calculada como múltiplos de 4,91 (14,73 Hz) e 24,51 (318,63 Hz).

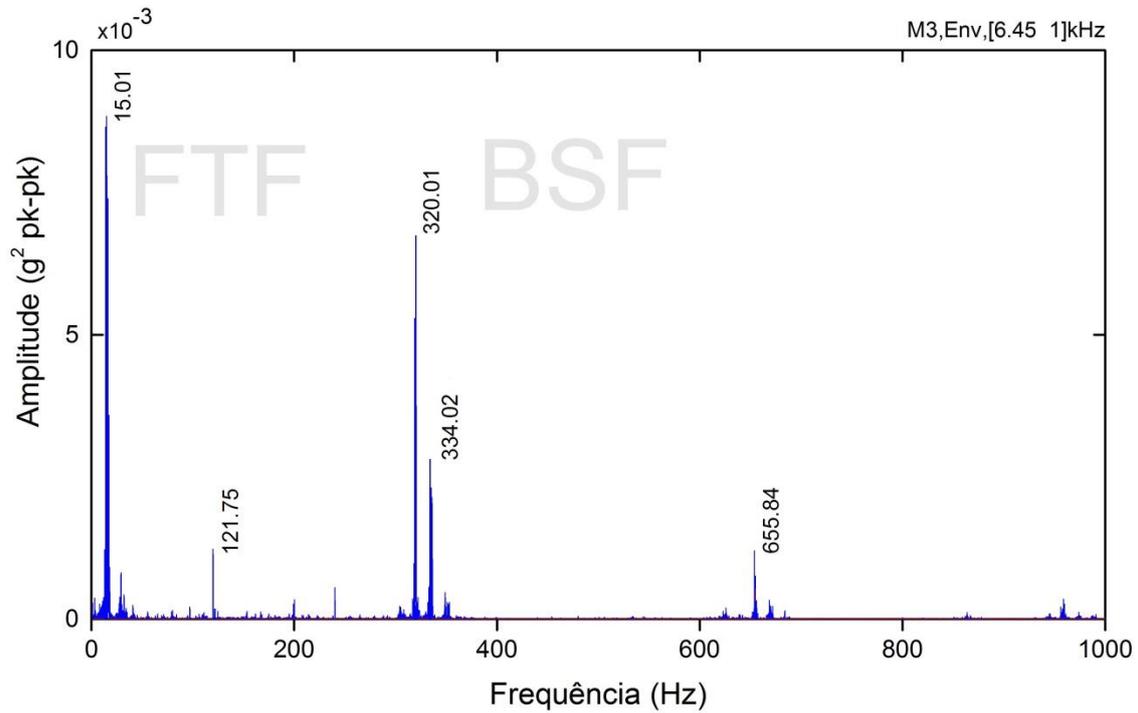


Figura 5.21. Espectro de envelope para o mancal 03, com frequência central de 6,45 kHz e largura de banda de 1 kHz.

## Capítulo 6 - Conclusões e Recomendações

Como conclusão do trabalho pode-se dizer que a metodologia utilizada para detectar e diagnosticar falhas em mancal de rolamento é eficiente. Com as técnicas de processamento de sinais utilizadas é possível afirmar que a falha se encontra na gaiola, pista externa ou nas esferas. Essa conclusão está baseada na avaliação de que o erro encontrado entre as frequências teóricas de falha e as frequências de falha encontradas experimentalmente não ultrapassa, em nenhum caso, 1,2%, sendo assim possível isolar as frequências de falha das outras frequências e ruídos.

A seguir serão enumeradas as principais conclusões deste trabalho:

1) Quanto ao método que emprega o filtro adaptativo para cancelamento de ruído (ANC) verificou-se que é uma ferramenta poderosa na separação de componentes determinísticos e eliminou eficientemente os harmônicos da rotação do eixo devido a desbalanceamento ou desalinhamento. Um inconveniente desse método é que é necessário a utilização de um sinal de referência (mancal sem defeito);

2) O método de realce dos impactos presentes no sinal do mancal defeituoso através do modelo de predição linear, AR(4), demonstrou ser uma boa ferramenta para maximizar a impulsividade do sinal, aumentando o valor de curtose consideravelmente. Contudo, é necessário escolher a ordem do modelo a ser utilizado na análise baseado em algum critério. Neste trabalho, o critério utilizado foi a maximização da curtose (no tempo).

3) O método de curtose espectral, é uma ferramenta útil para determinar as bandas de frequência dominadas por sinais de falha do mancal. Contudo, antes de se calcular o SK é necessário selecionar a janela ótima de cálculo da transformada de Fourier de curto tempo (STFT). Neste trabalho a seleção da janela ótima foi feita por inspeção, após calcular STFTs para vários tamanhos de janela.

4) Finalmente, a demodulação pelo método de envelope das frequências dos impactos contidos no sinal residual, após o uso do AR(4), levou à identificação dos defeitos nos três mancais de teste, mostrando a eficácia da técnica do envelope.

Como trabalhos futuros fazem-se as seguintes sugestões:

1) Utilizar um método de separação de componentes determinísticos que não precise do sinal de referência (mancal sem defeito); Por exemplo, uma extensão do conceito de cancelamento de ruído adaptativo ANC, é o cancelamento de ruído auto-adaptativo (SANC), onde o sinal de referência é simplesmente uma versão atrasada do sinal do mancal defeituoso. Outra técnica que pode ser utilizada, é a média síncrona no tempo (TSA) que remove componentes discretos múltiplos da rotação do eixo usando como referência um sinal de trigger (que serve para calcular a rotação do eixo);

2) Neste trabalho foram implementados o filtro ANC, o filtro AR(4) e o cálculo da curdose espectral baseada no cálculo da STFT, de formas isoladas. A sugestão seria desenvolver um software semi-automático para a identificação de falhas e realizar testes em mancais com outros tipos de elementos rolantes e outros tipos de carregamentos;

# Apêndices

**Apêndice A** – Programa LabVIEW, tela inicial para a aquisição e visualização de sinais.

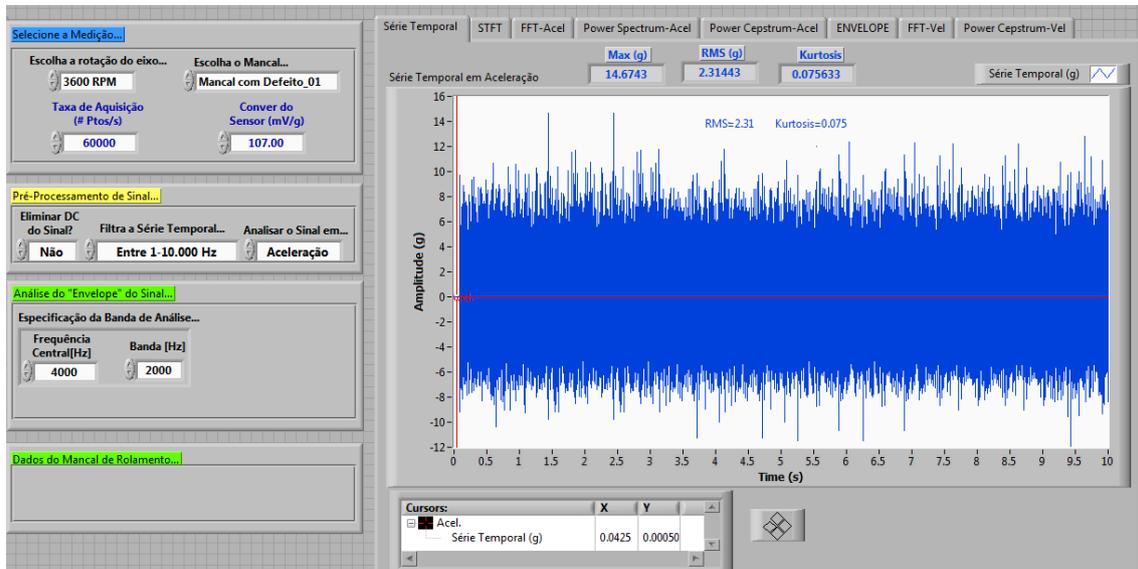


Figura A1. Tela inicial do programa.

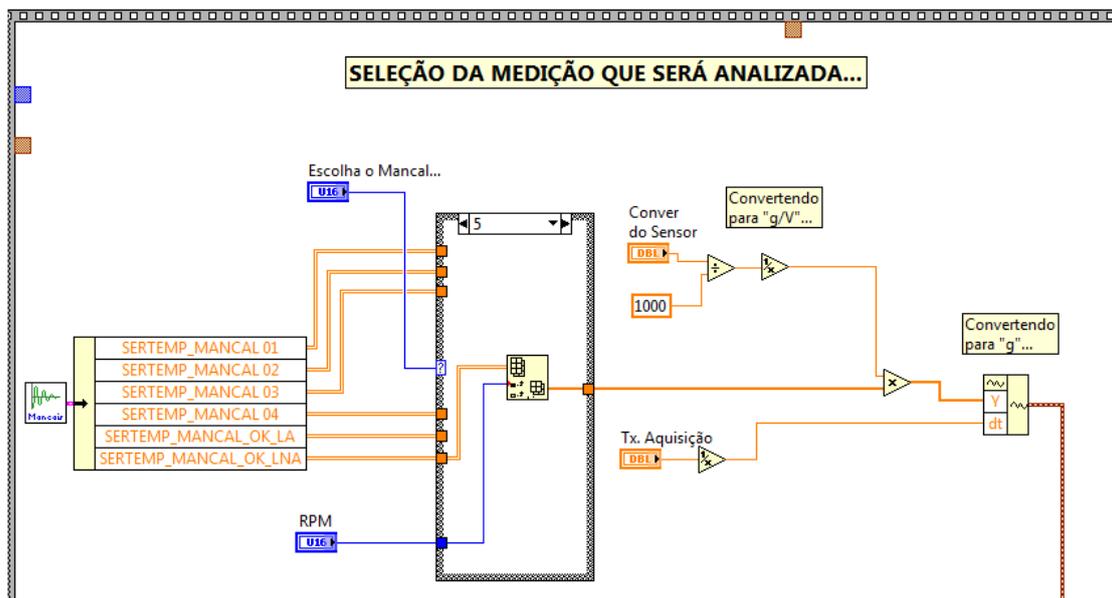


Figura A2. Diagrama de bloco para a tela inicial.

## Apêndice B – Programa LabVIEW para filtro ANC

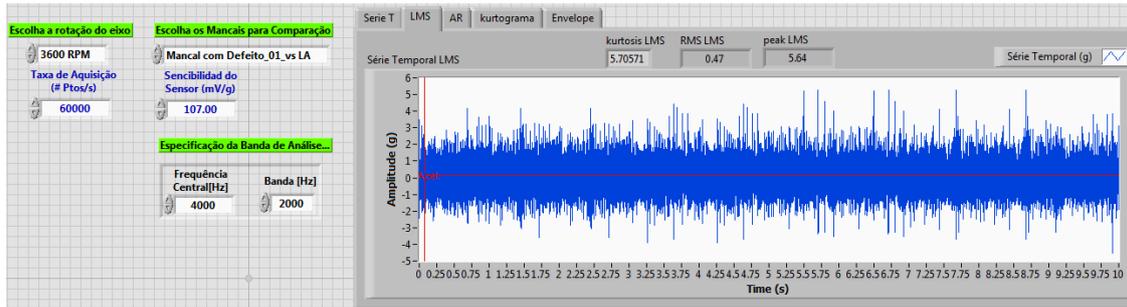


Figura B.1 Tela de visualização do filtro ANC.

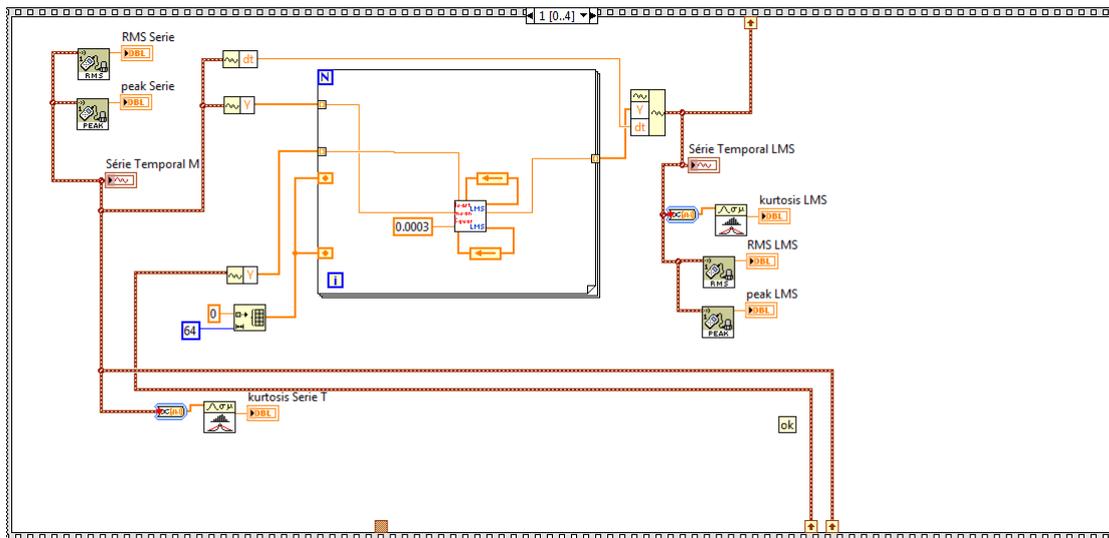


Figura B2. Diagrama de bloco para o filtro ANC.

## Apêndice C – Programa LabVIEW para filtro “Predição linear –AR”.

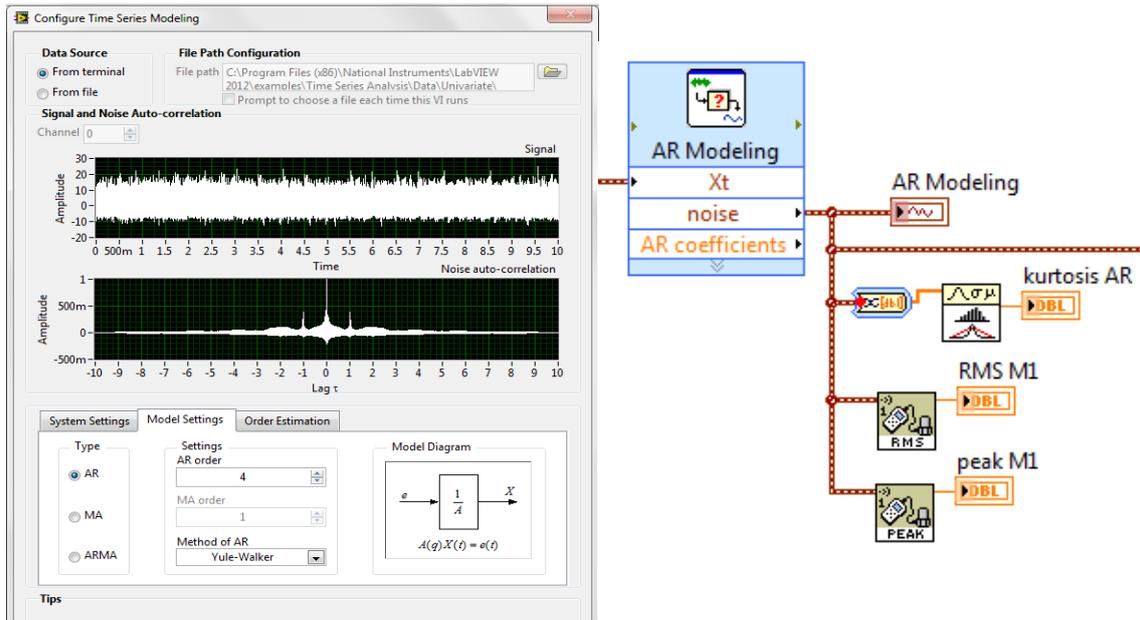


Figura C1. Diagrama de bloco para o filtro Predição linear.

## Apêndice D – Programa LabVIEW Espectral Curtose.

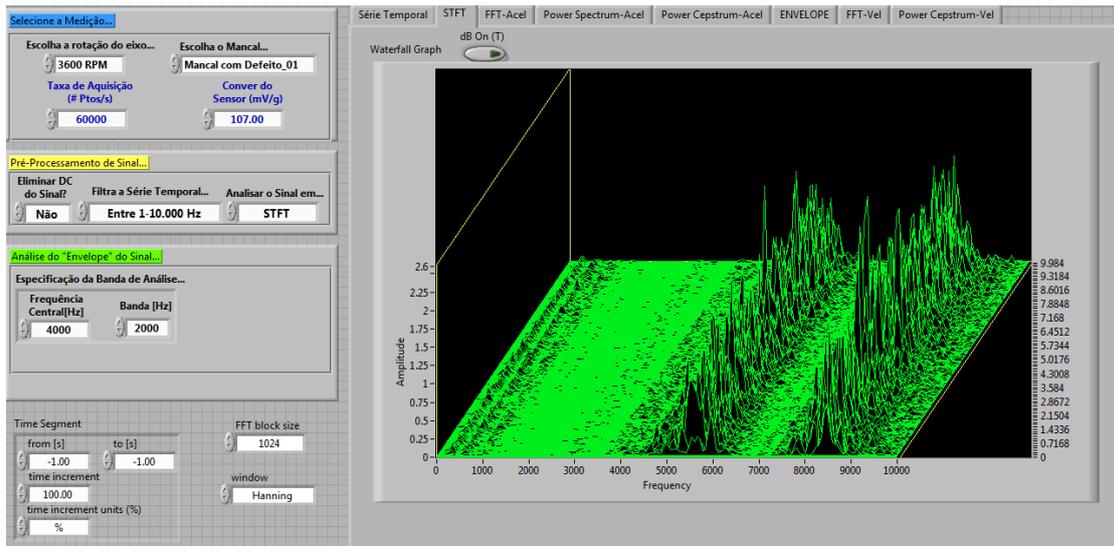


Figura D1. Tela de visualização para STFT.

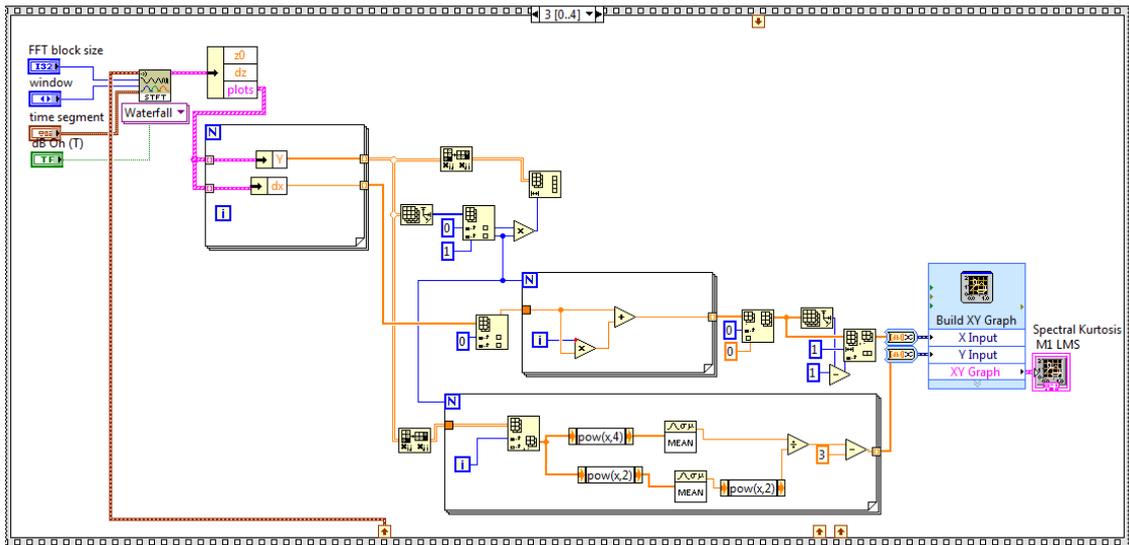


Figura D2. Diagrama de bloco para SK.

## Referências Bibliográficas

- [1] FUJIMOTO, R.,Y., “Diagnóstico Automático de Defeitos em Rolamentos Baseado em Logica Fuzzy”, 2005. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- [2] SKF Brasil, *Rolamentos, unidades e mancais*,
- [3] SCHAEFFLER Brasil, Productos e Serviços,  
[http://www.schaeffler.com.br/content.schaeffler.com.br/pt/products\\_services/products\\_services.jsp](http://www.schaeffler.com.br/content.schaeffler.com.br/pt/products_services/products_services.jsp) acessado em 05 de novembro de 2013.
- [4] RUFFINI, J. A., Bearing noise. *Machine design*, v11-8, p. 232-235, may, 1963.
- [5] TALLIAN, T.,GUSTAFSON, O., Progress in rolling bearing vibration research and control, ASLE Paper 64C-27, October 1964.
- [6] BOTO, P. A., 1971. Detection of bearing damage by shock pulse measurement. *Ball Bearing Journal*, v. 167, p. 1-7, Gothenburg.
- [7] MONK, R., 1972. Vibration gives warning of mechanical faults. *Processing Engineering*, v. 53, p135-137, nov.
- [8] BRAUN, S. E DATNER, B., Analysis of roller/ball bearing vibrations. *Journal of Mechanical Design*, Transactions of the ASME, v. 101, p. 118-125,jan, 1979.
- [9] TAYLOR, J. I, 1980. Identification of bearing defects by spectral analysis. *Journal of mechanical design*, v102, p. 199-205, apr.
- [10] BRAUN, S. Mechanical signature analysis of sonic bearing vibrations. *IEEE transactional on sonic and ultrasonics*. Vol. SU-27, Nº 6, Nov. (1980), pp.317-328.
- [11] BOYES, J. Reciprocating machinery analysis with FFT analyser. *Brüel & Kjaer application notes*.(1981), Nº 105, 6 pp.
- [12] MCFADDEN P. D., SMITH, J. D., Model for the vibration produced by a single point defect in rolling element bearing. 1983, *Journal of Sound and Vibration*, pp. 69-82.
- [13] MCFADDEN, P. D. E SMITH, J. D., Model for the vibration produced by a single point race in rolling element bearing. *Journal of Sound and Vibration*, pp. 69-82, (1984a).
- [14] MCFADDEN, P. D., e SMITH, (1984b). Vibration monitoring of rolling element bearings by the high frequency resonance technique a review. *Journal of Sound and Vibration*.

- [15] MCFADDEN, P. D. e SMITH, J. D., (1985). The vibration produced by multiple points defects in rolling element bearing. *Journal of Sound and Vibration*, pp. 263-273.
- [16] MARTINS, L. G., 1985. Detec ao de defeitos em rolamentos através do processamento e análise de sinais de vibrações. Florianópolis. 106f Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)-PPEM, UFSC.
- [17] VILLE, J. “Theory et Application de la Notion de Signal Analytique”. *Cables et Transmissions*. 1984. Vol. 20-A.
- [18] WHITE, G., 1991. Amplitude demodulation: a new tool for predicitive maintainance. *Sound and Vibration*, p. 14-19.
- [19] MECHEFSKE, C. K., MATEHW, J., 1994. Fault detection and diagnosis in low speed rolling element bearing using inductive inference classification. *Mechanical Systems and Signal Processing*, p. 275-286.
- [20] AZOVTSEV Yu. A., BARKOV A.V., YUDIN I.A., 1994, “Automatic Diagnostics of Rolling Element Bearings Using Enveloping Methods,” *Proceedings of the Vibration Institute 18th Annual Meeting*, pp. 249-258.
- [21] GRAPS, A. “An introduction to Wavelets”. *IEEE Computational Science*. 1995, vol. 2, num. 2.
- [22] BARKOV, A. V., BARKOVA, N. A., MITCHELL, J. S. ,1995, “Assessing the Condition and Life time of Rolling Element Bearings from a Single Measurement”, *proceedings of the 19th annual meeting of the Vibration Institute*. Disponível em: <http://www.vibrotek.com/articles/>.
- [23] LOGAN, D. B., MATHEW, J.,1995, “Using the correlation dimension for vibration fault diagnosis of rolling element bearing-L Selection of experimental parameters”. *Mechanical Systems and Signal Processing*,p. 241-250.
- [24] BAILIE, D. C. e MATHEW, J., 1995. “A comparison of autoregressive modeling techniques for fault diagnosis of rolling element bearing”. *Mechanical Systems and Signal Processing*, p. 1-17.
- [25] RANTALL, R. B. e ME, Y. G., 1996. “Masking effects in digital envelope analysis of faulty bearing signals. *ImechE*”, C500/097/96, p. 351-359.
- [26] WANG, Y. F., KOOTSOOKOS, P. J., 1997. Modeling of low shaft speed bearing fault for condition monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing*, p. 415-426.
- [27] GADE, S., GRAM-HANSEN, K. “Non-stationary signal analysis using Wavelet Transform, Short-Time Fourier Transform and Wagner-Ville Distribution”. *Brüel & Kjaer Technical Review*. 1996. No. 2.

- [28] SHIROISHI, Jet al., 1997. “Bearing condition diagnostics via vibration and acoustic emission measurements”. *Mechanical Systems and Signal Processing*, p. 693-705.
- [29] BAE, B.K. and KIM, K.J. “A Hilbert transform approach in source identification via multiple-input, single-output modelling for correlated inputs”. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 12(4), (1998), pp 501-513.
- [30] ANTONIOLLI, E. B., 1999. “Estudo comparativo de técnicas de medição e análise de vibrações para a manutenção preditiva em mancais de rolamento”. Florianópolis. 122f Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)- Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [31] BARCLAY, J., Wei, J., 1994. General alarm guidelines for enveloped acceleration measurements. *Revolutions SKF*, v.6, n.2 p. 66. [www.bently.com/mktreference.htm](http://www.bently.com/mktreference.htm).
- [32] COURRECH, J., 2000. “Análise do Envelope para detecção efetiva de defeito em rolamentos: verdade ou ficção?”, *Nova Manutenção y Qualidade*, n. 30, p. 6-9 a. 7.
- [33] BRIE, D., 1999. “Modelling of the spaDed roUing element bearing vibration signal: and overview and some new results”. *Mechanical Systems and Signal Processing*, p. 353-369.
- [34] LI, Y. et al., 2000. “Adaptive prognostic for rolling element bearing. *Mechanical Systems and Signal Processing*”, p. 103-113.
- [35] PIÑEYRO, J. et all, 2000. Effectiveness of new spectral tools in the anomaly detection of rolling element bearings. *Mechanical Systems and Signal Processing*, p. 276-279.
- [36] PARKER, B. E. et all, 2000. Fault diagnostics using statistical change detection in the bispectral domain. *Mechanical Systems and Signal Processing*, p. 561-570.
- [37] HO, D., 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.
- [38] LI B., “Neural-Network-Based Motor Rolling Bearing Fault Diagnosis”, *IEEE Transactionson Industrial Eletronics*, 2000, Vol. 47, No. 5, pp. 1060- 1069.
- [39] MESQUITA, Alexandre L. A et al. Detecção de falhas em rolamentos usando transformadas tempo-freqüência Comparação com análise de envelope. *Mecânica Computacional*. v. 21, p. 1938-1954, 2002. Disponível em: <http://www.cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/viewFile/1066/1012>. Acesso em: 11 December 2013.

- [40] BEZERRA, Roberto de Araújo. Detecção de Falhas em Rolamentos por Análise de Vibração, 2004. 152 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, São Paulo.
- [41] PURUSHOTHAMA, V. and NARAYANANA, S. Multi-fault diagnosis of rolling bearing elements using wavelet analysis and hidden Markov model based fault recognition. *NDT&E International* 38 (2005) 654–664.
- [42] SANTOS, S. J., 1996. Análise de Vibrações: módulo L Curitiba: Preditiva Engenharia. Schaefer, R. M., 2000. Rolamentos: sua importância e funções. *Manutenção y Qualidade*, a.7, n. 29, pp. 14.
- [43] MEOLA, T., DUARTE, M. A. V., ASSUMPTIÃO, F., 2005, “On Line Monitoring Of Reliability Of Signals to be Used to Control Purposes”, submetido ao 18th COBEM, Ouro Preto, MG.
- [44] DYER, D., STEWART, R.M., 1978, “Detection of rolling element bearing damage by statistical vibration analysis”. *American Society of Mechanical Engineers*, pp. 26 - 30.
- [45] RANDALL, R.B., 2005, “Application of spectral Kurtosis in machine diagnostics and Prognostics”, DAMAS Conference, Gdansk, rep-produced vols. 293-294, pp. 21-32.
- [46] DWYER, R.F., 1983, “Detection of non-Gaussian signals by frequency domain kurtosis Estimation”. *Int. Conf. On Acoustic, Speech, and Signal Processing*, pp. 607-610, Boston.
- [47] DWYER, R.F., 1984, “Use of the kurtosis statistic in the frequency domain as an aid in detecting random signals”. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. OE-9 (2), pp. 85-92.
- [48] DWYER, R.F., 1985, “Asymptotic detection performance of discrete power and higher-order estimates”. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. OE-10 (3), pp. 303-315.
- [49] OTTONELLO, C., PAGNAN, S., 1994, “Modified frequency domain kurtosis for signal processing”. *IEEE Electronic Letters online*, NO: 19940777, pp. 1117-1118.
- [50] CAPDEVIELLE, V., SERVIÈRE, C., LACOUME, J., 1996, “Blind separation of wide-band sources: Application to rotating machine signals”. *Proc. of the 8th European Signal Processing Conf.*, vol.3, pp. 2085-2088.

- [51] VRABIE, V.D., GRANJON, P., 2004, “Harmonic component characterization using spectral kurtosis”. 12th European Signal Processing Conference, Sept. 7-10, 2004, Vienna, Austria.
- [52] ANTONI, J., 2006, “The Spectral Kurtosis: A useful tool for characterising nonstationary signals”. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 20 (2), pp. 282-307.
- [53] ANTONI, J., RANDALL, R.B., 2006, “The Spectral Kurtosis: application to the surveillance and diagnostics of rotating machines”. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 20(2), pp.308-331.
- [54] NEPOMUCENO, L. X, “Técnicas de Manutenção Preditiva”, Ed. Edgard Blucher, Vol.1, São Paulo, Brasil, 1989.
- [55] HARRIS, T. A., *Rolling Bearing Analysis*, 3ed, New York, John Wiley & Sons, USA, 1991, 991p.
- [56] JUVINALL, R. C., MARSHEK, K. M., *Fundamentals of Machine Component Design*, 2ed, New York, John Wiley & Sons, U.S.A., 1991, pp. 305 – 322.
- [57] HOSHI, T, “Damage Monitoring of Ball Bearing”. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 2006.
- [58] RANDALL, R. B., 1997, “Developments in digital analysis techniques for diagnosis of bearings and gears”. 5th International Congress on Sound and Vibration, Adelaide, Australia.
- [59] ANTONI, J., Randall, R.B., 2004 B, “Unsupervised noise cancellation for vibration signals: Part II- a novel frequency domain algorithm”. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol.18, pp.103–117.
- [60] HOWARD I., 1994, “A review of rolling element bearing vibration: Detection, diagnosis and prognosis”. DSTO-AMRL report, DSTO-RR-00113, pp.35-41.
- [61] YANG, H., MATHEW, J., MA, L., “Vibration feature extraction techniques for fault diagnosis of rotating machinery: a literature survey”. En: *Asia-Pacific Vibration Conference*, 2003.
- [62] GUPTA, K., “Vibration — A tool for machine diagnostics and condition monitoring”. En: *Sadhana* 22 (1997), p. 393–410.
- [63] BÜCHNER, P. C., “Análise de Mancais de Rolamentos através dos Sinais de Vibrações, Usando Método da Curtose e do Envelope”. *Dissertação de Mestrado*, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba-PR, 2001.

- [64] GARCIA, P. O., “Non-Destructive Failure Diagnostics for Ball/Roller-Bearing”, Pag. 57-86. Memorias de 3ra Jornadas de Estudiantes de Ingeniería Acústica Valdivia (1994).
- [65] MARTIN, H. R., HONARVAR, F., “Application of Statistical Moments to Bearing Failure Detection”. Applied Acoustics, v. 44, pp.67-77, Great Britain, 1984.
- [66] LEBOLD, M., MCCLINTIC, K., CAMPBELL, R., BYINGTON, C., MAYNARD, K., “Review of vibration analysis methods for gearbox diagnostics and prognostics”. En: Proceedings of the 54th Meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology, Virginia Beach, 2000, p. 623–634.
- [67] BEZERRA, R. A., SANTIAGO, D.F.A., PEDERIVA, “Utilização de redes neurais na identificação de falhas em rolamentos a partir de Parametros Estadística”, 2004.
- [68] DAVIES, A., “Handbook of Condition Monitoring: Techniques and Methodology,” London, Chapman & Hall (1998).
- [69] GARCIA B., J. L., “Modelo Dinámico de Rodamiento. Aplicación informática SIMROD”. Proyecto final de carrera presentado en la Escuela Politecnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, 2010.
- [70] RANDALL, R. B., TECH, B. A., “Frequency Analysis, 3ed, Bruel & Kjaer, 1987.
- [71] RUSS, J. C., *The Image Processing Handbook*, 3 ed. CRC Press and IEEE Press, 1999.
- [72] ANDREUCCI, R., "Radiologia Industrial", <http://www.infosolda.com.br/andreucci>, pp.51, acessado em 02 de novembro 2013.
- [73] ZAMORANO C., M., “Análisis de señales mediante STFT y WAVELET. Aplicación a defectología en rodamientos”. Proyecto final de carrera presentado en la Escuela Politecnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, 2010.
- [74] YEN, G. G., LIN, K., “Wavelet packet feature extraction for vibration monitoring”. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v.47, pp. 650-617, 2000.
- [75] BARSZCZ, T., Sawalhi, N., 2011, “Wind turbines’ rolling element bearings fault detection enhancement using minimum entropy deconvolution”. *Diagnostics and Structural Health Monitoring* 3(59)/2011.
- [76] KAY M. S., Marple S. L., 1981, “Spectrum analysis – a modern perspective”, *Proc IEEE*, 69 (11), pp 1380-1419.
- [77] AKAIKE, H., 1969, “Fitting Autoregressive for prediction”, *Ann.Inst.Math*, vol. 21, pp. 243-247.

- [78] AKAIKE, H., 1974, "A new look at the statistical model identification", IEEE Trans. Autom. Control, vol. 19, pp. 716-723.
- [79] MARPLE, S. L., [1987], "Digital spectral analysis: with applications". Englewood Cliffs, N.J., Prentice Hall.
- [80] FODOR, I.K., Berryman, J. G., Stark, P. B., 1997, "Comparison of Autoregressive and multitaper spectral analysis for long time series". Stanford Exploration Project, Report 95, pp. 331-356.
- [81] SAWALHI N., "Rolling element bearings: diagnostics, prognostics and fault simulations", PhD Dissertation, University of New South Wales, 2007. Available from UNSW Library at [www.library.unsw.edu.au/~thesis/adt-NUN/public/adt-NUN20070704.105600/index.html](http://www.library.unsw.edu.au/~thesis/adt-NUN/public/adt-NUN20070704.105600/index.html).
- [82] DWYER R.F., "Use of the kurtosis statistic in the frequency domain as an aid in detecting random signals", IEEE Journal of Oceanic Engineering, OE-9, No.2, 85-92, Apr. 1984.
- [83] VRABIE V.D., P. Granjon, C. Servièrè, "Spectral kurtosis: from definition to application", IEEE EURASIP Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing, Grado, Italy, June 8-11, 2003.
- [84] SAWALHI, N., RANDALL, R.B., 2004: "The application of spectral Kurtosis to bearing diagnostics". Australian Acoustical Society Conference, Gold Coast, Australia.