

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DEMODULAÇÃO DE AMPLITUDE ATRAVÉS DA TRANSFORMADA DE HILBERT
COMO FERRAMENTA DE DIAGNÓSTICO DE MANCAIS DE ROLAMENTO EM UMA
POPULAÇÃO DE EQUIPAMENTOS ROTATIVOS

por

Otávio Luiz Dibe Vescovi

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, Maio de 2000

ESCOLA DE ENGENHARIA
BIBLIOTECA

DEMODULAÇÃO DE AMPLITUDE ATRAVÉS DA TRANSFORMADA DE HILBERT
COMO FERRAMENTA DE DIAGNÓSTICO DE MANCAIS DE ROLAMENTO EM UMA
POPULAÇÃO DE EQUIPAMENTOS ROTATIVOS

por

Otávio Luiz Dibe Vescovi
Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Dr. Alberto Tamagna

Aprovada por:

Prof. Dr. Jun Sérgio Ono Fonseca

Prof. Dr. Milton Antônio Zaro

Prof. Dr. Renato Machado de Brito

Prof. Dr. Sérgio Viçosa Möller

Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, Maio de 2000

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado à Clarice, à Gabriela, ao Guilherme e aos meus pais Dena e, em especial, a Ítalo Vescovi (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

A elaboração dessa dissertação contou com o apoio e o estímulo de inúmeras pessoas e instituições, a todas as quais gostaria de expressar o meu agradecimento, e, particularmente:

À UFRGS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, através dos professores, funcionários e colegas do PROMEC e das demais áreas;

Ao Professor Tamagna, orientador deste trabalho, ao Professor Zaro e ao Professor Jun, pelas valiosas contribuições e pelo exemplo pessoal e profissional;

À COPESUL, Companhia Petroquímica do Sul, na pessoa de Henrique Leopoldo Schulz, pela oportunidade, apoio, incentivo e compreensão ímpares;

A todos os colaboradores dos times de Engenharia de Manutenção e Avaliação e de Oficinas da COPESUL, entre os quais gostaria de destacar pela ativa participação: João Fernando Lautert Ribeiro, Natanael Lopes, Paulo Cesar Zeltzer, Paulo Renato Pinho Romão, Pedro Gustavo Roehe e Valtemir Zandoná;

E, finalmente, à minha família, pelo auxílio e pela compreensão em todos os momentos durante a elaboração deste trabalho.

RESUMO

A busca de um diagnóstico direto, preciso e antecipado do estado de mancais de rolamento quando em operação ainda é um problema a ser resolvido. Este problema torna-se mais agudo quando se lida com grandes populações de equipamentos rotativos em ambientes industriais. O acompanhamento de valores globais de vibração não é totalmente eficaz nesta situação, e a análise do autoespectro em baixas frequências do sinal de vibração nem sempre fornece indícios com a antecipação necessária. O objetivo deste trabalho é aplicar e avaliar o desempenho da Transformada de Hilbert na análise de sinais modulados em amplitude como ferramenta para o diagnóstico de sinais gerados por mancais de rolamento em equipamentos rotativos industriais. A Transformada de Hilbert e a modulação em amplitude são descritas do ponto de vista analítico. São tomadas leituras de valores globais, autoespectro e espectro do envelope do sinal em uma população com grande número de equipamentos rotativos ao longo de vários meses. São efetuados diagnósticos e intervenções nos equipamentos que apresentam alterações no envelope do sinal (modulação). Os mancais substituídos são então abertos e analisados por microscopia para confirmar o diagnóstico e para identificar o tipo e a dimensão do defeito que gerou o sinal de vibração. Estes defeitos são registrados fotograficamente. A partir destas constatações é feita uma análise crítica das indicações de cada um dos tipos de sinal obtido. Conclui-se que, desde que as leituras sejam corretamente tomadas, a análise da modulação em frequência fornece uma indicação clara e bastante antecipada do estado dos mancais, quando comparada com as leituras de valor global e autoespectro. Conclui-se também que as discontinuidades físicas nos componentes dos mancais de rolamento alteram o sinal de vibração mesmo quando são de dimensões reduzidas e dificilmente visíveis a olho nu, produzindo uma modulação em amplitude detectável pela análise do espectro de envelope do sinal. As frequências dos defeitos que serão evidenciadas pelo espectro de envelope podem ser estimadas através da geometria dos mancais.

ABSTRACT

The need for a precise, direct and anticipated diagnosis for rolling bearings is still a problem to be solved when dealing with large equipment populations in industrial environment. Global vibration readings are not enough, and low frequency autoespectra of the vibration signal not always give enough information in advance. The purpose of this paper is to analyze the results of the application of Hilbert Transform in amplitude modulation analysis as a tool for diagnosis of vibration signal generated for rolling bearings. Hilbert Transform and amplitude modulation are analytically described and global readings, autoespectra and envelope spectra are measured from a large number of rotating equipment during several months. Diagnosis and intervention are made on equipment that shows envelope spectra modifications (modulation).

The replaced bearings are analyzed under the microscope in order to confirm the diagnosis and to identify the type and size of the defect that generated each type of vibration signal. From those observations the signals are discussed. Final conclusion states that since the readings are correctly taken, envelope spectra of amplitude modulated signal gives a clear and early indication of rolling bearing condition, if compared to usual global readings and autoespectra of the raw signal.

ÍNDICE

1. Introdução.....	1
1.1. Delimitação Geral do Tema.....	1
1.2. Objetivos	10
1.3. Justificativa.....	10
1.4. Metodologia	11
1.5. Instrumentação Utilizada.....	13
1.5.1. Microscopia	13
1.5.2. Coletor de Vibrações Portátil	14
1.5.3. Acelerômetro para coletor portátil.....	15
1.5.4. Acelerômetros para monitoramento permanente.....	17
1.5.5. Calibrador portátil.....	17
1.6. Revisão Bibliográfica	18
2. Transformada de Hilbert.....	24
2.1. Definição como integral de convolução.....	24
2.2. Definição como defasagem de $\pi/2$	25
2.3. Definição como parte imaginária de um sinal analítico	27
2.4. Transformada de Hilbert e A demodulação de sinais.....	29
2.5. Cálculo discreto da Transformada de Hilbert	32
2.6. Exemplos de cálculo da Transformada de Hilbert	34
3. Mancais de Rolamento.....	39
3.1. Características das falhas.....	39
3.2. Causas primárias de dano	40
3.2.1. Dano pela inclusão de materiais externos.....	40
3.2.2. Dano causado por corrosão	41
3.2.3. Dano por lubrificação insuficiente	41
3.2.4. Dano por desalinhamento das pistas.....	42
3.2.5. Dano por carga atuando na gaiola separadora	42
3.2.6. Dano por carga axial anormal	43
3.2.7. Dano por manuseio indevido.....	43
3.2.8. Dano por procedimento de montagem incorreto	44
3.2.9. Influência de vibrações suaves.....	44
3.2.10. Dano por passagem de corrente.....	45

3.3.	Mecanismos de geração de vibração em mancais de rolamento.....	45
3.3.1.	Vibrações causadas pela estrutura física do mancal	45
3.3.2.	Vibrações causadas por não-linearidades	46
3.3.3.	Vibração causada por ondulações nas superfícies de contato	46
3.3.4.	Vibrações causadas por danos nos mancais.....	46
3.4.	Análise de frequências.....	47
4.	Estudo de Casos.....	54
4.1.	Bomba 13B01B	54
4.2.	Bomba e motor 03B03B	62
4.3.	Bomba 13B06A.....	76
4.4.	Motor 13B04A	82
4.5.	Motor 48MVT01D	88
4.6.	Motor 48MVT01J.....	95
4.7.	Motor 02MB05B	97
5.	Discussão de resultados e conclusões	102
5.1.	Conclusões	102
5.2.	Futuros desenvolvimentos	104
6.	Bibliografia.....	106
7.	Apêndices	109
7.1.	Apêndice I - Programas em MATLAB	109
7.2.	Apêndice II - Gráficos adicionais	111
7.3.	Apêndice III - Configurações e histórico	126

LISTA DE SÍMBOLOS

- $A(t)$ - magnitude do sinal (ou "envelope");
- A_s - autoespectro;
- B - bomba;
- B_p - leituras de vibração em valor global RMS (bandpass) de 10 Hz a 1000 Hz;
- $C_{pb6\%}$ - espectro de Fourier em escala logarítmica com banda de 6% (constant percentage band 6%);
- d - diâmetro da esfera ou rolete;
- D - diâmetro entre as linhas de centro das esferas ou roletes;
- E_s - espectro de envelope através da aplicação da Transformada de Fourier;
- f_i - frequência na qual um ponto da pista interna contata uma esfera ou rolete;
- f_c - frequência na qual um ponto da pista externa contata uma esfera ou rolete;
- f_b - frequência na qual um ponto da esfera ou rolete contata as pistas interna ou externa;
- f_o - frequência de giro do eixo (pista interna);
- f_g - frequência esperada para defeitos na gaiola separadora;
- $g(t)$ - Sinal modulado genérico;
- $g_a(t)$ - Sinal modulado em amplitude;
- Im - parte imaginária do sinal;
- LA - lado acoplado do equipamento rotativo (lado interno);
- LOA - lado oposto ao acoplamento (lado externo);
- MB - motor da bomba
- MEV - microscópio eletrônico de varredura;
- MVT - motor do ventilador;
- n - ordem dos modos de vibração
- Re - parte real do sinal;
- T - período;
- $TMEF$ - Tempo médio entre falhas;
- $x(t)$ - sinal real no domínio do tempo;
- $\tilde{x}(t)$ - sinal resultante da aplicação da Transformada de Hilbert em $x(t)$;
- z - número de esferas ou roletes
- a - ângulo de contato entre as esferas (roletes) e as pistas;

$\theta(t)$ ou $\phi(t)$ - fase instantânea;

H [x(t)] - Transformada de Hilbert do sinal $x(t)$;

$X(f)$ - Transformada de Fourier de $x(t)$;

$\tilde{X}(f)$ - Transformada de Fourier de $\tilde{x}(t)$, ou seja, $\tilde{X}(f) = F[\tilde{x}(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{x}(t)e^{-j2\pi ft} dt$;

F^{-1} - Transformada inversa de Fourier;

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.1- Probabilidade de falhas em rolamentos	7
Figura 1.1.2. Modelo do modo de deterioração e métodos de detecção	9
Figura 1.5.1. Coletor de vibrações portátil utilizado;	15
Figura 1.5.2. Foto do acelerômetro modelo B&K 4391 utilizado na coleta de dados e corte típico simplificado de construção tipo "delta shear";	16
Figura 1.5.3. Método de fixação: pino roscado ao acelerômetro e colado ao equipamento;	16
Figura 1.5.4. Curva de calibração típica do acelerômetro 4391, mostrando a frequência natural do sensor;	16
Figura 1.5.5. Curva de erro típica causado pela temperatura para acelerômetro 4391;	17
Figura 2.4.1. Representação de um sinal modulado em frequência.....	30
Figura 2.4.2. Sinal modulado em amplitude com surto de uma frequência de ressonância.....	31
Figura 2.4.3. Espectro de frequência para um caso idealizado com impulsos repetitivos	32
Figura 2.5.1. Diagrama de fase	33
Figura 2.6.1. Transformada e envelope - função 1 - cosseno	35
Figura 2.6.2. Transformada e envelope - função 3 - $\sin(t)/t$	36
Figura 2.6.3. Transformada e envelope da função 4	36
Figura 2.6.4. Transformada e envelope da função 5.	37
Figura 2.6.5. Formato de onda no tempo com clara indicação de ressonância em alta frequência com amortecimento exponencial superposta a vibração de baixa frequência (amplitude modulada).....	37
Figura 2.6.6. Onda da figura anterior após a demodulação.	38
Figura 2.6.7. Espectro da onda demodulada, indicando claramente as frequências relativas ao defeito na pista externa em 80 Hz e um harmônico.	38
Figura 3.2.1. Desgaste por partículas externas.....	40
Figura 3.2.2. Dano por corrosão	41
Figura 3.2.3. Dano por lubrificação insuficiente.....	41
Figura 3.2.4. Dano por desalinhamento das pistas.	42
Figura 3.2.5. Gaiola separadora danificada.....	42
Figura 3.2.6. Dano por pré-carga axial excessiva.	43
Figura 3.2.7. Danos superficiais por manuseio ou estocagem incorretos.	43
Figura 3.2.8. Falso "brinelling" ou desgaste por vibrações suaves.....	44

Figura 3.2.9. "Brinelling" ou deformação plástica (encroamento) do material por impacto.....	44
Figura 3.2.10. Dano causado por passagem de corrente elétrica nos roletes.	45
Figura 3.4.1. Mancal de rolamento de esferas e de rolos cônicos	50
Figura 3.4.2. 34B01 - Exemplo de uma falha severa em um mancal de rolamento.....	51
Figura 3.4.3. 34B01 - seção transversal da pista interna, com trincas em desenvolvimento.....	51
Figura 3.4.4. Rolamento SKF 6316 C3 novo sob MEV – 100 X.	52
Figura 3.4.5. Rolamento SKF 6316 C3 novo sob MEV - 500 X.....	52
Figura 3.4.6. Descascamento em rolamento devido a fadiga – 10 X.....	53
Figura 3.4.7. Metalografia da pista do mesmo mancal acima mostrando o início da trinca - 200 X.....	53
Figura 4.1.1. Valor global de vibração na bomba 13B01B LA, variando de 11 mm/s a 1 mm/s. 55	
Figura 4.1.2. Espectro de envelope mostrando pico de 17 m/s ² em 15.000 RPM – Setembro de 1999.....	56
Figura 4.1.3. Espectro de envelope após troca do rolamento, em Novembro de 1999, com pico predominante de 0,8 m/s ²	56
Figura 4.1.4. Autoespectro antes da intervenção mostrando pequena alteração em 15.000 RPM (cerca de 1 m/s ²)	57
Figura 4.1.5. Autoespectro após intervenção mostrando redução dos picos para a faixa de 0,25 m/s ²	57
Figura 4.1.6. Picos pronunciados em alta frequência (219.000 RPM com 49 m/s ² e 60.000 RPM com 35 m/s ²) antes da intervenção.....	58
Figura 4.1.7. Redução da amplitude para 2,5 m/s ² em 219.000 RPM após intervenção. A linha vertical é o cursor (em 14.640 RPM) e a linha horizontal é o limite de alarme (2 m/s ²).....	58
Figura 4.1.8. 13B01B pista externa, lado oposto ao acoplamento (LOA).	59
Figura 4.1.9. 13B01B - outro detalhe da pista externa (LOA)	59
Figura 4.1.10. 13B01B - Detalhe da esfera LOA.....	60
Figura 4.1.11. 13B01B - Outro detalhe da esfera LOA.....	60
Figura 4.1.12. 13B01B – pista interna, foto no MEV – detalhe 50 X, mostrando zona de início da degradação superficial.	61
Figura 4.1.13. 13B01B – pista interna, foto no MEV. Detalhe 100 X, mostrando a esfoliação da pista.	61
Figura 4.2.1. 03B03B LA H – Tendência do valor global, estável entre 3,5 e 3,0 mm/s RMS. ..	63
Figura 4.2.2. Espectro de envelope antes da intervenção no equipamento, indicando pico predominante em 3.000 RPM com 5,6 m/s ²	63

Figura 4.2.3. Espectro de envelope da bomba após a intervenção na bomba e motor	64
Figura 4.2.4. Autoespectro 03B03B LA H - Agosto 1999	64
Figura 4.2.5. Autoespectro 03B03B LA H – Setembro1999. Não houve alteração significativa nas amplitudes, comparando com o espectro antes da intervenção.	65
Figura 4.2.6. 03MB03 LA H – Tendência do valor global de Agosto a Novembro de 1999, mostrando que não há alteração significativa de amplitude global.	65
Figura 4.2.7. 03MB03 LOA H – Valor global de Agosto a Novembro de 1999, com alteração de amplitude de 2,5 mm/s antes da intervenção para 1,2 mm/s após a intervenção.	66
Figura 4.2.8. Espectro do envelope antes da intervenção, mostrando picos de 33.000 RPM com 4,3 m/s ² e outros picos vizinhos semelhantes até 40.000 RPM.	66
Figura 4.2.9. Espectro de envelope após troca dos mancais, com redução significativa dos valores de pico (1,5 m/s ² em 33.000 RPM e 2 m/s ² em 15.000 RPM).....	67
Figura 4.2.10. 03MB03B – LOA H - Autoespectro do mancal externo do motor antes da intervenção (em Agosto de 1999).	67
Figura 4.2.11. 03MB03B – LOA H - Autoespectro do mancal externo do motor após a intervenção (Setembro de 1999) com praticamente os mesmos valores de amplitude (cerca de 2 mm/s no maior pico). A troca do mancal e a falha não são detectáveis neste espectro.	68
Figura 4.2.12. 03MB03B – LOA H – CPB6% do motor antes da intervenção (em Agosto de 1999).	68
Figura 4.2.13. 03MB03B – LOA H – CPB6% do motor após a intervenção com redução da área do espectro mas com um pico em 300.000 RPM que mantém um valor máximo de cerca de 10 m/s ² , semelhante ao valor máximo antes da intervenção.....	69
Figura 4.2.14. 03MB03B - Pista externa LA – esfoliação da pista.....	69
Figura 4.2.15. 03MB03B - Pista externa LA detalhe – esfoliação da pista.	70
Figura 4.2.16. 03MB03B - Pista externa LOA.....	70
Figura 4.2.17. 03MB03B - Pista externa LOA detalhe.	71
Figura 4.2.18. 03MB03B - Esfera LOA, dano severo.	71
Figura 4.2.19. 03MB03B - Esfera LOA , outro detalhe – dano severo.....	72
Figura 4.2.20. 03MB03B LOA – Pista interna com trincas em desenvolvimento – aumento 50 X.	72
Figura 4.2.21. 03MB03 LOA - MEV – Detalhe das trincas– 200 X.	73
Figura 4.2.22. 03MB03 LOA - MEV –Detalhe do extremo da trinca com esfoliação – 500 X..	73
Figura 4.2.23. 03MB03 LOA - MEV – Esfoliação: detalhe – 1000 X.	74

Figura 4.2.24. 03MB03 LOA - MEV - Perfis da superfície na região de uma descontinuidade (corte nas linhas brancas) , indicando que se tratam de rebaixos na superfície – 2000 X.....	74
Figura 4.2.25. 03MB03B - LOA - MEV – Descontinuidades – 200 X..	75
Figura 4.2.26. 03B03B - Pista externa LA, com defeitos superficiais bastante discretos (início de encruamento na pequena mancha oval em cima a esquerda na foto) – 10 X.....	75
Figura 4.2.27. 03B03B - Pista externa LA, detalhe, mostrando pequeno encruamento da superfície, provavelmente em virtude das altas vibrações transmitidas desde o motor – 50 X....	76
Figura 4.3.1. 13B06A - Acompanhamento do valor global de vibração da bomba.....	77
Figura 4.3.2. 13B06A - Espectro de envelope antes da intervenção, com valores elevados em baixa frequência (<50, 90 e 330 Hz) e em torno de 5000 Hz.	78
Figura 4.3.3. 13B06A - Após intervenção, com redução geral das frequências predominantes, especialmente nas baixas frequências, para menos de um terço dos valores anteriores.....	78
Figura 4.3.4. 13B06A - Autoespectro antes da intervenção com vários harmônicos pronunciados. Cursor indica frequência de 90 Hz com 3,4 mm/s.	79
Figura 4.3.5. 13B06A - Autoespectro após intervenção com alteração apenas no pico de 90 Hz que praticamente desapareceu.....	79
Figura 4.3.6. 13B06A - Espectro CPB6% com pico dominante de 2.740 Hz com 3,5 m/s ² , antes da intervenção.....	80
Figura 4.3.7. 13B06A - Espectro CPB6% com virtual desaparecimento do pico em 2.740 Hz após a intervenção. Esta frequência pode ter sido a portadora da modulação de amplitude de 300 Hz e outras frequências menores que apareciam no gráfico do "es".	80
Figura 4.3.8. 13B06A - Pista externa com descontinuidade, mancal do lado acoplado (LA). Possivelmente causada por presença de material estranho ao mancal.	81
Figura 4.3.9. 13B06A - Pista externa, LA, outro detalhe do dano na pista com arrancamento de material e alguns "pittings".....	81
Figura 4.4.1. 13MB04A LA H - Tendência do valor global de vibração.	83
Figura 4.4.2. 13MB04A LOA - Espectro "es" em cascata mostrando todas as coletas e análises. Após a intervenção apenas as baixas frequências são reduzidas (seta).	83
Figura 4.4.3. 13MB04A LOA - Autoespectro antes da intervenção no motor. Picos de 3 e 2 mm/s em uma e duas vezes a primeira harmônica indicam anormalidade.	84
Figura 4.4.4. 13MB04A LOA- Após a intervenção o autoespectro mostra amplitudes reduzidas de 1,4 mm/s a 60 Hz.	84

Figura 4.4.5. 13MB04A LA - O espectro CPB6% ainda mostra valores de quase 5mm/s ² em 2500 Hz mesmo após a intervenção, indicando que alguma anormalidade não associada a defeitos nas superfícies dos mancais permanece.....	85
Figura 4.4.6. 13MB04A Pista interna do lado acoplado (LA).....	85
Figura 4.4.7. 13MB04A - Detalhe da pista interna LA.	86
Figura 4.4.8. 13MB04A pista externa LA – detalhe dos defeitos.....	86
Figura 4.4.9. 13MB04A Esfera LA – detalhe da escamação – 10 X.....	87
Figura 4.4.10. 13MB04A pista externa LOA – detalhe do encruamento ("brinelling").....	87
Figura 4.4.11. 13MB04A - pista externa LOA.....	88
Figura 4.5.1. 48MVT01D - Tendência do valor global de vibração estável em 1,2 mm/s. Picos eventuais significam transientes de partida e parada do motor.....	89
Figura 4.5.2. 48MVT01D - Espectro de envelope antes da intervenção com a marcação do pico de 90 Hz e seus harmônicos (defeito na pista externa).....	90
Figura 4.5.3. 48MVT01D - Cascata dos espectros "es" com a evolução do pico de 90 Hz até o valor de 14m/s ² e a queda após a substituição do mancal. É visível também o segundo harmônico em 180 Hz.....	90
Figura 4.5.4. 48MVT01D - Cascata do autoespectro na qual não se percebe alteração causada pelo mancal.....	91
Figura 4.5.5. 48MVT01D - O espectro CPB6% igualmente não mostra alterações relacionadas ao mancal, mantendo-se estável antes e após a intervenção.	91
Figura 4.5.6. 48MVT01D - Espectro do envelope antes da intervenção.	92
Figura 4.5.7. 48MVT01D - Espectro de envelope após a intervenção, com picos de pequena amplitude (máximo 0,2 g).....	92
Figura 4.5.8. 48MVT01D - pista externa LOA - detalhe.	93
Figura 4.5.9. 48MVT01D - pista externa LOA, outro detalhe.	93
Figura 4.5.10. 48MVT01D - pista externa LA, detalhe.....	94
Figura 4.5.11. 48MVT01D - Pista externa LA, outro detalhe.....	94
Figura 4.6.1. 48MVT01J - Espectro de envelope antes e após a intervenção.....	95
Figura 4.6.2. 48MVT01J - Cascata do "es" com uma faixa maior de frequências, antes e após a intervenção.	96
Figura 4.6.3. 48MVT01J - Cascata dos espectros CPB6% antes e após a intervenção, não apresentando indicação evidente do desenvolvimento da falha.	96
Figura 4.7.1. 02MB05B - Valor global até o colapso, com o cursor indicando a alteração de valor de 1,4 para 2,3 mm/s.....	98

Figura 4.7.2. 02MB05B - Espectro de envelope antes do colapso.	98
Figura 4.7.3. 02MB05B - Espectro de envelope após o reparo do equipamento (condição como novo).	99
Figura 4.7.4. 02MB05B - CPB6% antes do colapso.	99
Figura 4.7.5. 02MB05B - CPB6% após reparo.	100
Figura 4.7.6. 02MB05B - Autoespectro antes do colapso.	100
Figura 4.7.7. 02MB05B - Autoespectro após reparo.	101

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1.1. Distribuição de modos de falha em turbinas a vapor.	3
Tabela 1.1.2. Distribuição de paradas não-programadas de turbocompressores em plantas de processo nos EUA (Número de paradas não-programadas por equipamento por ano: 2).....	4
Tabela 1.4.1. Intervalo entre medições em função da disponibilidade operacional;.....	12
Tabela 2.6.1. Exemplos de Transformadas de Hilbert	35
Tabela 3.2.1. Causas para falhas de mancais de rolamento e suas importâncias relativas.	40
Tabela 3.4.1. Freqüências naturais calculadas para rolamento 6310 radial de esferas.....	47
Tabela 3.4.2. Principais causas e sintomas de danos em mancais de rolamento.....	48

1. INTRODUÇÃO

A aplicação da Transformada de Hilbert dentro da técnica de espectro de “envelope” do sinal de uma determinada onda periódica de alta frequência com amplitude modulada como meio de obter o espectro da onda demodulada é tida como eficaz no diagnóstico de deterioração de mancais de rolamentos. Esta eficácia é comparativa, considerando-se os métodos mais tradicionais, tais como a análise do autoespectro da onda completa e tendência dos valores globais RMS de vibração.

O estudo dos resultados da aplicação desta técnica de espectro de envelope aos equipamentos de uma planta de processo (que se pretende representativa de um tipo de indústria), com uma grande variedade de equipamentos nos quais já são efetuadas leituras de valor global e análise do autoespectro, permitirão avaliar a viabilidade desta técnica, considerando a possibilidade de detecção dos defeitos ou alterações dinâmicas. Além disso, verifica-se a precocidade de detecção em relação aos demais métodos.

1.1.DELIMITAÇÃO GERAL DO TEMA

Nos últimos 20 anos o gerenciamento de ativos na indústria mundial tem se modificado radicalmente. Isto ocorre basicamente devido a dois aspectos: causado por um lado pela variedade, severidade e complexidade crescente dos equipamentos e por outro pela expectativa criada em termos da maneira como falhas em processos e equipamentos afetam o meio-ambiente, a segurança de pessoas e instalações, a qualidade dos produtos e a própria viabilidade econômica destas instalações.

Cabe salientar que a automação de processos é um fator relevante na raiz desta tendência e que tem adicionado complexidade e responsabilidade no que diz respeito a operação de alguns tipos de equipamentos e processos. A crescente pressão social e de legislação no que tange a preservação da segurança e meio-ambiente deve também ser citada dada sua relevância e pelo notável aumento de importância que experimentou nas últimas décadas.

A análise de vibrações como ferramenta industrial aplicada a populações de equipamentos é relativamente recente e deve sua disseminação ao notável desenvolvimento da eletrônica, especialmente digital, nas duas últimas décadas.

Os conceitos básicos da teoria de vibração evidentemente já eram conhecidos a muitos anos, porém sua aplicação prática na indústria somente foi possível com o desenvolvimento de equipamentos eletrônicos portáteis e robustos. Isto fez com que o uso da análise de sinais e conseqüentemente a pesquisa e as bases de dados relativas ao assunto tomasse impulso a partir do final dos anos setenta.

Serridge, 1991 descreve com propriedade esta evolução do enfoque da monitoração de equipamentos:

"(...) O monitoramento de máquinas desenvolveram-se significativamente durante os anos 80 e os anos 90 parecem prometer desenvolvimentos ainda maiores. Se considerarmos o monitoramento de máquinas como pertencente a família maior dos sistemas de controle de processo, deve ser dito que, desde um ponto de vista tecnológico, os sistemas de monitoramento sob condição estão defasados seus similares do ramo de controle de processo. Sistemas de controle de processo totalmente digitais e computadorizados já estavam instalados e rodando há anos antes mesmo dos vibrômetros analógicos serem comuns em plantas de processo(...). A tecnologia está mudando a face dos sistemas de monitoração de condição nos anos 90. Computadores com sistemas operacional Unix e rede Ethernet e processadores de sinais digitais são apenas exemplos das tecnologias de padrão industrial que estão propiciando esta mudança (...)." [Serridge, 1991].

Os fundamentos da manutenção preditiva (ou manutenção sob condição, como é modernamente chamada) foram sendo estabelecidos conjuntamente com a sofisticação dos equipamentos e com a mensuração dos resultados efetivos da aplicação destas tecnologias.

Esta estratégia preditiva tem permitido a execução da manutenção com custos decrescentes e com poucas ocorrências de falhas súbitas de equipamentos, pois um dos itens fundamentais de qualquer programa de qualidade aplicado à manutenção é o conhecimento profundo dos equipamentos e seus processos, para que possamos nos antecipar às falhas.

Neste ponto, poderíamos citar como exemplo Nakajima, 1990, que esclarece:

" (...) são cinco as medidas para a obtenção da 'quebra zero':

1- estruturação das condições básicas;

- 2- obediência às condições de uso;
- 3- regeneração do envelhecimento;
- 4- saneamento dos pontos falhos decorrentes do projeto;
- 5- incremento da capacidade técnica;

(...) É impossível evitar o envelhecimento ou a degradação crescente dos equipamentos, mesmo respeitando as condições de uso especificadas pelo projeto. Torna-se, portanto, compulsória a capacitação na condução das operações de regeneração de forma acurada, evitando-se à priori as possíveis quebras futuras. Para tal, as inspeções e as monitorações devem ser permanentes e criteriosas, inclusive nos detalhes, além da capacitação para recuperação e regeneração dos equipamentos" [Nakajima, 1990].

Sistemas de monitoração de vibração são efetivos porque se concentram em medir fenômenos que estão relacionados diretamente com boa parte das causas de falhas mais prováveis e com grande parte das causas de paradas não programadas. Estes fatos são ilustrados pelas Tabela 1.1.1 e Tabela 1.1.2, que se referem a turbocompressores [Block, 1978]:

MODO DE FALHA	INCIDÊNCIA (%)
ROÇAMENTO	23,0
FALHA POR FADIGA E FLUÊNCIA	18,5
DANOS AOS MANCAIS	14,6
TRINCAS POR CHOQUE TÉRMICO	11,7
FALHAS SÚBITAS	9,3
TRINCAS INCIPIENTES	8,0
DANO MECÂNICO À SUPERFÍCIES	5,4
CORROSÃO E EROSÃO	3,3
EMPENO DO EIXO	2,4
DESGASTE	2,3
ABRASÃO	1,5

Tabela 1.1.1. Distribuição de modos de falha em turbinas a vapor.

CAUSA DO PROBLEMA	FREQÜÊNCIA ESTIMADA
ROTOR/EIXO	22 %
INSTRUMENTAÇÃO	21 %
MANCAIS RADIAIS	13 %
PÁS/IMPELIDORES	8 %
MANCAIS AXIAIS	6 %
SELOS DE COMPRESSOR	6 %
MOTORES	3 %
DIAFRAGMAS	1 %
OUTROS	20 %

Tabela 1.1.2. Distribuição de paradas não-programadas de turbocompressores em plantas de processo nos EUA (Número de paradas não-programadas por equipamento por ano: 2)

Estes dados não divergem significativamente das informações levantadas na planta industrial da Companhia Petroquímica do Sul, aonde será delimitada uma população de equipamentos para análise. Portanto os equipamentos a serem incluídos na amostra tendem a apresentar um comportamento típico para a sua categoria.

Pode também ser citado o caso de uma refinaria de grande porte da Standard Oil Company da Califórnia que, conforme Huddachek, 1976, obtiveram substancial redução de custos após estabelecer um programa de Monitoramento e Diagnóstico de Máquinas bastante sofisticado para a época:

"(...) economias e ganhos são obtidos de diversas maneiras::

- a detecção antecipada de (...) problemas pode transformar certos tipos de falhas potencialmente catastróficas em manutenções programadas de rotina. A perda de produção da planta, e o uso de materiais e mão de obra são substancialmente reduzidos

- inspeção em operação (...) elimina a necessidade de realizar inspeções do tipo revisões de "segurança" a intervalos. (...) Frequentemente equipamentos em perfeito estado são revisados, baseados em um programa de manutenção preventiva, e apresentam problemas durante a partida (...).

- campanhas mais longas foram experimentadas com turbomáquinas que apresentavam níveis de vibração de moderado a alto, através do uso de técnicas de diagnóstico sofisticadas e de instrumentação de proteção das (...) "[Huddachek,1976].

Os equipamentos desta unidade são do mesmo porte dos estudados no presente trabalho. O "hardware" utilizado é diverso, porém os dados disponíveis para o diagnóstico eram similares a alguns dos recursos disponíveis, com exceção da análise de espectro de envelope:

"(...) órbitas e ondas senoidais no domínio tempo, gráficos de espectro, gráficos de varredura (...), gráficos velocidade contra fase e amplitude (filtrados e não filtrados), velocidade contra determinadas frequências (...), gráficos de valores de pico(...)" [Huddachek, 1976].

Como conclusão, os autores deste artigo afirmam:

" Estes programas realmente representam um retorno econômico significativamente além de seus custos. "

Outra questão freqüentemente discutida é a opção de monitorar continuamente ou intermitentemente os equipamentos. Além do intervalo entre leituras e seu efeito na confiabilidade do método, outros fatores devem ser considerados. A favor do monitoramento contínuo, podemos listar:

a - Certos fenômenos, como indica a literatura técnica [Orbit, 1989] somente podem ser detectados através do acompanhamento permanente de algumas variáveis (trincas em eixos, por exemplo).

b - Alguns dados somente podem ser levantados em situações de parada e partida das máquinas, que são normalmente eventos rápidos e muitas vezes ocorrem em horários ou situações que não permitem tempo hábil para o levantamento manual de dados.

c - Quando existem muitos pontos de medição a serem monitorados em um curto intervalo de tempo, a monitoramento contínuo (automatizado) se impõe.

d - Onde o levantamento manual implica em abertura dos painéis de campo em áreas classificadas quanto a risco de explosão, o que gera risco de explosões por perda da pressurização do painel.

e - As companhias de seguro cobram prêmios menores e permitem campanhas maiores sem prejuízo das indenizações em unidades que possuem monitoração permanente em alguns tipos de equipamentos. Este fato serve em parte como um endosso da eficácia do sistema,

pois as seguradoras baseiam este tipo de decisão em dados estatísticos de ocorrências realmente observadas.

Nos demais casos pode-se utilizar o monitoramento intermitente (coleta manual) com bons resultados.

A literatura nos fornece alguns casos históricos da aplicação de sistemas de monitoração contínua e de seus resultados, que servem para ilustrar alguns dos itens expostos acima.

- Sierra Pacific Power Company , Fort Churchill Power Plant, EUA: Dois turbogeradores de 115 MW - 1988 - Variações de amplitude e fase em várias condições de operação levaram ao diagnóstico de curto-circuito no estator. A solução adotada para permitir a continuidade operacional foi a de reduzir a vibração através de balanceamento, apesar desta não ser a causa inicial do problema. Foi comprado um novo estator e trocado durante parada programada em 1990, eliminando assim a origem do problema. Durante o intervalo operou-se evitando os pontos instáveis, tirando partido da monitoração contínua "on-line" da máquina. [Kowalczyk].

- Fiddler's Ferry Power Station, em Northwest England, EUA: Turbinas de 500 MW com três carcaças e 3000 RPM - 1989 - aumento progressivo de vibração foi precocemente diagnosticado por sistema de monitoração como desbalanceamento progressivo devido a danos em palhetas em uma das carcaças, o que foi confirmado, permitindo a substituição do eixo sem conseqüências maiores [Orbit].

- USA Air Force Systems Command's AEDC, Tenn. EUA: Sistema computadorizado on-line foi instalado em exaustores e compressores de Engine Test Facility de várias unidades para aumentar disponibilidade e reduzir custos de manutenção. Muitos dos equipamentos monitorados foram instalados em 1952, e a monitoração foi instalada em 1989 [Clay].

Em função destas considerações, fica claro que o enfoque em confiabilidade dos processos e sua disponibilidade operacional tem se tornado elemento chave para a perpetuidade de atividades industriais e mesmo de algumas atividades do setor de prestação de serviços.

A confiabilidade dos processos passa pela confiabilidade dos equipamentos e de seus componentes. Assim sendo, faz-se necessário analisar os padrões de falha dos componentes para

verificar qual estratégia será eficaz para o efetivo aumento da confiabilidade. Existem vários padrões de evolução de taxas de falhas em função do tempo, desenvolvidos em levantamentos estatísticos. A distribuição de probabilidade de Weibull tem sido usada para caracterizar matematicamente o comportamento dos componentes quanto à sua probabilidade de falha [Finley, 1995]. Esta distribuição foi originalmente desenvolvida a partir de dados empíricos de falha por fadiga, e seus parâmetros permitem caracterizar o tipo de comportamento de um componente quanto a característica de ocorrência de suas falhas.

Em vários destes padrões percebe-se que alguns componentes apresentam durante toda a sua vida útil ou em boa parte dela um comportamento quanto às falhas em operação que independe ou depende muito fracamente do tempo, ou em outras palavras, são aleatórios em relação ao tempo de campanha [Moubray, 1997]. Este comportamento pode ser ilustrado pela Figura 1.1.1, que descreve uma hipotética população de 100 rolamentos.

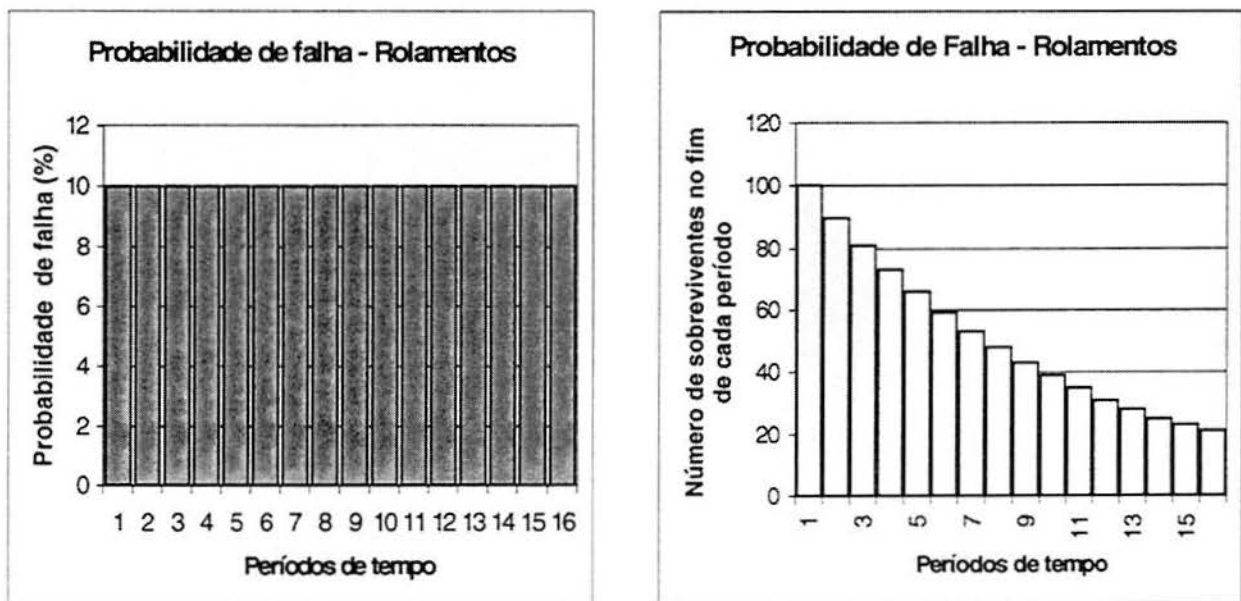


Figura 1.1.1- Probabilidade de falhas em rolamentos

São exemplos deste comportamento alguns equipamentos de construção complexa, como componentes eletrônicos, hidráulicos, pneumáticos e mecânicos de precisão (como rolamentos). A complexidade dos componentes parece explicar a característica aleatória de seu comportamento. Isto faz com que para estes componentes qualquer estratégia que procure elevar a confiabilidade operacional baseada no fator tempo de operação seja equivocada e ineficaz. Práticas bastante difundidas como substituição em função do tempo de operação, substituições periódicas a intervalos fixos ou intervenções exploratórias nada mais resultam, neste caso, do que redução da disponibilidade operacional e aumento de custos, sem qualquer possibilidade de

impacto positivo na confiabilidade do equipamento em questão. Faz-se necessário portanto o desenvolvimento de outras ferramentas de análise.

Para os casos de componentes que possuam comportamento claramente aleatório quanto a probabilidade de falhas ao longo do tempo, o recurso eventualmente disponível é a de intervenção sob condição. Especificamente isto significa o monitoramento em operação da condição do componente, a detecção em tempo hábil do início do processo de falha e a intervenção programada antes que a falha atinja uma condição que impeça o equipamento de operar ou o coloque em uma condição de operação que seja insegura ou que altere a qualidade da produção ou ainda que a falha atinja tal magnitude que passe a comprometer outros componentes do mesmo equipamento ou outros equipamentos.

É interessante neste ponto comentar ainda que sinteticamente os conceitos de falha e confiabilidade de um componente que serão utilizados neste estudo.

Falha neste contexto não significará necessariamente o colapso total do elemento estrutural. Estado de falha será: o estado em que o equipamento ou o componente se tornar incapaz de atender alguma ou várias de suas funções primárias ou secundárias nos padrões de performance que são considerados aceitáveis pelo usuário. Assim sendo, um mancal de rolamento que ainda esteja operando e exercendo suas funções em um equipamento rotativo pode ser considerado em estado de falha parcial quando exceder algum limite ou comportamento preestabelecido, como temperatura, ruído, vibração, deslocamento, integridade estrutural ou outros. Define-se função primária como a razão (raramente mais de uma) da existência daquele componente. No caso de um mancal de rolamento pode simplesmente ser suportar e transmitir cargas nas condições de processo desejadas. As funções secundárias são funções acessórias mas não necessariamente menos importantes, algumas das quais podem ser definidas pelo usuário. Por exemplo: padrões de integridade ambiental, integridade estrutural e de segurança, condições de controle, contenção ou conforto, aparência, proteção, economia, eficiência, e outras, eventualmente supérfluas.

No âmbito deste trabalho serão importantes as seguintes funções secundárias: integridade estrutural, integridade dimensional, segurança operacional do equipamento, de pessoas e do meio ambiente, valor global de vibração, aspectos perceptíveis da qualidade da operação do componente (ruído, aquecimento excessivo). Algumas destas funções são subjetivas ou sujeitas ao arbítrio do usuário, e assim tem de ser aceitas. Isto significa que o estado incipiente de falha parcial (ou secundária) que se deseja perceber através da monitoração visa permitir antecedência suficiente para que seja possível intervir no equipamento antes que estas

falhas parciais se desenvolvam até os limites considerados inaceitáveis ou que levem a falha da função primária, no caso extremo.

A figura Figura 1.1.2 ilustra este conceito.

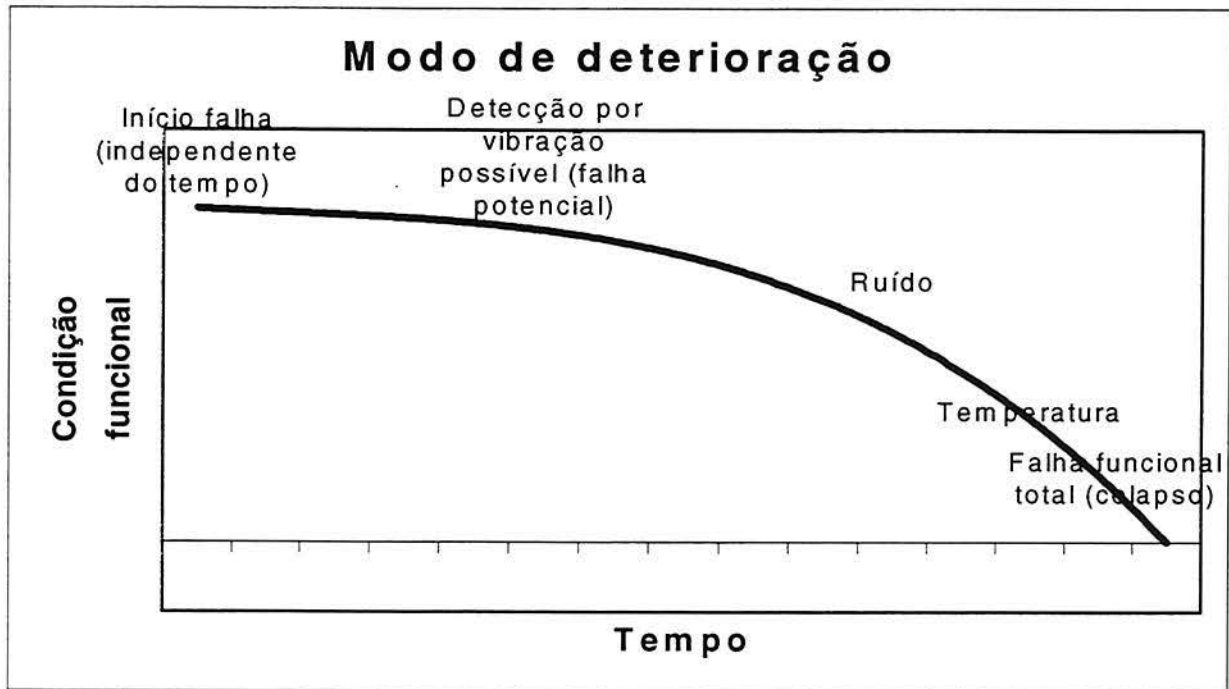


Figura 1.1.2. Modelo do modo de deterioração e métodos de detecção

Evidentemente esta lógica pressupõe que as falhas em questão se desenvolvem gradativamente em um certo período de tempo. Também é pressuposto que o método de monitoração seja viável de ser aplicado neste intervalo de tempo, na frequência necessária para perceber a modificação do estado "saudável" para o estado "falha em progressão".

Necessariamente o método de monitoração para se justificar tem de ser suficientemente sensível para perceber as alterações de função nos seus estágios mais iniciais e com antecedência bastante superior aos sentidos humanos.

Este trabalho enfoca as ferramentas de análise em operação de mancais de rolamento em equipamentos rotativos. Os mancais de rolamento estão presentes em praticamente todos os equipamentos rotativos de pequeno e médio portes na indústria. Tipicamente os equipamentos rotativos formam uma população numericamente grande e importante, em especial nas chamadas indústrias de processo, que precisam operar continuamente por longos intervalos de tempo (vários anos). A possibilidade de monitorar e avaliar com a devida antecedência e precisão a condição de mancais de rolamento em operação é portanto componente fundamental para a garantia da confiabilidade operacional nas modernas indústrias de processo.

Existem várias técnicas e equipamentos que se propõe a analisar a condição de máquinas rotativas, inclusive de seus mancais. O método mais simples e largamente utilizado é a leitura de valores globais de vibração. Com a redução de custo e com a eletrônica digital popularizaram-se os equipamentos de análise que permitem a análise de Fourier do sinal de vibração (autoespectro). Entretanto, percebe-se, nas aplicações práticas em larga escala, que a análise de Fourier nem sempre permite a detecção de problemas com a antecedência que seria conveniente e que o valor global de vibração é um indicador bastante precário da condição dos mancais, alterando-se normalmente quando outros sinais como o ruído ou a temperatura anormais já estão presentes.

1.2.OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa é o de avaliar algumas das técnicas de análise de sinal utilizadas para diagnóstico de mancais de rolamento mais elaboradas disponíveis para uso no ambiente industrial, através de estudos de caso.

O objetivo específico é o de avaliar comparativamente a análise da tendência dos valores globais RMS de vibração, o autoespectro deste sinal e a técnica de diagnóstico de mancais de rolamento pelo espectro do envelope do mesmo sinal, utilizando a Transformada de Hilbert, aplicados em um ambiente industrial com uma grande diversidade e população de equipamentos. Os desempenhos são avaliados quanto a precocidade do diagnóstico, confiança no resultado, viabilidade de execução e facilidade de interpretação dos resultados. Ao final do trabalho serão estabelecidas as potencialidades e limites comparativos de ambas as ferramentas de análise.

1.3.JUSTIFICATIVA

Um estudo como o proposto justifica-se pela avaliação das questões: o espectro de envelope pela Transformada de Hilbert, como ferramenta de análise em uma população de equipamentos, representa realmente uma melhoria na capacidade de percepção de alterações reais causadas em mancais de rolamento em equipamentos rotativos usuais nas indústrias de

processo (celulose, química, petróleo e petroquímica)? Os diagnósticos são obtidos com a devida antecipação ? A implementação da análise e coleta destes dados é viável para uma grande população de equipamentos?

Esta avaliação fornecerá subsídios para o aumento de confiabilidade aplicada a equipamentos rotativos e para a implementação de programas de gerência de ativos industriais com bases científicas, contribuindo diretamente para a preservação dos níveis de competitividade da atividade produtiva e para a preservação do meio-ambiente e da qualidade de vida da população envolvida.

A aplicação e análise da Transformada de Hilbert foi desenvolvida por alguns autores em equipamentos de laboratório com falhas provocadas artificialmente nos mancais. A utilidade da técnica para a aplicação em um ambiente industrial com uma grande quantidade e diversidade de equipamentos e características operacionais, construtivas e dinâmicas porém não é uma consequência imediata, e deve ser avaliada comparativamente aos tipos de monitoramento mais usuais que normalmente são executados. A pesquisa pretende portanto contribuir para interesse prático da aplicação deste recurso de diagnóstico, tendo como referência outras técnicas já consagradas. A busca e aplicação de ferramentas mais eficazes é uma real necessidade para as unidades produtivas, nas quais a aplicação sistemática de recursos tecnológicos mais avançados (em todas as áreas) pode representar ganhos estratégicos importantes em termos de competitividade e viabilidade econômica.

1.4.METODOLOGIA

O caso estudado é o dos equipamentos da planta da Copesul em Triunfo, Rio Grande do Sul, com um total de cerca de 1.100 equipamentos rotativos sob supervisão. Destes serão selecionados um subgrupo que tenha as seguintes características: sejam equipamentos importantes para a manutenção da continuidade operacional, sejam rotativos puros, tenham mancais de rolamento, tenham acesso e permitam a medição periódica, tenham um acompanhamento e controle de intervenções e um histórico de manutenção. Este subgrupo para efeitos deste trabalho contém 380 equipamentos rotativos.

A instalação a ser estudada é considerada típica para o tipo de indústria, devido a similaridade da tecnologia que é aplicada nas plantas petroquímicas em todo o mundo. Existe uma grande quantidade destas plantas e o regime de operação, o projeto e o porte dos

equipamentos são similares, uma vez que existem poucas empresas de engenharia que desenvolvem este tipo de tecnologia.

O procedimento adotado é o da leitura de valores globais de vibração, autoespectro e espectro de envelope do sinal por Transformada de Hilbert em todos os equipamentos da população em foco, visando detectar alterações nos mancais de rolamento. Quando alguma destas leituras indica uma falha incipiente ou já estabelecida ou se existir uma oportunidade por qualquer outro motivo que permita uma intervenção em que se tenha acesso aos mancais de rolamento, estes serão inspecionados visualmente e por microscopia, para a caracterização do seu estado e validação do diagnóstico através das ferramentas de análise de sinal aplicadas.

A técnica de coleta de dados é feita de duas maneiras básicas: contínua, onde este sistema já é disponível, e intermitente nos demais equipamentos. O período entre coletas intermitentes obedece ao critério de disponibilidade operacional requerida para o equipamento dado um tempo médio entre falhas (TMEF) estimado.

Estes valores são descritos na Tabela 1.4.1 [Moubray, 1997] :

Disponibilidade requerida do componente (no processo produtivo)	99,99%	99,95%	99,9%	99,5%	99%	98%	95%
Intervalo entre medições (% do TMEF)	0,02%	0,1%	0,2%	1%	2%	4%	10%

Tabela 1.4.1. Intervalo entre medições em função da disponibilidade operacional;

O instrumento utilizado para a coleta de dados intermitente é o coletor eletrônico “off-line” da Bruel e Kjaer (B&K) modelo 2526 e o software de tratamento de dados B&K7016. A periodicidade das leituras será basicamente mensal, limitada eventualmente pela disponibilidade dos equipamentos rotativos. O sensor utilizado nas coletas manuais é um acelerômetro B&K modelo 4391. Os equipamentos que possuem monitoração permanente (dentre os casos detalhados neste trabalho, somente os motores dos ventiladores 48MVT01D e 48MVT01J) utilizam acelerômetros B&K modelo 8326I rosqueados diretamente na carcaça do equipamento rotativo.

Os detalhes da instrumentação utilizada estão no item 1.5.

A fixação dos sensores manuais é por conexão roscada a uma base fixada nos equipamentos através de um adesivo de base epóxi-metálica. Os objetivos da utilização de um pino fixado ao equipamento para pontos de tomada de leituras são os seguintes:

1 – garantir que as leituras de vibração nas carcaças dos equipamentos sejam sempre tomadas próximas aos mancais de rolamento e exatamente na mesma posição, para que a função de transferência seja sempre aplicada no mesmo ponto;

2 – fazer com que a fixação entre sensor e equipamento seja através de conexão rosquada, o que impede a distorção do sinal e mantém a frequência natural do acelerômetro em um valor bastante elevado, fora das faixas de frequência adotadas para leitura;

1.5. INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA

1.5.1. MICROSCOPIA

Microscopia eletrônica: microscópio de varredura de elétrons modelo DSM 940 de fabricação da Carl Zeiss, com as seguintes características:

magnificação de 3 a 200.000 vezes;

voltagem de aceleração de 490 V a 30 kV;

resolução: 5 nm a 30 kV com filamento de tungstênio;

condensador de duplo zoom com sistema de seis focos: compensação, 3 incrementos macrométricos, 16 incrementos finos. Lentes objetiva cônicas de 45 graus com focalização digital;

Sistema de deflexão com bobinas para pequenos aumentos em modo de varredura de TV;

Sistema de alinhamento do feixe eletromagnético;

Filamento de tungstênio mecanicamente pré centrado em cilindro de Wehnelt;

Anodo montado com rosca;

Lentes e sistema de deflexão montados fora da câmara de vácuo;

Controle contínuo de emissão de corrente;

Modos de varredura: varredura lenta sobre malha de 512 x 512 x 8 bits armazenado em 8 incrementos de 1 s a 360 s com integração de pixel para redução de ruído;

Desvio eletro-ótico de imagem de +/- 3,5 micra;

Tamanho da câmara para espécime: 270 mm de largura x 250 mm de profundidade x 170 mm de altura;

Excentricidade máxima do suporte do espécime: melhor do que 1 micron;

Princípio de funcionamento do microscópio eletrônico: o espécime é varrido ponto a ponto por um feixe de elétrons estreitamente colimado gerado por um filamento de tungstênio e um sinal é emitido pelos pontos da superfície do espécime. Estes sinais são captados por um anodo. A corrente de elétrons emitidos é controlada por um cilindro de Wehnelt. O conjunto do catodo (filamento e cilindro) e o do anodo são montados de tal modo que produzem a sobreposição dos trajetos dos elétrons. O feixe de elétrons ao ser emitido passa por duas lentes eletromagnéticas condensadoras que reduzem esta sobreposição e a seguir passa por uma outra lente eletromagnética objetiva que dirige o feixe para a superfície do espécime. O feixe é varrido por toda a superfície do espécime. A área varrida é definida pela seleção do aumento desejado, e é definida pela razão entre o tamanho do campo no monitor e o tamanho do campo no espécime.

Microscopia ótica: estereomicroscópio ótico marca Zeiss tipo SV8 número de série 410265 com aumentos de até 200X e câmara fotográfica adaptável modelo MC63. Os aumentos permissíveis são de 10 X até 25 X, com distâncias focais de 50 mm até 2000mm. A dupla objetiva é do tipo Greenough, caracterizada por imagens isentas de aberrações cromáticas.

1.5.2. COLETOR DE VIBRAÇÕES PORTÁTIL

Coletor de vibrações Brüel e Kjaer modelo 2526E (E indica especificação para área classificada, ou seja, à prova de explosão, assim como os acelerômetros) número de série 1707187 (com certificado de calibração rastreável de acordo com a norma ISO 9001) ilustrado pela Figura 1.5.1.

O coletor utiliza programa proprietário (sistema "Compass") que trata, transfere e armazena os dados em um banco de dados localizado em um servidor. A transferência dos dados é feita por terminais remotos espalhados pela fábrica para o servidor através de rede local tipo Ethernet. Os dados são digitalmente tratados para fornecerem as análises utilizadas (autoespectro, valor global e espectro de envelope). As configurações podem ter alguns parâmetros alterados. O Apêndice 7.3 mostra algumas das configurações típicas utilizadas dos parâmetros que permitem alterações. Para o espectro de envelope e de autoespectro foi utilizado

filtro passa-banda de 1 kHz até 10 kHz e janela "hanning". Procurou-se utilizar toda a faixa linear de captação do acelerômetro.

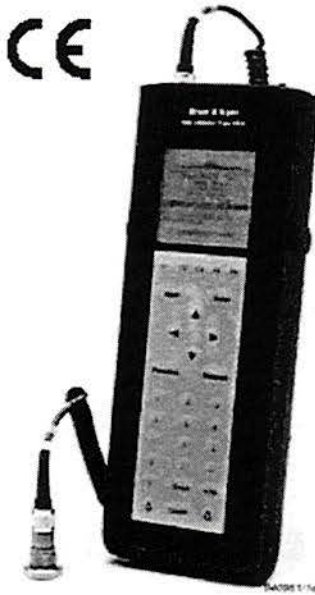


Figura 1.5.1. Coletor de vibrações portátil utilizado;

1.5.3. ACELERÔMETRO PARA COLETOR PORTÁTIL

Acelerômetro modelo 4391 números de série 1840149 e 2127239 – especificações:

Tipo: tipo "Delta Shear" com base isolada e conexão de topo 7/16 – 28 tipo UNEF-

2A;

Peso: 16 gramas

Sensibilidade: voltagem 6,67 mV/g ou carga 9,84+/-2% pC/g em 159,2 Hz e a 25°C

Range de frequência: 12 kHz +/- 10%;

Máxima sensibilidade transversal (a 30 Hz, 100ms⁻²): 1,7%

Frequência típica de ressonância (montado em cubo de titânio com parafuso de aço padrão 1-32 UNF-2A e com torque de montagem de 1,8 Nm): 12 kHz;

Resistência mínima à temperatura ambiente: 20.000 MOhm

Selado à umidade;

Limites de temperatura: -60 a +180°C

Máxima aceleração sob choque: 20 kms⁻² pico;

Sensibilidade magnética típica: 4 ms⁻²/T

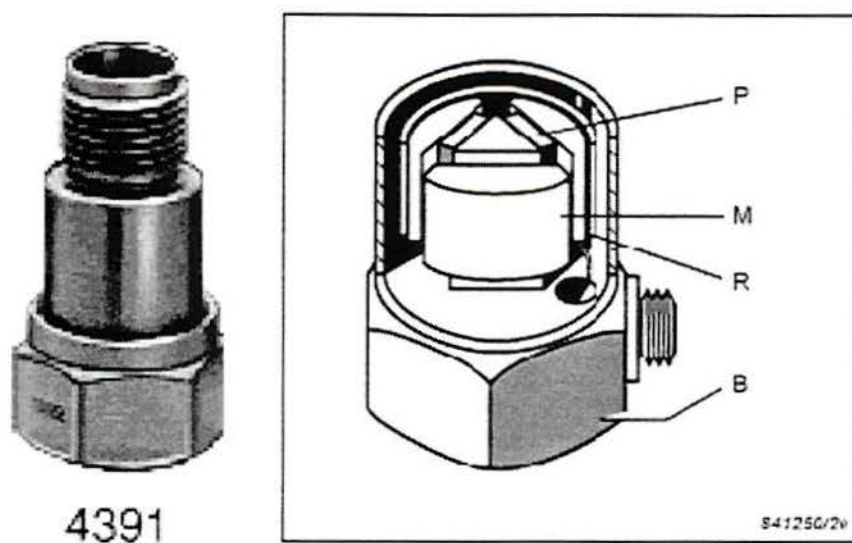


Figura 1.5.2. Foto do acelerômetro modelo B&K 4391 utilizado na coleta de dados e corte típico simplificado de construção tipo "delta shear";

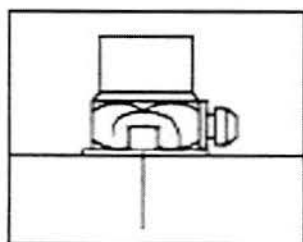


Figura 1.5.3. Método de fixação: pino roscado ao acelerômetro e colado ao equipamento;

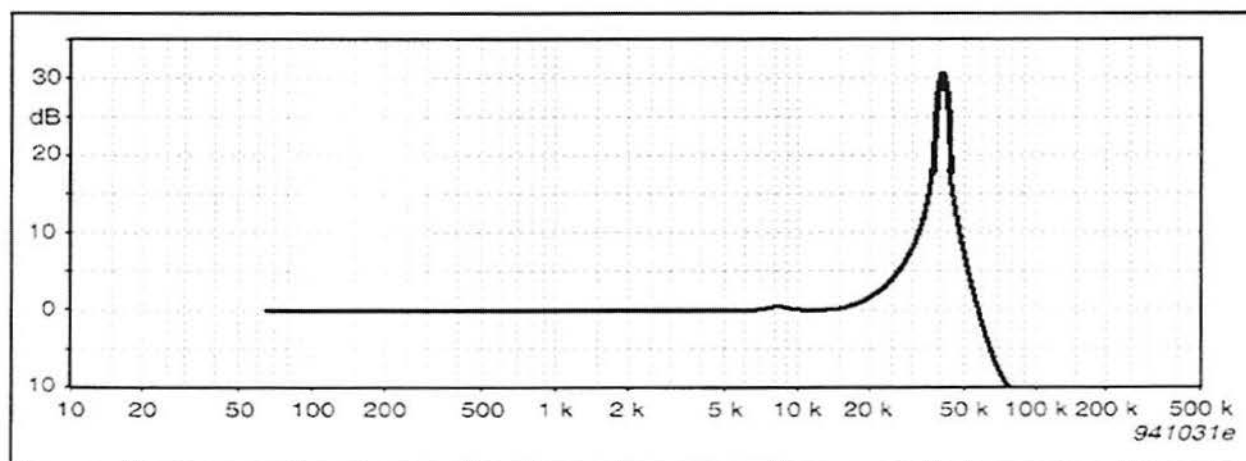


Figura 1.5.4. Curva de calibração típica do acelerômetro 4391, mostrando a frequência natural do sensor;

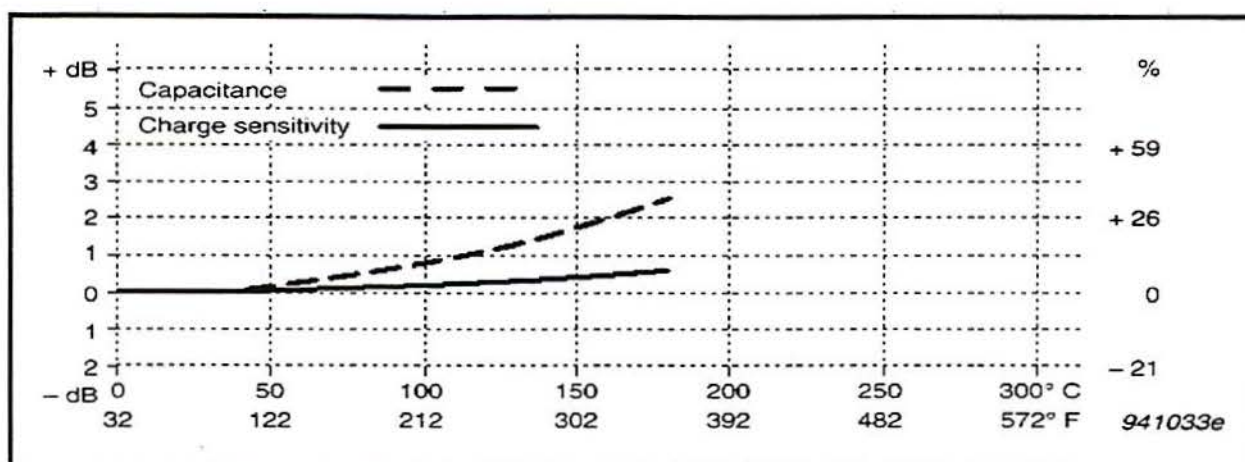


Figura 1.5.5. Curva de erro típica causado pela temperatura para acelerômetro 4391;

1.5.4. ACELERÔMETROS PARA MONITORAMENTO PERMANENTE

Número de série dos acelerômetros fixos Modelo 8326I instalados na torre de resfriamento 48TM01 e 03 para monitoramento permanente dos motores e redutores:

1915666, 1915667, 1915668, 1915674, 1915675, 1915677, 1915679, 2025913, 2025914, 2025915, 2025916, 2025917, 2025918, 2025919, 2025920, 2025921, 2025922, 2025923, 2025924, 2025925, 2025926, 2025927, 2025928, 2025929, 2025930, 2025931, 2025932, 2025934, 2025935, 2025936, 2025937, 2025938, 2025939, 2025942, 2025943, 2025944, 2025945, 2025946, 2025947;

Estes acelerômetros possuem as mesmas características básicas do modelo 4391, porém possuem carcaça com proteção para uso em ambientes expostos a água.

1.5.5. CALIBRADOR PORTÁTIL

O sistema de aquisição é periodicamente calibrado com um calibrador portátil B&K modelo 4294. Este calibrador é um excitador de vibrações mecânicas, gerando uma vibração mecânica fixa com aceleração de 10m/s² RMS (“root mean square”) em 159,2 Hz (1000 rad/s) correspondente a uma velocidade RMS de 10 mm/s e um deslocamento RMS de 10 micra. A precisão é melhor do que +/- 3%. Com este dispositivo é possível verificar a sensibilidade do acelerômetro e permitir a verificação do sistema completo de medição. O calibrador possui certificado de calibração atualizado e com rastreabilidade.

1.6.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Evidentemente que uma das premissas deste trabalho é a de que defeitos em mancais de rolamento vão gerar sinais particulares que permitem a identificação da falha, que normalmente são calculadas assumindo-se o mancal como corpo rígido e apresentando rolamento puro. Sabe-se porém que a vibração resultante possui também componentes de ruído causados pelo atrito e não-linearidades [Babkin, 1972]. Outros efeitos, tais como o efeito giroscópico, são normalmente ignorados nos estudos publicados [Martin, 1992]. Foi observado que as falhas (descontinuidades) nos componentes dos mancais de rolamento (pista interna, externa, separador e rolos ou esferas) geram, além de suas próprias frequências de impacto, a excitação de modos elásticos das estruturas vizinhas, que podem se apresentar na faixa de alguns kilohertz até vários megahertz [McFadden, 1986]. Estes modos naturais de vibração tem alta frequência, quando comparados com as frequências diretamente originadas nas descontinuidades. Os modos excitados terminam por modular em amplitude o sinal do impacto causado pela descontinuidade, atuando como frequências portadoras do sinal original [Hopson, 1987].

A demodulação permite então recuperar estes sinais originais a partir do sinal de alta frequência. Algumas vantagens desta estratégias são descritas pela literatura [Ratcliffe, 1988] como:

"a – identificação de frequências únicas dos defeitos dos mancais no espectro do envelope permite leituras válidas em ambientes de alto ruído e vibração. Frequências outras que não as calculadas como originárias de defeitos nos mancais de rolamento certamente emanam de outras fontes, tais como engrenagens, etc;

b – o aspecto de discriminação de frequências permite a esta técnica ser aplicada em máquinas de muito baixa rotação, como rolos de laminação (...);

c – como o envelope do sinal indica a amplitude relativa da frequência de defeito sobre o nível de fundo ('carpet level') e como ambos estão submetidos a mesma atenuação através das faces de transmissão, esta proporção não é tão dependente da posição do sensor como outras técnicas que levam em conta apenas valores absolutos;

d – novamente, como estamos avaliando amplitudes relativas, a técnica não é tão fortemente dependente da carga na máquina. O dobro da carga irá amplificar proporcionalmente ambos os sinais. Isto pode ser particularmente útil em testes de máquinas com baixas cargas;"

Também conforme Ghosh, 1986:

" a monitoração direta por meios tradicionais de mancais antifricção é difícil, devido a pequena amplitude dos sinais. (...) A técnica do envelope capitaliza a habilidade das altas frequências de ressonância de agirem como um amplificador e portador dos sinais de baixa frequência das descontinuidades que melhora a relação sinal/ruído." [Ghosh, 1986].

Outros métodos como o da curtose foram estudados por alguns autores, mas os resultados são encarados com reservas [Gerges, 1985]. Como parâmetro absoluto a curtose não apresentou resultados seguros, e modificações no método visando melhorar seu desempenho foram propostos

As pesquisas desenvolvidas sobre o tema "diagnóstico de mancais de rolamento por análise de vibração" tem algumas características marcantes: normalmente as leituras são tomadas em uma bancada especialmente construída para a verificação do estado dos mancais. Os defeitos são introduzidos artificialmente nos mancais por impacto, eletro-erosão ou outro meio. Os defeitos são macroscópicos, únicos e localizados em um ponto determinado, na grande maioria dos estudos. Notáveis exceções são os trabalhos de Ratcliffe, 1988, Randall, 1982 e Hopson, 1987. McFadden, 1982 excepcionalmente faz algumas referências a vários defeitos produzidos na mesma pista de rolamento em bancada.

Nunca são feitas entretanto referências a outros sintomas dos mancais, tais como ruído ou aquecimento. Normalmente também nada é dito sobre a vida residual do rolamento operando com o defeito introduzido. Como regra são estudados um ou dois tipos de mancais específicos e a partir daí as conclusões são extrapoladas.

Quando se pensa em aplicar a técnica em um ambiente industrial para um grande número de equipamentos de diversos tipos, níveis de potência, geometrias e tamanhos, ainda que dentro de limites bem determinados, este enfoque do problema tem algumas implicações que normalmente não são claramente discutidas.

Uma delas diz respeito às condições de leitura de vibração, que na bancada são próximas da ideal, algumas vezes sendo tomadas diretamente na superfície do mancal de rolamento. Este tipo de leitura permite minimizar a influência da função de transferência que se estabelece entre a fonte geradora e o sensor. Não são feitas análises da influência da função de transferência e do amortecimento do sinal em função da posição relativa do sensor, geometria e

massa do equipamento. Esta análise seria fundamental, uma vez que observa-se que medições em equipamentos cuja carcaça possui massa muito maior do que a dos mancais, o sinal de vibração chega muito amortecido à superfície. É notória a dificuldade de diagnosticar rolamentos em motores elétricos dada essa particularidade quando utilizamos leituras globais ou autoespectro.

Uma discussão mais profunda sobre a característica da vibração dos defeitos superficiais impostos em bancada em rolamentos novos e os defeitos que realmente se desenvolvem nos mancais em uso ainda está por ser feita, com exceção da discussão iniciada por McFadden, 1982. Sabe-se que os rolamentos apresentam inúmeros mecanismos de falha e aspectos superficiais distintos, como também se constata no presente trabalho. Possivelmente a característica vibratória de alguns tipos de defeitos possuirão particularidades que se refletirão no sinal, perturbando a análise e tornando o diagnóstico mais ou menos antecipado. Em outras palavras, o comportamento em bancada não necessariamente pode ser extrapolado para equipamentos em operação normal, a menos que seja reproduzido na bancada o mesmo padrão de desenvolvimento da descontinuidade.

Em nenhuma bibliografia encontrou-se menção à ruído ou aquecimento anormal nos ensaios em bancada. Evidentemente que se o equipamento apresenta claros sinais de alteração perceptível pelos sentidos humanos ou outros meios de medição, de pouca valia se torna a complexa análise de sinal no sentido de se antecipar às manifestações evidentes de falha em progressão, tornando a técnica menos capaz de aumentar a confiabilidade operacional, que é na verdade a sua função básica. Nesta mesma linha, poucas referências são feitas a algum mecanismo para estimar a vida residual do mancal de rolamento a partir de uma determinada análise que apresente alterações. Este objetivo entretanto talvez seja extremamente difícil de perseguir, dadas as inúmeras variáveis que podem interferir nos mecanismos de falha e a provável progressão não-linear da deterioração.

Estudos realizados em apenas um mancal de rolamento evidentemente são consistentes, mas não necessariamente podemos extrapolar os resultados a rolamentos maiores ou menores ou de características físicas distintas (geometria interna), tipos de montagem diferenciados, modos de aplicação de carga, percentagem da carga máxima aplicada, etc. Ou seja, ainda que seja demonstrada em um equipamento ou em uma bancada para um determinado mancal, não necessariamente poderemos assumir que exatamente os mesmos resultados serão obtidos para outros mancais. Alguns autores entretanto fizeram levantamentos em um número maior de mancais com resultados auspiciosos.

Uma última questão que deve ser enfocada é a de que nos equipamentos de bancada não coexistem os demais sinais de vibração que são inevitáveis em equipamentos reais, tais como desbalanceamentos, desalinhamentos, transmissão de outras fontes próximas, vibração causada pelo fluxo e por efeitos de corrente elétrica, somente para citar os mais comuns. Os sinais em casos reais de análise normalmente são uma composição destes e possivelmente de outros sinais. Alguns destes, em especial os causados pelo fluxo de gases ou líquidos, podem gerar impactos e vibrações em altas frequências, que tem características semelhantes aos sinais gerados pelos mancais de rolamento, podendo afetar negativamente a análise ou forçando a análises complementares um tanto complexas para separar causas e efeitos distintos.

Um autor [Li, 1989] faz uma interessante análise comparativa entre outras técnicas utilizadas para análise de mancais de rolamento, com resultados interessantes. O ponto mais relevante é o de que nenhuma técnica estudada, ainda que em bancada, apresentou taxas de acerto de 100%. Isto significa que não existe uma maneira totalmente eficaz para detectar falhas em mancais de rolamento, mesmo com todas as facilidades de bancadas de teste, que possam reduzir a taxa de falhas a zero!

Outro aspecto que não se pode deixar de comentar é o de que além do tratamento de sinais ser complexo, a interpretação destes dados também o é, ou seja, a análise exige uma pessoa com conhecimentos específicos e uma dose de experiência, além de tomadas de decisões prévias que são críticas, tais como faixas de frequências a serem analisadas, sensibilidade dos sensores, locais de tomada dos sinais, etc.

Martin, 1992, levanta algumas questões adicionais sobre aspectos ainda pouco investigados:

"desde que um sistema complexo apresenta inúmeras ressonâncias, qual será a de interesse para a demodulação e qual a banda que deve ser analisada? Qual o efeito de modificar a banda analisada e o limite de (filtro) passa baixa? Estas questões afetam a precisão e a sensibilidade do método e merecem investigação. (...) Um exame da técnica como um todo impõe ainda a questão de ser necessária a análise de espectro ou pode ser feita apenas a filtragem das poucas frequências calculadas relacionadas aos defeitos?"

Um dos trabalhos [Li, 1989] propõe condensar a massa de informações obtida nos espectros em um padrão, através de dois escalares adimensionais, visando facilitar a análise e o diagnóstico automáticos obtido pela aplicação de um algoritmos envolvendo autocorrelação de alguns tipos de sinal no domínio do tempo, visando detectar as características de modulação em

amplitude. Este trabalho entretanto tomou dados somente em bancada, tomando inúmeras leituras em diferentes posições de apenas 3 mancais, e comparou os resultados com outras técnicas de análise, como envelope, fator de crista, curtose (estes dois últimos baseiam-se em análise estatística do sinal no tempo) e "shock pulse counting". Comparando as taxas de sucesso de diagnóstico, o autor coloca como os melhores métodos o proposto (taxa de sucesso 91%) e o espectro de envelope (77%), sendo curtose o pior deles (62%).

Randall, 1982 propôs o uso do Cepstrum aplicado ao espectro de envelope como técnica auxiliar na detecção de descontinuidades em mancais de rolamento.

Modernamente estão surgindo diversos trabalhos que procuram utilizar a inteligência artificial para a resolução deste problema [Shao, 1995]. Este tipo de enfoque altamente complexo entretanto parece estar ainda no início de desenvolvimento. Existem outros tipos de programas de computador que, dada uma série de regras fixas, comparam espectros com valores de referência e valores calculados das frequências esperadas de vibração para cada uma das localizações de defeitos em mancais de rolamento. Este tipo de programa não se trata de Inteligência Artificial e nem substitui o analista, mas permite que uma quantidade grande de cálculos e comparações sejam bastante reduzidas, tornando mínimo o tempo de análise. Entretanto a configuração dos equipamentos e dos componentes neste tipo de programa exige conhecimento detalhado do que se está esperando analisar, conhecimento do equipamento e consome ela própria também um tempo considerável.

Outro fator que deve ser observado para estas análises é que muitas frequências podem estar próximas da frequência síncrona e seus harmônicos. Desgastes e outros efeitos geométricos dependentes do tempo introduzem ligeiras alterações nas frequências esperadas de vibração dos mancais, podendo tornar a interpretação dos espectros uma tarefa bastante confusa.

Um caso que merece menção são os defeitos em corpos rolantes (esferas dos rolamentos). Caso uma esfera apresente uma descontinuidade, nada garante que a cada volta completa o defeito permaneça no mesmo plano. Isto faz com que em algumas rotações da esfera, o defeito atingirá uma das pistas e causará um pulso de vibração, mas em algumas outras rotações isto talvez não aconteça, tornando o sinal não-periódico! Como os rolamentos possuem folgas internas e o carregamento normalmente tem uma direção principal preferencial, o lado carregado sempre terá contato da esfera com as pistas, porém o lado não carregado, que terá folgas maiores, poderá não apresentar contato da esfera com um arco da pista externa, por exemplo. Isto causará alterações importantes no sinal tanto para defeitos em uma esfera quanto para defeitos no anel externo [McFadden, 1982].

Todas estas não-linearidades, em se podendo chamá-las assim, tornam extremamente complexa a tarefa de analisar mancais de rolamentos e podem fazer com que procedimentos que tenham excelentes resultados em bancada não sejam úteis para aplicações em outros ambientes. Isto em parte justifica o presente trabalho, que se propõe a aplicar a verificar alguns resultados da análise do espectro do envelope do sinal em uma população de equipamentos que por certo terão uma enorme gama de situações distintas porém usuais.

Apesar de não entrar no tópico análise de vibrações, o Metals Handbook da American Society for Metals possui um volume dedicado a análise de falhas com um abrangente artigo [Rice et alli, 1975] sobre mancais de rolamento que tabula de modo extensivo e detalhado as características e causas de vários tipos de falhas nestes mancais. Alguns exemplos são analisados do ponto de vista da análise de falhas em metais e da análise de tensões.

Um item que merece destaque é o da falha de pistas e corpos rolantes de mancais causadas por passagem de corrente elétrica. Carga elétrica pode ser acumulada nos corpos rolantes em operação originadas pelo atrito. Caso as pistas não estejam devidamente aterradas ou o lubrificante apresente características isolantes, esta carga se acumula até que a diferença de potencial seja suficiente para abrir um arco elétrico momentâneo. Este arco causa um pequeno (microscópico) arrancamento localizado de material. Este fenômeno pode levar a um desgaste excessivo ou ainda servir de iniciação de trincas que irão se desenvolver sub-superficialmente devido aos ciclos de tensão que o material do mancal está submetido em operação normal. Estas trincas eventualmente poderão causar o descascamento das superfícies ("flaking"). Outra causa comum de dano por corrente elétrica ocorre quando da operação de sistemas elétricos próximos a equipamentos rotativos (máquinas de solda, sistemas de proteção de corrosão por corrente impressa, veículos elétricos) podem permitir a passagem de corrente através do mancal, com efeitos danosos.

Uma classificação mais sintética de danos em mancais de rolamento pode ser encontrada em Timken, 1970. Esta classificação será apresentada de forma resumida no capítulo 3. Ambas servem de base para a análise dos casos em foco neste trabalho, especialmente quanto a nomenclatura adotada.

2. TRANSFORMADA DE HILBERT

A transformada de Hilbert de um sinal real no domínio do tempo $x(t)$ é um outro sinal real no domínio do tempo simbolizado por $\tilde{x}(t)$, de maneira que $z(t) = x(t) + j \tilde{x}(t)$ seja um sinal analítico. Por definição, sinal analítico é aquele sinal complexo no domínio do tempo no qual a parte imaginária é a transformada de Hilbert da parte real do sinal. Por sua vez, a transformada de Fourier do sinal $x(t)$ é um sinal complexo no domínio da frequência $X(f)$, que é evidentemente distinto da Transformada de Hilbert $\tilde{x}(t)$ e do sinal $z(t)$.

Desde $z(t)$ pode-se definir uma função com magnitude $A(t)$ e ângulo de fase $\theta(t)$, onde $A(t)$ descreve o envelope da função original $x(t)$ contra o tempo, e $\theta(t)$ a fase instantânea de $x(t)$ contra o tempo. De especial interesse neste trabalho será a componente de magnitude, referida doravante como *envelope da função* $x(t)$.

A Transformada de Hilbert apresenta propriedades que a definem de três modos distintos:

- a - como uma integral de convolução;
- b - como defasagem de $\pi/2$ do sistema;
- c - como parte imaginária do sinal analítico;

A seguir serão descritas cada uma destas definições.

2.1.DEFINIÇÃO COMO INTEGRAL DE CONVOLUÇÃO

A Transformada de Hilbert $\mathbf{H} [x(t)]$ de uma função real $x(t)$ que se estende desde $-\infty < t < \infty$ é uma função real $\tilde{x}(t)$ definida por

$$\tilde{x}(t) = \mathbf{H} [x(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(u)}{(t-u)} du \quad (1)$$

Portanto, $\tilde{x}(t)$ é a integral de convolução de $x(t)$ e $(1/\pi t)$, escrita como

$$\tilde{x}(t) = x(t) * (1/\pi t) \quad (2)$$

Assim como a Transformada de Fourier, a Transformada de Hilbert é um operador linear onde

$$\mathbf{H} [a_1x_1(t) + a_2x_2(t)] = a_1\mathbf{H} [x_1(t)] + a_2\mathbf{H} [x_2(t)] \quad (3)$$

para quaisquer constantes a_1, a_2 e quaisquer funções $x_1(t), x_2(t)$.

A transformada inversa é definida como:

$$x(t) = \mathbf{H}^{-1}[\tilde{x}(t)] = - \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\tilde{x}(u)}{\pi(t-u)} du \quad (4)$$

Logo, $x(t)$ é a integral de convolução de $\tilde{x}(t)$ e $(-1/\pi t)$.

2.2.DEFINIÇÃO COMO DEFASAGEM DE $\pi/2$

Seja $\tilde{X}(f)$ a Transformada de Fourier de $\tilde{x}(t)$, ou seja:

$$\tilde{X}(f) = \mathcal{F} [\tilde{x}(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{x}(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (5)$$

Então, a partir da expressão

$$\tilde{x}(t) = x(t) * (1/\pi t) \quad (6)$$

segue que $\tilde{X}(f)$ é a Transformada de Fourier $\tilde{X}(f)$ de $\tilde{x}(t)$, multiplicada pela Transformada de Fourier de $(1/\pi t)$. A Transformada de Fourier de $(1/\pi t)$ é dada por:

$$\mathcal{F} [1/\pi t] = -j \operatorname{sgn} f = \begin{cases} -j, \text{ para } & f > 0 \\ j, \text{ para } & f < 0 \end{cases} \quad (7)$$

Em $f = 0$, a função $\operatorname{sgn} f = 0$. Portanto, a expressão $\tilde{x}(t) = x(t) * (1/\pi t)$ é equivalente a passagem de $x(t)$ pelo sistema definido por $(-j \operatorname{sgn} f)$, que fornece:

$$\tilde{X}(f) = (-j \operatorname{sgn} f) X(f) \quad (8)$$

Esta quantidade complexa $\tilde{X}(f)$ não é a Transformada de Hilbert da quantidade complexa $X(f)$. Sua relação com $\tilde{x}(t)$ é

$$\tilde{x}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{X}(f) e^{j2\pi ft} df \quad (9)$$

ou, por extenso, pode ser dito que $\tilde{x}(t)$ é a Transformada de Fourier inversa de $\tilde{X}(f)$.

A Transformada de Fourier de $(-j \operatorname{sgn} f)$ pode ser representada por:

$$B(f) = (-j \operatorname{sgn} f) = \begin{cases} e^{-j(\pi/2)} & \text{se } f > 0 \\ e^{j(\pi/2)} & \text{se } f < 0 \end{cases}, \text{ com } B(0) = 0 \quad (10)$$

e também

$$B(f) = |B(f)| e^{-j\phi_b(f)} \quad (11)$$

Portanto $B(f)$ representa uma defasagem do sistema de $(\pi/2)$ onde:

$$|B(f)| = 1 \text{ para todos os } f \neq 0.$$

$$\phi_b(f) = \begin{cases} \pi/2 & \text{para } f > 0 \\ -\pi/2 & \text{para } f < 0 \end{cases} \quad (12)$$

Se for escrito

$$X(f) = |X(f)| e^{-j\phi_x(f)}, \text{ segue-se que}$$

$$\tilde{X}(f) = \tilde{X}(f) e^{-j\tilde{\phi}_x(f)} = |X(f)| e^{-j[\phi_x(f) + \phi_b(f)]} \quad (13)$$

Portanto a Transformada de Hilbert consiste em passar $x(t)$ por um sistema no qual a magnitude de $X(f)$ permanece inalterada, mas que modifica a fase de $\phi_x(f)$ para $\phi_x(f) + \phi_b(f)$ usando $\phi_b(f)$ da equação (a) descrita acima, ou seja

$$\phi_x(f) \longrightarrow \phi_x(f) + \left(\frac{\pi}{2}\right) \text{ para } f > 0 \quad (14)$$

$$\phi_x(f) \longrightarrow \phi_x(f) - \left(\frac{\pi}{2}\right) \text{ para } f < 0 \quad (15)$$

Em outras palavras, defasando o sinal de $\pi/2$ para as frequências positivas e de $-\pi/2$ para as frequências negativas.

2.3.DEFINIÇÃO COMO PARTE IMAGINÁRIA DE UM SINAL ANALÍTICO

Uma terceira maneira de entender e calcular a transformada de Hilbert $\tilde{x}(t)$ de $x(t)$ é através do sinal analítico $z(t)$ associado a $x(t)$ definido por

$$z(t) = x(t) + j\tilde{x}(t) \quad (16)$$

Esta pode ser escrita também como

$$z(t) = A(t)e^{j\theta(t)} \quad (17)$$

onde $A(t)$ é chamado de envelope do sinal de $x(t)$. Em termos de $x(t)$ e de $\tilde{x}(t)$, fica claro que:

$$A(t) = [x^2(t) + \tilde{x}^2(t)]^{1/2} \text{ e que } \theta(t) = \tan^{-1} \left[\frac{\tilde{x}(t)}{x(t)} \right] = 2\pi f_o t \quad (18)$$

A "frequência instantânea" f_o é dada por

$$f_o = \left(\frac{1}{2\pi} \right) \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (19)$$

Deixando $Z(f)$ ser a Transformada de Fourier de $z(t)$, ou seja

$$Z(f) = \mathcal{F}[z(t)] = \mathcal{F}[x(t) + j\tilde{x}(t)] = \mathcal{F}[x(t)] + j\mathcal{F}[\tilde{x}(t)] = X(f) + j\tilde{X}(f) \quad (20)$$

A Transformada de Fourier inversa de $Z(f)$ fornece

$$z(t) = \mathcal{F}^{-1}[Z(f)] = x(t) + j\tilde{x}(t), \text{ onde } \tilde{x}(t) = \mathcal{H}[x(t)] = \text{Im}[z(t)] \quad (21)$$

Aqui portanto pode-se fazer uma outra interpretação da Transformada de Hilbert, definindo-a como expressando a relação entre as componentes real e imaginária de uma Transformada de Fourier de um sinal unilateral (um sinal onde $a(t) = 0, t < 0$).

A necessária existência da relação fixa entre aquelas componentes pode ser provada (não o será neste texto) para um sinal causal, dadas algumas propriedades da Transformada de Fourier que mostram que ambas suas partes imaginária e real podem ser calculadas a partir da mesma componente anti-simétrica do sinal no tempo.

Dada a definição da Transformada de Hilbert como uma modificação de fase, sabe-se que a Transformada de Hilbert de um sinal pode ser obtida pelos seguintes passos: transposição do sinal para o domínio da frequência pela Transformada de Fourier, modificação da fase da parte positiva do espectro para $+\pi/2$ e da parte negativa do espectro para $-\pi/2$, e transformação inversa de Fourier de volta ao domínio do tempo. Todas estas operações podem ser realizadas por um analisador de espectro FFT.

Uma maneira de gerar um sinal analítico é tomando partido do fato de que seu espectro tem somente um lado e tem dupla amplitude com respeito ao espectro somente da parte real e esta operação também pode ser realizada por um analisador FFT (Fast Fourier Transform). Para análises realizadas somente com um canal, o uso da Transformada de Hilbert está relacionada normalmente com demodulação, de amplitude e fase (ou frequência).

2.4. TRANSFORMADA DE HILBERT E A DEMODULAÇÃO DE SINAIS

Quando se fala em análise de sinal de vibração, normalmente pensa-se em sinais que são somas de fasores com amplitude e velocidade angular fixas. De fato, é função da Transformada de Fourier fornecer estes fasores fixos. Se entretanto for necessário lidar com um sinal modulado genérico, este pode ser modelado como um fasor com velocidade angular (frequência) variável e amplitude variável, o que pode ser escrito:

$$g(t) = \text{Re}\{A(t)e^{j\phi(t)}\} \quad (22)$$

onde a amplitude $A(t)$ e o ângulo de fase instantâneo $\phi(t)$ são funções do tempo. A frequência instantânea será

$$f(t) = d\phi(t)/dt \quad \text{em rad/s} \quad (23)$$

ou

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} d\phi(t)/dt \quad \text{em Hz} \quad (24)$$

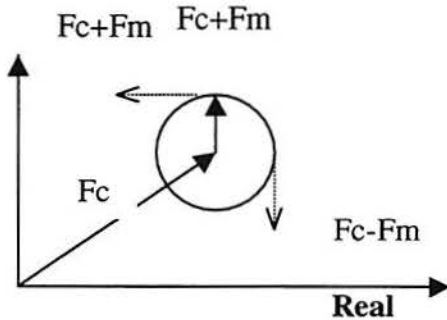
Se a expressão $g(t)$ contiver apenas frequências positivas, este sinal será analítico. Caso o sinal em questão seja modulado somente em amplitude, o que será o foco de interesse neste trabalho, este pode ser escrito:

$$g_a(t) = \text{Re}\{A(t)e^{j2\pi f_0 t}\} \quad (25)$$

onde f_0 é a frequência portadora constante e $A(t)$ descreve a função modulação de amplitude (real) ou "envelope" do sinal, e que normalmente contém uma componente constante (ou DC). A representação por fasor e o espectro de Fourier resultante de um sinal no tempo modulado em

amplitude estão ilustrados na figura Figura 2.4.1. Percebe-se que o sinal modulado em amplitude gera um espectro típico de sinal estacionário determinístico quase-periódico.

Imaginário



Amplitude

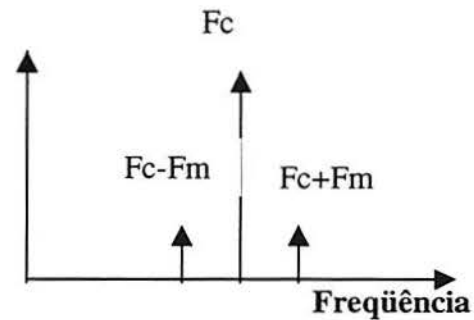


Figura 2.4.1. Representação de um sinal modulado em frequência

Deve ser salientado que a representação de sinais modulados em amplitude através de sinais analíticos é somente aplicável quando as bandas laterais de modulação não se sobrepõem à frequência zero, ou seja, o sinal pode ser representado por um espectro unilateral (somente frequências positivas, por exemplo). Em termos práticos, isto significa que para modulação em amplitude, a frequência portadora deve ser maior do que a mais alta frequência de modulação. Um dado sinal modulado genérico $a(t)$ pode ser demodulado pelo seguinte processo:

1. Calcular a Transformada de Hilbert para obter $\tilde{a}(t)$;
2. Formar o sinal analítico $a(t) + j\tilde{a}(t)$;
3. Decompor o sinal em suas componentes de amplitude e fase $A(t)e^{j\phi(t)}$. $A(t)$ é o sinal de modulação de amplitude (envelope), incluindo a componente constante DC.
4. Multiplicar $e^{j\phi(t)}$ por $e^{-j2\pi f_o t}$ para remover a frequência portadora f_o . A função de fase resultante $\phi(t) - 2\pi f_o t$ é o sinal de fase modulado;
5. Calcular $\frac{1}{2\pi} \frac{d\phi_m(t)}{dt}$ para obter a frequência do sinal de modulação $f_m(t)$;

Evidentemente que no caso de sinal modulado somente em amplitude o procedimento acima completa-se no terceiro passo. Uma situação em que a demodulação de amplitude tem aplicação é na análise de sinais contendo séries de surtos quase periódicos em altas frequências.

Este tipo de sinal pode emergir de excitações de ressonâncias de alta frequência, como por exemplo as forças de inércia cíclicas e impulsivas em máquinas alternativas, ou mancais de rolamento defeituosos. As informações úteis para o diagnóstico da falha usualmente estão contidas na frequência de repetição dos surtos, e não no seu conteúdo de frequência, que são normalmente uma composição de todas as frequências de ressonância excitadas.

A Figura 2.4.2 ilustra um sinal deste tipo no tempo:

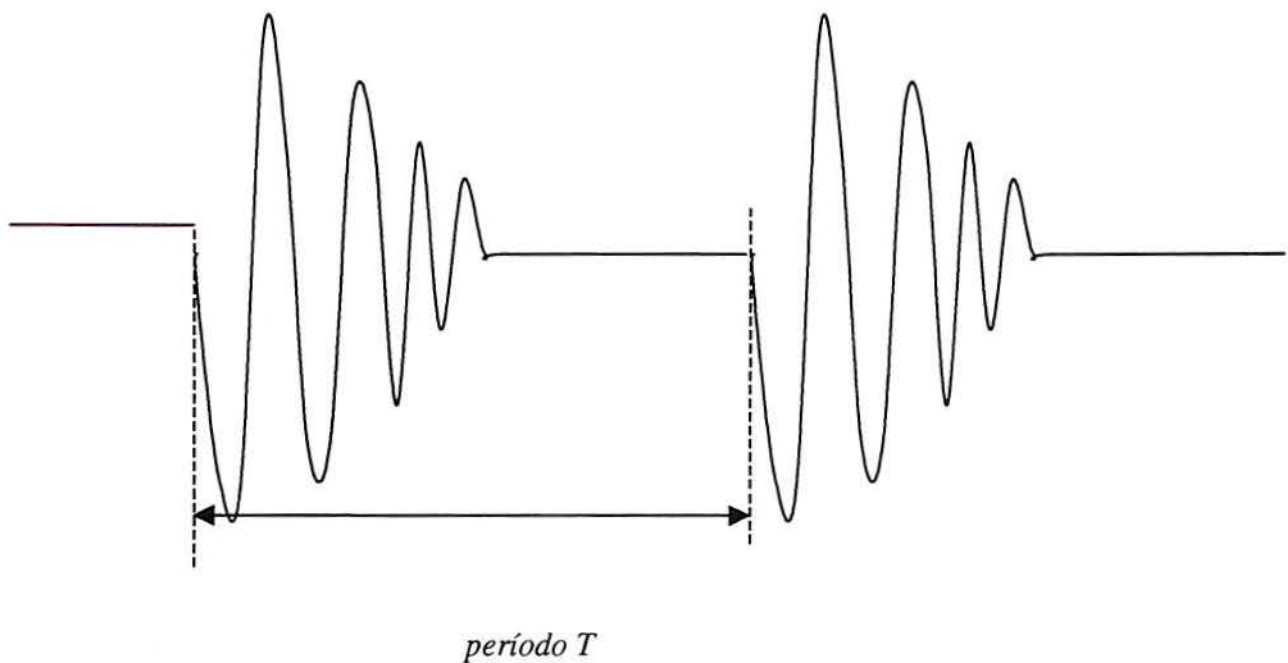


Figura 2.4.2. Sinal modulado em amplitude com surto de uma frequência de ressonância

Abaixo na Figura 2.4.3 está ilustrado o espectro de um pulso representando a resposta em frequência de um sistema de um grau de liberdade. Se os pulsos no tempo forem idênticos e uniformemente espaçados, o espectro dos surtos periódicos seria o representado abaixo, com todas as harmônicas da frequência de repetição $1/T$, com amplitudes maiores na proximidade da frequência de ressonância. A frequência de repetição poderia em princípio ser obtida utilizando-se um "zoom" e medindo a separação harmônica.

Entretanto na prática pequenas variações entre os pulsos e seu espaçamento existem, fazendo com que harmônicas de alta ordem fiquem mais largas, eventualmente se sobrepondo. Por exemplo, uma flutuação de 0,1% na velocidade causaria a sobreposição na frequência de ordem 1000.

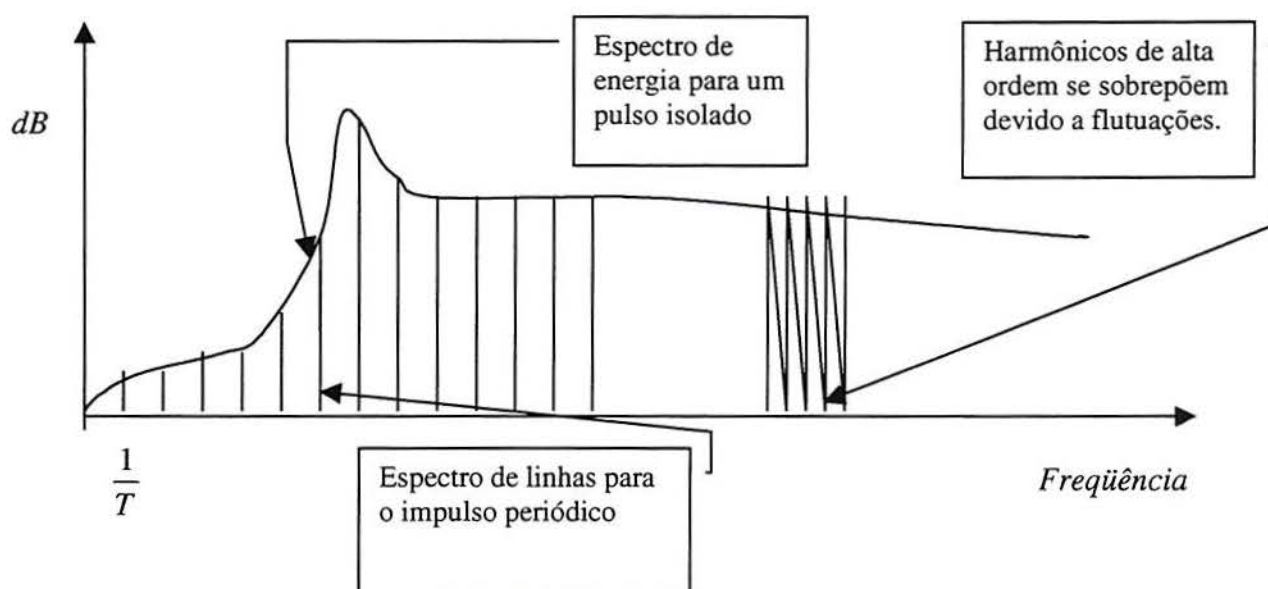


Figura 2.4.3. Espectro de frequência para um caso idealizado com impulsos repetitivos

Se entretanto o envelope do sinal original formado pela demodulação de amplitude daquele sinal no tempo for utilizado, a análise de frequência (Transformada de Fourier) do sinal do envelope revelará a frequência de repetição $1/T$ diretamente. Variações de rotação influenciarão muito levemente a frequência central deste componente.

Sintetizando, a utilização do sinal no tempo demodulado em amplitude através do envelope do sinal obtido pela aplicação da Transformada de Hilbert para obter um sinal analítico torna mais explícita a frequência de repetição, eliminando os componentes de alta frequência oriundos de ressonâncias dos componentes de um mancal de rolamento, por exemplo.

2.5.CÁLCULO DISCRETO DA TRANSFORMADA DE HILBERT

Para calcular $Z(f)$ deve-se notar que

$$\tilde{X}(f) = (-j \operatorname{sgn} f) X(f) \quad (26)$$

Logo, a equação (20) fica:

$$Z(f) = [1 + \operatorname{sgn} f]X(f) = B_1(f)X(f) \quad (27)$$

O diagrama abaixo mostra que

$$B_1(f) = \begin{cases} 2 & \text{para } f > 0 \\ 0 & \text{para } f < 0 \\ 1 & \text{para } f = 0 \end{cases} \quad (28)$$

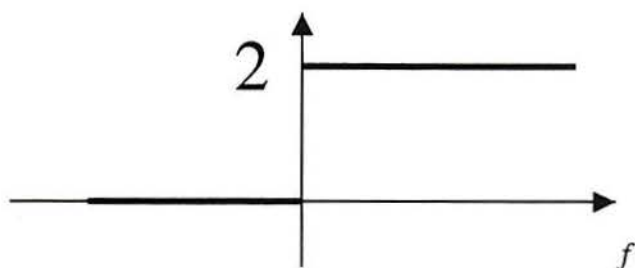


Figura 2.5.1. Diagrama de fase

Existe uma transformação simples para obter $Z(f)$ a partir de $X(f)$. Uma vez calculada $X(f)$ para todas as f deve ser definida $Z(f)$ como $Z(0) = X(0)$ e ainda

$$Z(f) = \begin{cases} 2X(f) & \text{para } f > 0 \\ 0 & \text{para } f < 0 \end{cases} \quad (29)$$

A Transformada de Fourier inversa de $Z(f)$ fornece então $z(t)$ com $\tilde{x}(t) = \operatorname{Im}[z(t)]$.

Esta é a forma recomendada para calcular a Transformada de Hilbert.

Portanto

$$x(t) = \operatorname{Re} \left[2 \int_0^{\infty} X(f) e^{j2\pi ft} df \right] \quad (30)$$

$$\tilde{x}(t) = \operatorname{Im} \left[2 \int_0^{\infty} X(f) e^{j2\pi ft} df \right] \quad (31)$$

Daí resultam as fórmulas digitais para o cálculo computacional da Transformada de Hilbert:

Para $n = 0, 1, 2, \dots, (N-1)$

$$x(n\Delta t) = 2\Delta f \operatorname{Re} \left[\sum_{k=1}^{N/2} X(k\Delta f) \exp \left(j \frac{2\pi kn}{N} \right) \right] + X_0 \Delta f \quad (32)$$

$$\tilde{x}(n\Delta t) = 2\Delta f \operatorname{Im} \left[\sum_{k=1}^{N/2} X(k\Delta f) \exp \left(j \frac{2\pi kn}{N} \right) \right] \quad (33)$$

O fator Δf é definido como

$$\Delta f = (1/N\Delta t) \text{ com } X(k\Delta f) = \Delta t \sum_{n=0}^{N-1} x(n\Delta t) \exp \left(-j \frac{2\pi kn}{N} \right) \quad (34)$$

O fator $X(k\Delta f)$ é necessário apenas para $k = 0$ até $k = (N/2)$, onde ocorrem as frequências de Nyquist, para obter valores digitalizados de $x(n\Delta t)$ e de sua Transformada de Hilbert $\tilde{x}(n\Delta t)$.

O envelope do sinal de $x(t)$ é dado por

$$A(n\Delta t) = [x^2(n\Delta t) + \tilde{x}^2(n\Delta t)]^{1/2} \quad (35)$$

2.6.EXEMPLOS DE CÁLCULO DA TRANSFORMADA DE HILBERT

A Tabela 2.6.1 fornece alguns exemplos de funções, suas Transformadas associadas e o envelope destas funções.

	Função $x(t)$	Transformada $\tilde{x}(t)$	Envelope $A(t)$
1	$\cos 2\pi f ot$	$\text{sen } 2\pi f ot$	1
2	$\text{sen } 2\pi f ot$	$-\cos 2\pi f ot$	1
3	$\frac{\sin t}{t}$	$\frac{1 - \cos t}{t}$	$\left \frac{\sin (t/2)}{(t/2)} \right $
4	$\frac{1}{1 + t^2}$	$\frac{1}{1 + t^2}$	$\left[\frac{1}{1 + t^2} \right]^{1/2}$
5	$e^{-\epsilon t } \cos 2\pi f ot$	$e^{-\epsilon t } \cos 2\pi f ot$	$e^{-\epsilon t }$
6	$u(t) \cos 2\pi f ot^*$	$u(t) \cos 2\pi f ot$	$u(t)$

Tabela 2.6.1. Exemplos de Transformadas de Hilbert

O último resultado (linha 6) indicado com asterisco resulta de um teorema geral de A. Nuttall para qualquer função $u(t)$ onde $U(f) = 0$ para $f < -f_0$.

As seguintes Figura 2.6.1 até Figura 2.6.4 ilustram as funções tabeladas. Estes gráficos foram gerados pela aplicação direta da transformada de Hilbert nas funções primárias e pela composição das partes real e imaginária da transformada para a obtenção da função $A(t)$, também conhecida como "envelope".

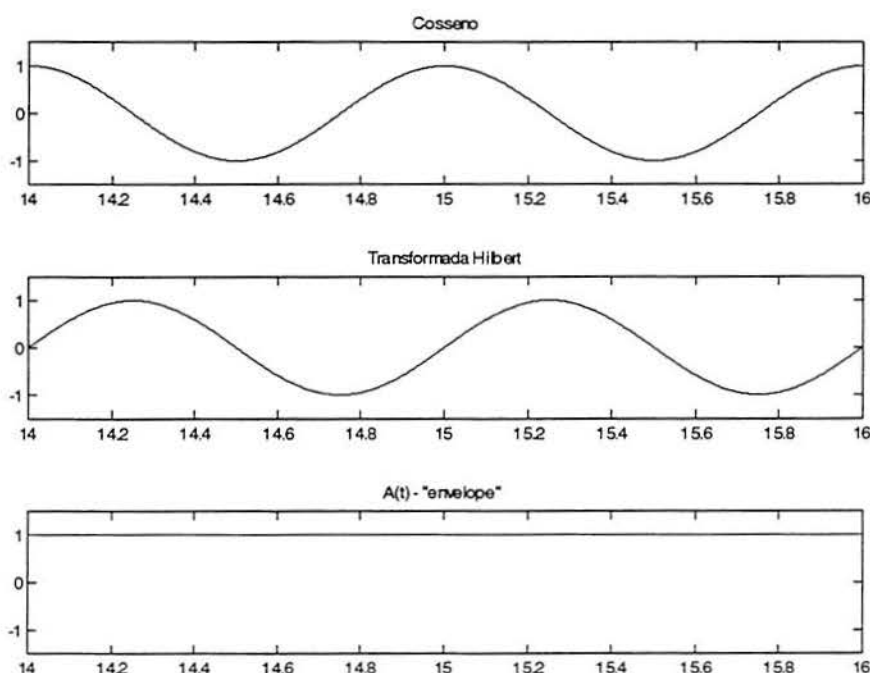


Figura 2.6.1. Transformada e envelope - função 1 - cosseno

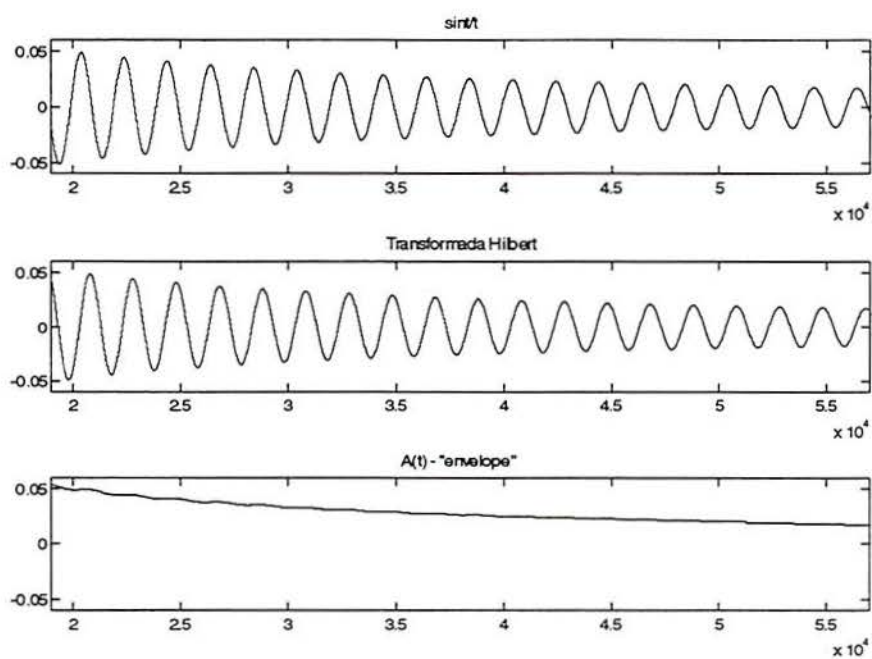


Figura 2.6.2. Transformada e envelope - função 3 - $\text{sen}(t)/t$

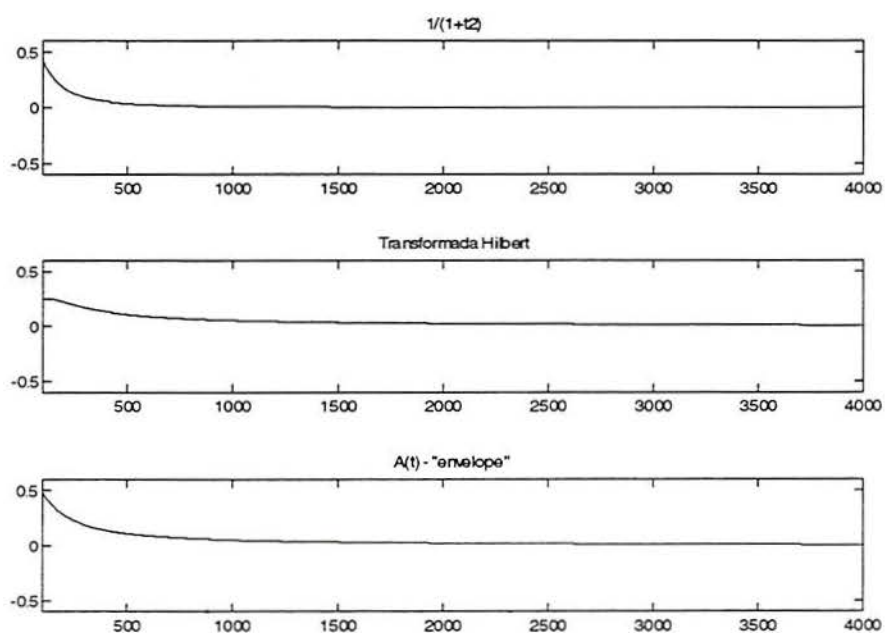


Figura 2.6.3. Transformada e envelope da função 4

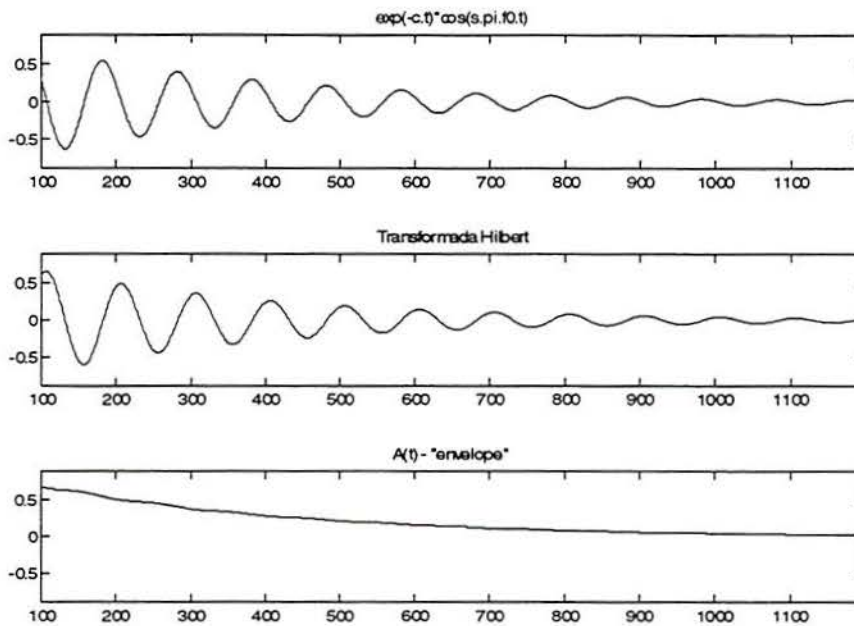


Figura 2.6.4. Transformada e envelope da função 5.

Um exemplo de aplicação prática de avaliação de um rolamento através do espectro de envelope é ilustrada passo a passo nas

Figura 2.6.5, Figura 2.6.6 e Figura 2.6.7. As medidas foram tomadas em uma pequena bancada de testes na JICA (Japanese International Cooperation Agency) pelo autor. O rolamento colocado estava previamente danificado e foram tomadas leituras com analisador de espectro modelo CF-250 da Ono Sokki, que possui integradas as funções de "envelope" do sinal e listagem de rolamentos mais comuns já com suas frequências de vibração associadas.

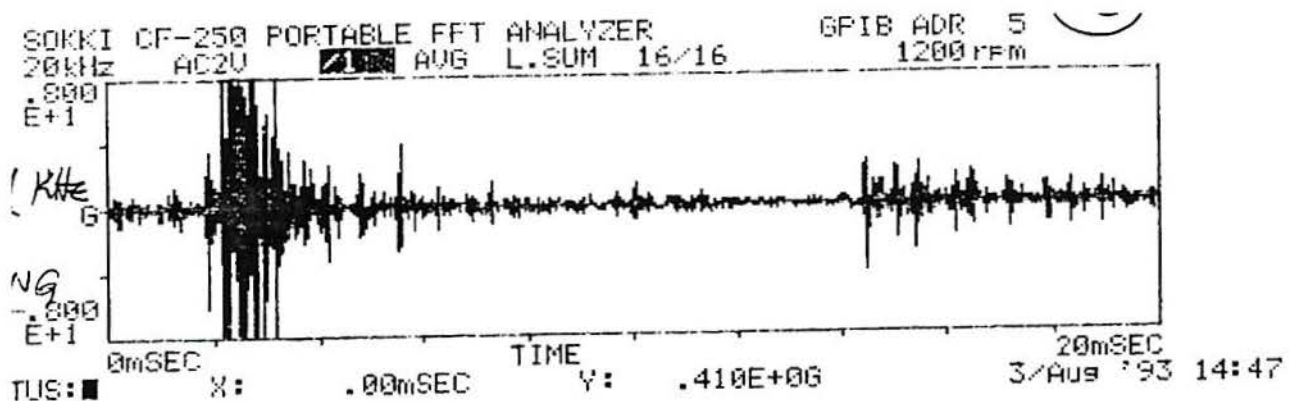


Figura 2.6.5. Formato de onda no tempo com clara indicação de ressonância em alta frequência com amortecimento exponencial superposta a vibração de baixa frequência (amplitude modulada)

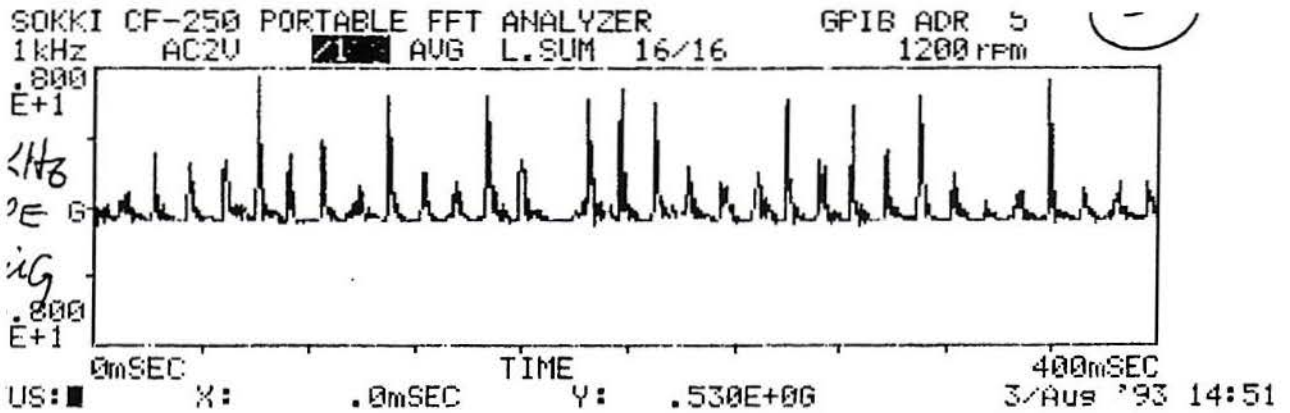


Figura 2.6.6. Onda da figura anterior após a demodulação.

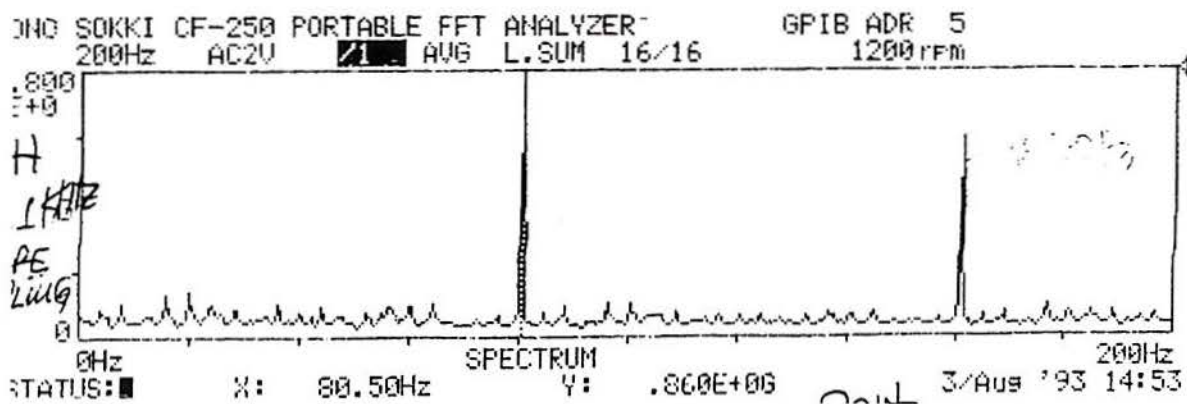


Figura 2.6.7. Espectro da onda demodulada, indicando claramente as frequências relativas ao defeito na pista externa em 80 Hz e um harmônico.

Percebe-se o efeito da demodulação ressaltando os componentes de baixa frequência que são transportados pela ressonância em alta frequência. Sem esta demodulação o espectro do sinal não mostra nenhuma informação útil sobre o rolamento.

3. MANCAIS DE ROLAMENTO

3.1. CARACTERÍSTICAS DAS FALHAS

Ainda que explicar totalmente os mecanismos de falha em mancais de rolamento esteja fora do escopo deste estudo, é importante caracterizar o que são as falhas ou condição anormal destes componentes. Importante também é ilustrar alguns tipos mais comuns de danos.

Danos aos mancais de rolamentos são uma causa comum de interrupção de operação de equipamentos rotativos, fruto não somente da grande quantidade deste tipo de componente, instalado em todo o tipo de máquinas, como também pela relativa dificuldade em detectar o início e a progressão dos mecanismos de falha enquanto em operação.

Isto ocorre em grande parte pela reduzida massa própria dos mancais de rolamentos em relação à massa das carcaças onde se instalam e dos eixos e componentes que estes sustentam e pela complexidade dos fenômenos envolvidos.

As características funcionais destes componentes são: suportar as cargas estáticas e dinâmicas existentes nas partes móveis ou estacionárias nas condições de operação, operar sob rotação e manter as posições relativas entre partes rotativas e estacionárias ou entre várias partes rotativas.

Daí advém que falhas que afetem estas funções básicas tem um potencial de destruição bastante elevado, podendo por exemplo ocasionar o contato indevido entre partes rotativas e estacionárias, o que na maior parte das vezes implica no colapso dos mancais, geralmente se estendendo a vários outros componentes e ao próprio equipamento como um todo. Este colapso libera de forma descontrolada a energia contida no equipamento, o que faz com que as falhas graves em rolamentos sejam catastróficas para o equipamento e para o ambiente onde ele se encontra, tendo riscos associados elevados.

3.2.CAUSAS PRIMÁRIAS DE DANO

Há várias anomalias envolvendo o funcionamento de mancais de rolamento, relacionadas ao ambiente, tipo de cargas aplicadas, regime de operação, etc. Alguns autores fazem levantamentos quantitativos sobre as causas mais comuns de falhas, como ilustrado pela Tabela 3.2.1 [Scheite, 1992]:

Causas	Exemplos	Importância
Desgaste:		51%
	Abrasão	25%
	Fadiga	18%
	Corrosão	8%
Sobrecargas:		49%
	Deformação	14%
	Quebra	12%
	Trincas	12%
	Aquecimento	11%

Tabela 3.2.1. Causas para falhas de mancais de rolamento e suas importâncias relativas.

A seguir serão ilustrados os tipos mais comuns de danos, associados às suas causas [Timken, 1970]:

3.2.1. DANO PELA INCLUSÃO DE MATERIAIS EXTERNOS

É a causa mais comum de danos. Areia, poeira e partículas diversas podem penetrar nos mancais, causando desgaste e a formação de dentados. Dentado significa uma deformação plástica localizada devido à compressão de partículas externas entre as pistas e as esferas (ou elementos girantes - cones, cilindros). Em torno do dentado, micro trincas podem ocorrer e progredir, originando o "descascamento" ("flaking") dos componentes.



Figura 3.2.1. Desgaste por partículas externas

3.2.2. DANO CAUSADO POR CORROSÃO

A corrosão poder ter várias causas básicas. Quando ocorre nas pistas ou esferas, advém o descascamento prematuro. Se ocorrer na gaiola espaçadora ou no topo dos roletes, ocasiona desgaste simples.

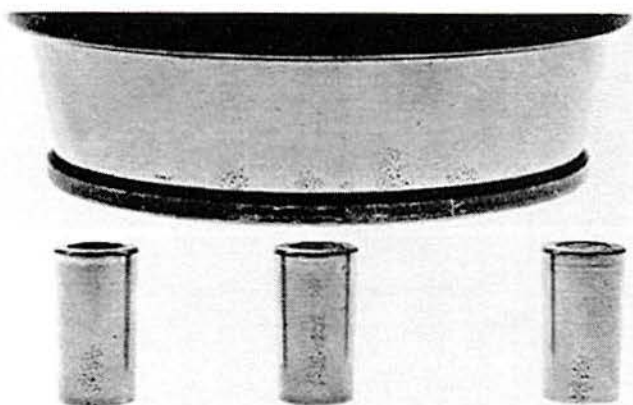


Figura 3.2.2. Dano por corrosão

3.2.3. DANO POR LUBRIFICAÇÃO INSUFICIENTE

Quando o lubrificante é impróprio ou insuficiente, os danos ocorrem em um período de tempo muito curto, especialmente se as condições de uso forem severas (altas temperaturas, rotações e cargas). Os danos conhecidos como "smearing" (série de pequenos danos ou marcas), "galling" (adesão local do material fundido de superfícies termicamente afetadas) ou desgaste generalizado podem ocorrer - (ver Figura 3.2.3).

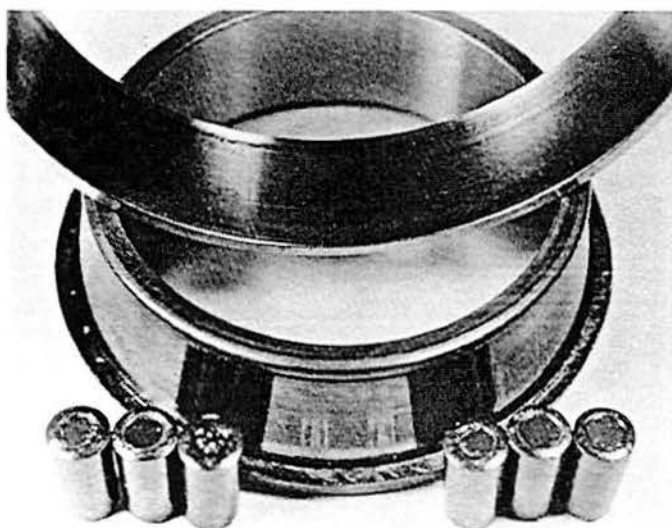


Figura 3.2.3. Dano por lubrificação insuficiente.

3.2.4. DANO POR DESALINHAMENTO DAS PISTAS

Em rolamentos não auto-alinhantes, o descascamento pode ocorrer em curto espaço de tempo se os ajustes ou a montagem do eixo ou carcaça forem deficientes, ou se o eixo estiver empenado ou houver desalinhamento entre eixos de equipamentos acoplados.

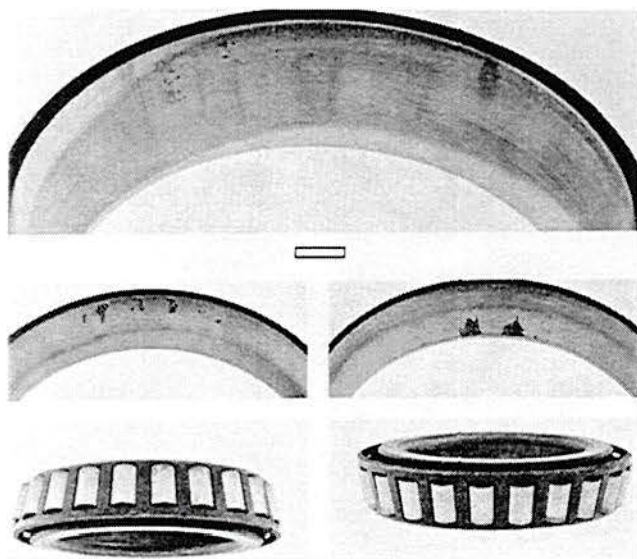


Figura 3.2.4. Dano por desalinhamento das pistas.

3.2.5. DANO POR CARGA ATUANDO NA GAIOLA SEPARADORA

Vibrações excepcionais, impactos ou condições especiais de carga, como por exemplo acelerações e desacelerações súbitas ou reversões de sentido de rotação com altas rotações, podem ocasionar danos severos às gaiolas separadoras.



Figura 3.2.5. Gaiola separadora danificada.

3.2.6. DANO POR CARGA AXIAL ANORMAL

Em geral, os mancais de rolamento são montados com um lado totalmente apoiado (movimento restringido axialmente) e outro livre. Se um mancal projetado para suportar carga axial somente em um sentido sofrer esforços em ambos os sentidos, tensões anormais serão geradas, causando escamação e falha catastrófica.



Figura 3.2.6. Dano por pré-carga axial excessiva.

3.2.7. DANO POR MANUSEIO INDEVIDO

Estocagem incorreta e manuseio inábil podem ocasionar severas falhas nos mancais de rolamento, tais como esfoliação, arranhões e amassamento, que podem evoluir para trincas ou escamação.

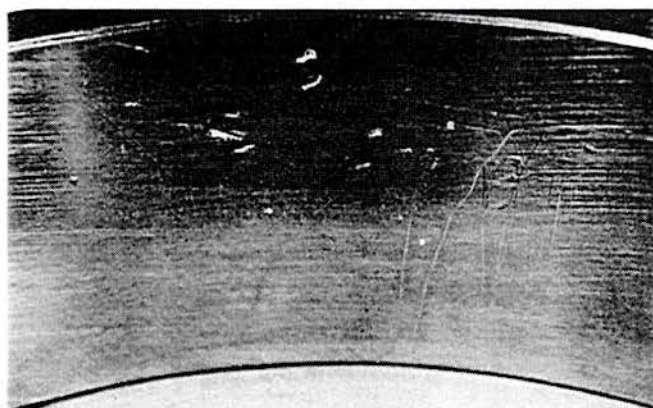


Figura 3.2.7. Danos superficiais por manuseio ou estocagem incorretos.

3.2.8. DANO POR PROCEDIMENTO DE MONTAGEM INCORRETO

O superaquecimento do rolamento quando da montagem com interferência em eixos podem causar a deformação permanente do anel interno. Também pode ocorrer interferência insuficiente e movimento relativo entre pista e eixo em operação. Interferência excessiva pode ocasionar trincas no anel interno.

3.2.9. INFLUÊNCIA DE VIBRAÇÕES SUAVES

Mancais submetidos por longos períodos a vibrações suaves podem sofrer escorregamento entre as pistas e os elementos de rolamento, causando um tipo de desgaste similar ao denteado. Este fenômeno é chamado geralmente de "fretting" e, se progredir com mais intensidade, também é chamado de "false Brinelling" (Figura 3.2.8).

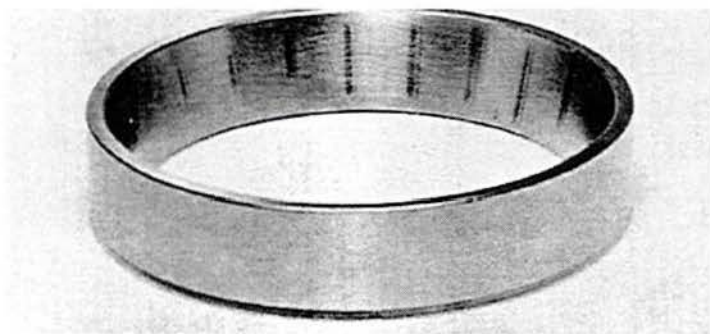


Figura 3.2.8. Falso "brinelling" ou desgaste por vibrações suaves.

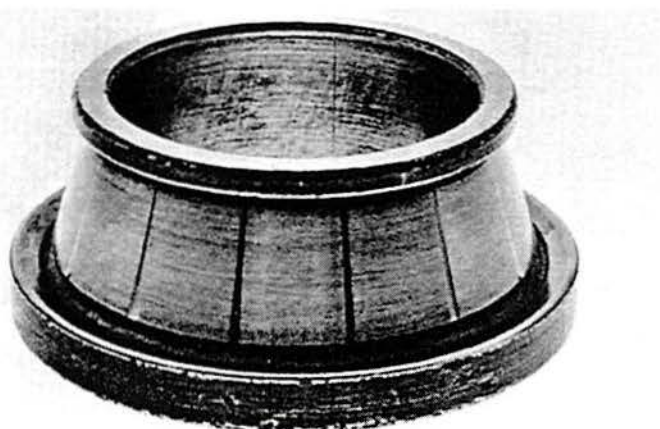


Figura 3.2.9. "Brinelling" ou deformação plástica (encroamento) do material por impacto.

3.2.10. DANO POR PASSAGEM DE CORRENTE

Se corrente elétrica passar através do rolamento, a constante dielétrica da película de óleo pode ser ultrapassada, e um arco elétrico pode se formar entre a pista e os elementos de rolamento, ocasionando arrancamento localizado de material. Este fenômeno também é conhecido por corrosão elétrica, e é geralmente ocasionado por deficiências no aterramento do equipamento e pelo uso de máquinas de solda nas proximidades dos equipamentos rotativos. No caso de roletes, linhas de corrosão podem ser formadas nas pistas (Figura 3.2.10).

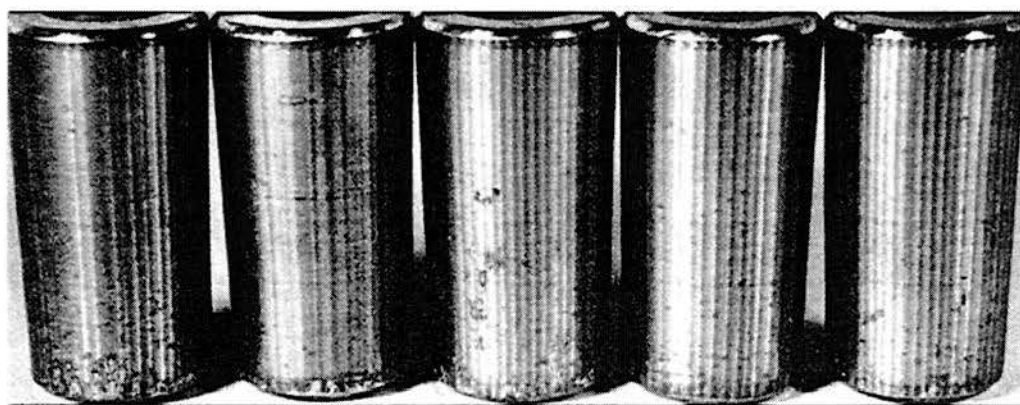


Figura 3.2.10. Dano causado por passagem de corrente elétrica nos roletes.

3.3.MECANISMOS DE GERAÇÃO DE VIBRAÇÃO EM MANCAIS DE ROLAMENTO

Podemos explicitar 4 mecanismos básicos de geração de vibração em mancais de rolamento, a saber:

3.3.1. VIBRAÇÕES CAUSADAS PELA ESTRUTURA FÍSICA DO MANCAL

as deformações do mancal (pistas interna e externa) ocasionadas pelas cargas aplicadas fazem com que o centro de giro não coincida instantaneamente com o centro geométrico, dependendo da posição das esferas em relação ao ponto de aplicação das forças, ocasionando uma vibração relacionada ao número de esferas ao fazerem uma rotação completa ao redor do eixo, ou seja, uma vibração na frequência de $n \cdot f_c$, onde n é o número de esferas ou roletes e f_c é a frequência na qual um ponto na pista externa contata uma esfera ou rolete.

Se o eixo estiver empenado, ou o mancal desalinhado, vibração nas frequências $n \cdot f_c / f_o$ (onde f_o é a frequência de giro do eixo) são geradas. Caso um dos elementos de rolamento seja dimensionalmente diferente dos demais, gerará vibração em ambas as frequências acima, simultaneamente. Todas estas componentes costumam ser menores do que 1 KHz;

3.3.2. VIBRAÇÕES CAUSADAS POR NÃO-LINEARIDADES

Como os mancais tem áreas de contato e se deformam sob cargas, possuem fortes características de sistemas massa-mola. Quando a lubrificação é insuficiente, este sistema massa-mola adquire características não lineares mais pronunciadas na direção axial (em mancais de rolamento não-autoalinhantes), gerando harmônicos e sub-harmônicos das frequências de rotação do eixo;

3.3.3. VIBRAÇÃO CAUSADA POR ONDULAÇÕES NAS SUPERFÍCIES DE CONTATO

Originado por defeito de fabricação, pode causar padrões de vibração bastante peculiares, para algumas configurações de ondulações. Este defeito pode causar ruído característico ("chattering") e pode causar instabilidade ("whirling") do eixo. Estes efeitos são alterados quando, por exemplo, se aplica carga radial em rolamentos com folgas radiais maiores do que o normal (série C3, por exemplo);

3.3.4. VIBRAÇÕES CAUSADAS POR DANOS NOS MANCAIS

ver acima descrição dos mecanismos de danos em mancais de rolamento. Neste caso, impactos são gerados, podendo excitar de modo transiente frequências naturais e seus harmônicos. A excitação de frequências naturais da pista externa (normalmente sendo a mais predominante), pista interna, dos elementos de rolamento ou da gaiola. geram valores de frequência que podem ser calculados com fórmulas conhecidas e que são influenciados pelas condições de ajuste de montagem. Em geral estes valores estão na casa de alguns kHz até várias dezenas de kHz. A análise deve contemplar não as frequências em si, mas os períodos de suas gerações comparadas com a frequências de giro do eixo, roletes sobre si mesmos e sobre o eixo. Neste aspecto, a técnica de envelope do sinal favorece a interpretação dos sintomas;

3.4. ANÁLISE DE FREQUÊNCIAS

A utilização da transformada de Fourier para a interpretação direta do comportamento de mancais de rolamento não é simples, uma vez que os defeitos em pistas e elementos girantes ocasionam impactos localizados à medida que as esferas rolam sobre os danos nas pistas ou gaiolas separadoras. Estes impactos são transientes e podem excitar as frequências naturais dos mancais. A estes efeitos podem se somar, no espectro de frequências, outras causas de vibração, em especial àquelas causadas por fluxo (em ventiladores, compressores, bombas, etc). Alguns destes fenômenos se caracterizam por gerar espectros em frequência não-harmônicos, que são de difícil interpretação.

Para contornar esta dificuldade, pode ser utilizada a técnica de envelope, onde após o uso de um filtro passa-baixa ou passa-banda no sinal no domínio tempo, eliminam-se as componentes do espectro em frequências altas geradas pelos transientes, obtendo-se um sinal que envolve os picos do sinal original. Nesta onda resultante, aplica-se a transformada de Fourier. O espectro resultante fica "limpo" dos sinais quase-periódicos, permitindo a visualização da causa básica do impacto, separadamente das conseqüências deste impacto.

Existem relações matemáticas que prevêm as frequências de vibração esperadas para cada tipo de defeito ou não-conformidade dos mancais de rolamento. Estas relações advêm de considerações geométricas e dinâmicas deduzidas a partir das características construtivas e de operação deste tipo de mancais. Como exemplo, são apresentados alguns valores típicos de frequências naturais calculados para um rolamento de uso comum, na Tabela 3.4.1 [McFadden,1983]. A Tabela 3.4.2 sintetiza algumas das principais frequências características para rolamentos e suas causas. Apresenta-se as equações que permitem calcular as frequências citadas na Tabela 3.4.2 e Figura 3.4.1 de um mancal de rolamento de esferas e de um mancal de rolos cônicos, com as indicações dos parâmetros geométricos necessários para os cálculos.

TIPO DE VIBRAÇÃO	ORDEM DE FREQUÊNCIA (KHZ)				
	1°	2°	3°	4°	5°
Somente direção radial	5,6	34,8	49,3	44,7	80,0
Direção Torsional	1,1	24,7	35,0	45,9	56,7
Somente Flexão		1,4	3,9	7,6	12,3
Somente Esferas	1,7				

Tabela 3.4.1. Frequências naturais calculadas para rolamento 6310 radial de esferas

TIPO DE DEFEITO	CARACTERÍSTICA ESPECIAL	FREQÜÊNCIAS	COMENTÁRIOS
1. Pequeno defeito na pista interna	Rolamento com folga radial normal	$n.z.f_i/f_o$ $n.z.f_i/f_c$	Frequências naturais e seus harmônicos são gerados
	Rolamento com folga radial menor, estando as esferas e a pista interna sempre com o mesmo contato	$n.z.f_i$	Frequências naturais e seus harmônicos são gerados
2. Desgaste generalizado (excentricidade) na pista interna	-.x.-	$n.f_o$	Frequências naturais e seus harmônicos são gerados
3. Pequeno defeito na pista externa	-.x.-	$n.z.f_c$	Frequências naturais e seus harmônicos são gerados
4. Pequeno defeito em uma esfera	Rolamento com folga radial normal	$2.n.f_b/f_c$	Frequências naturais e seus harmônicos são gerados
	Rolamento com folga radial menor, estando as esferas e a pista interna sempre com o mesmo contato	$2.n.f_b$	Frequências naturais e seus harmônicos são gerados
5. Vibração causada pela estrutura do mancal (baixa frequência)	Eixo empenado ou mancal desalinhado (oblíquo)	$f_c/2.f_c$	Geram-se estas frequências
	Esferas ou roletes irregulares no diâmetro	f_c $n.f_c/f_o$	Geram-se estas frequências
6. Vibrações causadas pelas não-linearidades dos mancais (baixas frequências, especialmente para rolamentos de esferas)	a. Não coincidência de dois mancais na mesma linha de centro b. Defeito na superfície da caixa de mancais ou inclusão de material estranho c. Mancal com baixa fixação na caixa de mancais d. Montagem defeituosa do mancal	$f_o/2$	A ressonância se torna um problema A velocidade varia discretamente devido a não-linearidade Esta condição gera as frequências dadas à esquerda Se ocorrendo em um rolamento de esferas
	a. Não-circularidade da superfície interna da pista interna b. Não-circularidade de munhão c. Defeito na superfície do munhão ou inclusão de material estranho	f_o	Esta condição gera as frequências dadas à esquerda Se ocorrendo em um rolamento de esferas
7. Vibração causada por ondulações das superfícies de contato	Ondulação na pista interna	$f_o/n.z.f_i$	Frequências geradas quando o número de cristas da ondulação é n.z
	Ondulação na pista externa	$n.z.f_c$	Frequências geradas quando o número de cristas da ondulação é n.z
	Ondulação na esfera ou rolete	$2.n.f_b/f_c$	Frequências geradas quando o número de cristas da ondulação é 2.n

Tabela 3.4.2. Principais causas e sintomas de danos em mancais de rolamento.

A prática mostra que nem sempre o espectro de Fourier permite identificar facilmente as frequências calculadas, e as amplitudes globais causadas por defeitos nos rolamentos são normalmente muito baixas, de difícil detecção. Não são de todo raros casos em que equipamentos, apesar de estarem submetidos a leituras periódicas de vibração global, sofrem falhas catastróficas causadas por destruição total do rolamento, em especial em motores elétricos. Alterações nos espectros somente são significativas quando o dano já está em estado avançado.

Uma verificação feita neste trabalho é a de que a aplicação da técnica de envelope pode facilitar o diagnóstico. Isto ocorre ainda que se verifique pela Tabela 3.4.1 que as frequências naturais são bastante altas e conseqüentemente difíceis de detectar por suas baixas amplitudes relativas.

As frequências citadas na tabela Tabela 3.4.2 são calculadas do seguinte modo (ver também Figura 3.4.1):

$$f_i = 1/2 \cdot f_o \cdot z \cdot [1 + (d/D) \cdot \cos a] \quad (36)$$

$$f_c = 1/2 \cdot f_o \cdot z \cdot [1 - (d/D) \cdot \cos a] \quad (37)$$

$$f_b = f_o \cdot (D/d) \cdot [1 - (d/D \cdot \cos a)^2] \quad (38)$$

$$f_g = 1/2 \cdot f_o \cdot [1 - (d/D) \cdot \cos a] \quad (39)$$

onde:

f_i é a frequência na qual um ponto da pista interna contata uma esfera ou rolete;

f_c é a frequência na qual um ponto da pista externa contata uma esfera ou rolete;

f_b é a frequência na qual um ponto da esfera ou rolete contata as pistas interna ou externa;

f_o é a frequência de giro do eixo (pista interna);

f_g é a frequência esperada para defeitos na gaiola separadora;

d é o diâmetro da esfera ou rolete (dAD normalmente é 1A4 para rolamentos radiais de esfera);

D é o diâmetro entre as linhas de centro das esferas ou roletes;

α é o ângulo de contato entre as esferas (roletes) e as pistas (usualmente 0° para rolamentos radiais de esfera ou 90° para rolamentos axiais de esfera);

n é a ordem dos modos de vibração;

z é o número de esferas ou roletes;

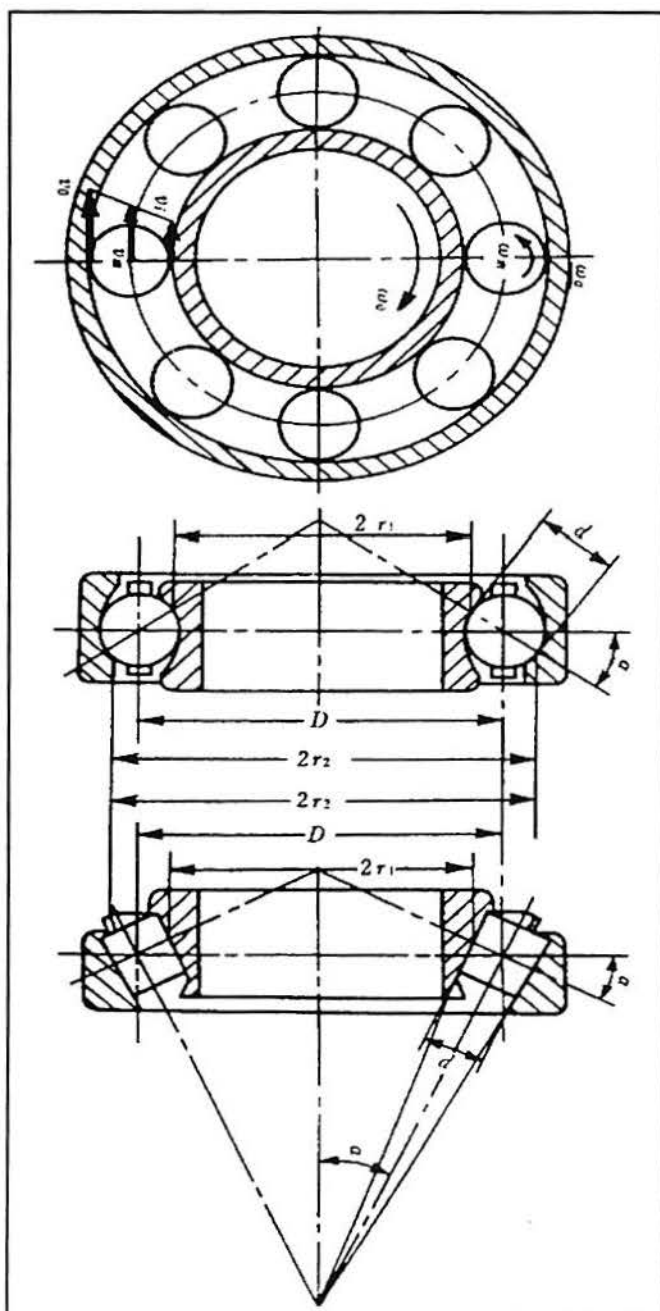


Figura 3.4.1. Mancal de rolamento de esferas e de rolos cônicos

Nas Figura 3.4.2 e na Figura 3.4.3 estão exemplos de danos severos em mancais de rolamento. A primeira foto está mostrando o descascamento da pista interna e a respectiva metalografia da seção do corte transversal da pista. Na metalografia fica evidenciada a progressão subsuperficial das trincas.

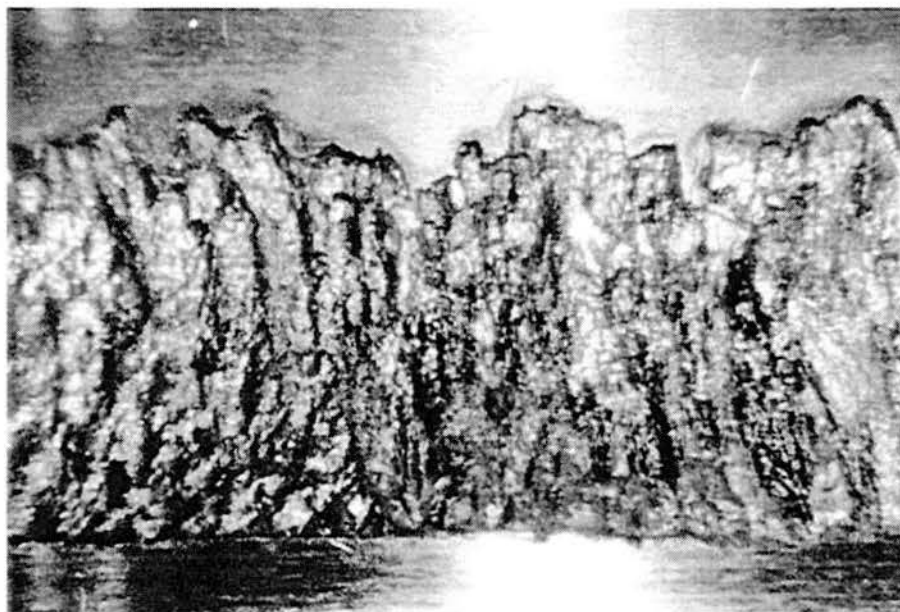


Figura 3.4.2. 34B01 - Exemplo de uma falha severa em um mancal de rolamento



Figura 3.4.3. 34B01 - seção transversal da pista interna, com trincas em desenvolvimento.

As Figura 3.4.4 e

Figura 3.4.5 mostram um rolamento SKF6316 novo retirado de estoque para análise, para servir de referência do aspecto de uma pista íntegra sob um aumento de 100 X e 500 X. Estas imagens podem ser coparadas com as imagens das pistas dos rolamentos que sofreram diagnóstico de falhas no capítulo 4.



Figura 3.4.4. Rolamento SKF 6316 C3 novo sob MEV – 100 X.



Figura 3.4.5. Rolamento SKF 6316 C3 novo sob MEV - 500 X.

A foto Figura 3.4.6 ilustra um rolamento que sofreu um descascamento localizado por encroamento ("brinelling") da superfície sob os roletes devido a impacto no transporte. As áreas endurecidas sob os roletes atuam como cunhas, iniciando um processo de fadiga e trincas que progridem e eventualmente arrancam o material. Um fato que confirma o diagnóstico é que o tamanho do defeito é igual exatamente à distância entre dois roletes sucessivos.

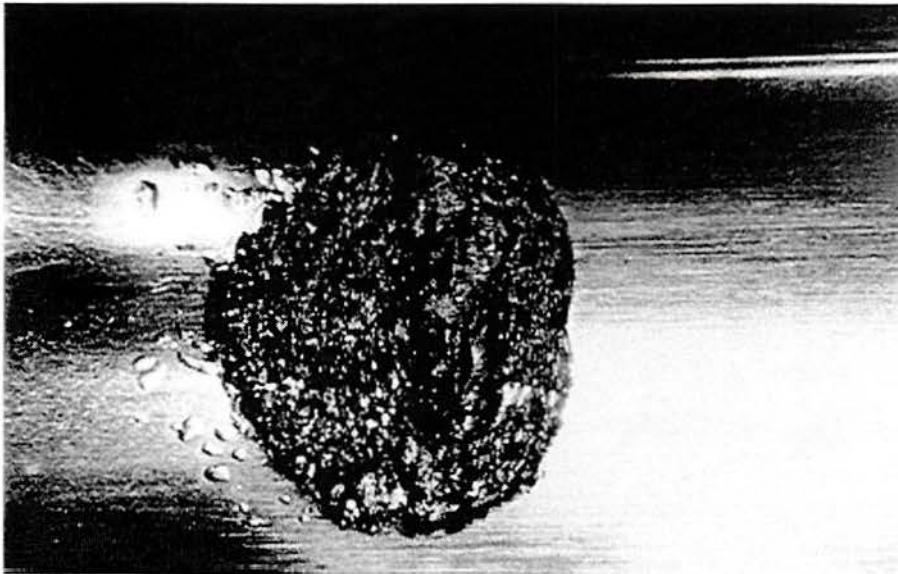


Figura 3.4.6. Descascamento em rolamento devido a fadiga - 10 X.



Figura 3.4.7. Metalografia da pista do mesmo mancal acima mostrando o início da trinca - 200 X.

4. ESTUDO DE CASOS

4.1.BOMBA 13B01B

Equipamento: bomba centrífuga horizontal simples estágio em balanço de etileno acionada por motor elétrico, potência do acionador de 15 kW, 3550 RPM, energia ("head") diferencial 111 metros e temperatura de operação -96 C, com leituras de Setembro de 1999 (diagnóstico de falha) e Novembro de 1999 (após intervenção).

Mancal de rolamento LA: SKF3309;

Coefficientes de frequência de danos para o mancal LA:

gaiola: 0,41 (ou seja, $0,41 \times 3550 = 1.446$ RPM) ;

esfera: 2,2 (7.810 RPM);

esfera contra pista externa: 4,9 (17.395 RPM);

esfera contra pista interna: 7,1 (25.205 RPM);

Mancal de rolamento LOA: FAG6210;

Coefficientes de frequência de danos para o mancal LA:

gaiola: 0,41 (1.446 RPM);

esfera: 2,6 (9.230 RPM);

esfera contra pista externa: 4,1 (14.555 RPM);

esfera contra pista interna: 5,9 (20.945 RPM);

A bomba apresentava vibração global elevada de 11mm/s RMS. O espectro do envelope indicava elevação no nível de carpete e picos isolados de amplitude 2 g em cerca de 15.000 RPM. O espectro de Fourier em banda de percentagem constante CPB6% apresentava elevação dos níveis de aceleração com pico máximo em cerca de 219.000 RPM e pico secundário em cerca de 60.000 RPM (4.000 Hz e 1.000 Hz), com amplitudes de até 5 g. A bomba apresentava também ruído elevado no mancal quando em operação (ver detalhes nas figuras seguintes – detalhes nas legendas). Foram substituídos somente os rolamentos da bomba.

O rolamento da bomba apresentava severos danos como registrado na seqüência de fotos que seguem os gráficos relativos à vibração.

Após a troca do rolamento os valores globais de vibração caíram para menos de 1 mm/s. O espectro CPB6% caiu para um pico máximo de 0,25 g 219.000 RPM. Provavelmente estas frequências mais definidas no espectro CPB6% representam frequências naturais do mancal, excitadas em operação, devido aos seus altos valores e a definição (isolamento) do pico em termos de frequência. O motor desta bomba apresentou os mesmos tipos de modificação nos espectros que a bomba apresentou após a troca dos mancais da bomba, porém com amplitudes e taxas de alteração menores (ver Apêndice II). Isto leva a conclusão de que os rolamentos do motor estavam em boas condições e que as alterações nas leituras de vibração eram causadas unicamente por transmissão da vibração da bomba para o motor.

Esta conclusão entretanto somente pode ser consolidada após a intervenção na bomba (como no caso) ou com o desacoplamento do motor e bomba e tomando-se uma leitura isolada somente do motor. É importante observar que pela geometria do rolamento, era esperado encontrar defeitos nas pistas externas dos rolamentos das bombas (frequências calculadas de 15.000 e 17.000 RPM aproximadamente) e externos (25.000 e 21.000 RPM), pois os espectros "es" indicavam picos dominantes na vizinhança de 15.000 RPM e 25.000 RPM.

A escala horizontal do gráfico não favorece a precisão de leitura das frequências nesta faixa, porém ainda permite clara correlação com as frequências teóricas calculadas. As configurações utilizadas na coleta de dados estão no Anexo III.

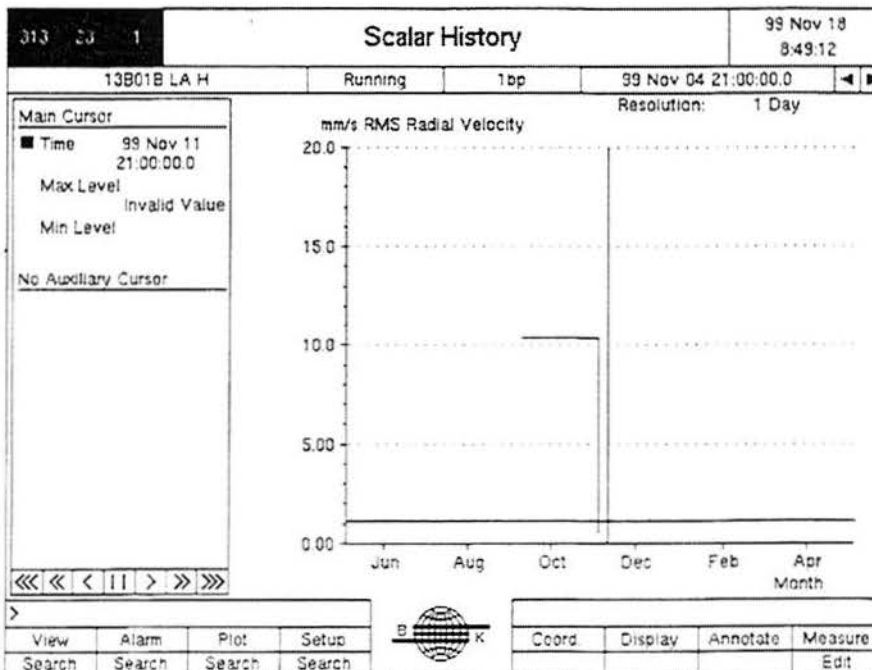


Figura 4.1.1. Valor global de vibração na bomba 13B01B LA, variando de 11 mm/s a 1 mm/s.

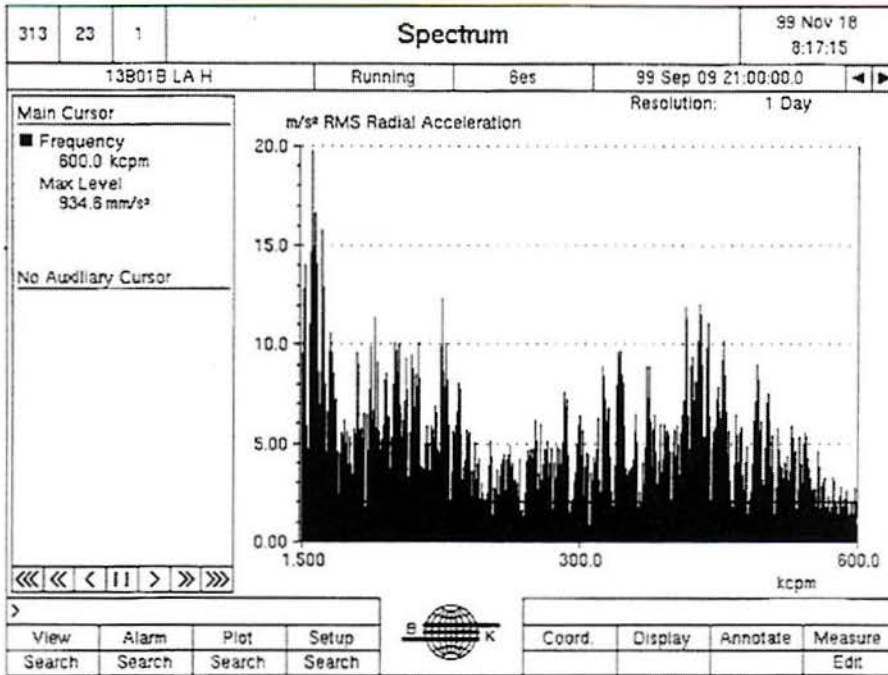


Figura 4.1.2. Espectro de envelope mostrando pico de 17 m/s² em 15.000 RPM – Setembro de 1999.

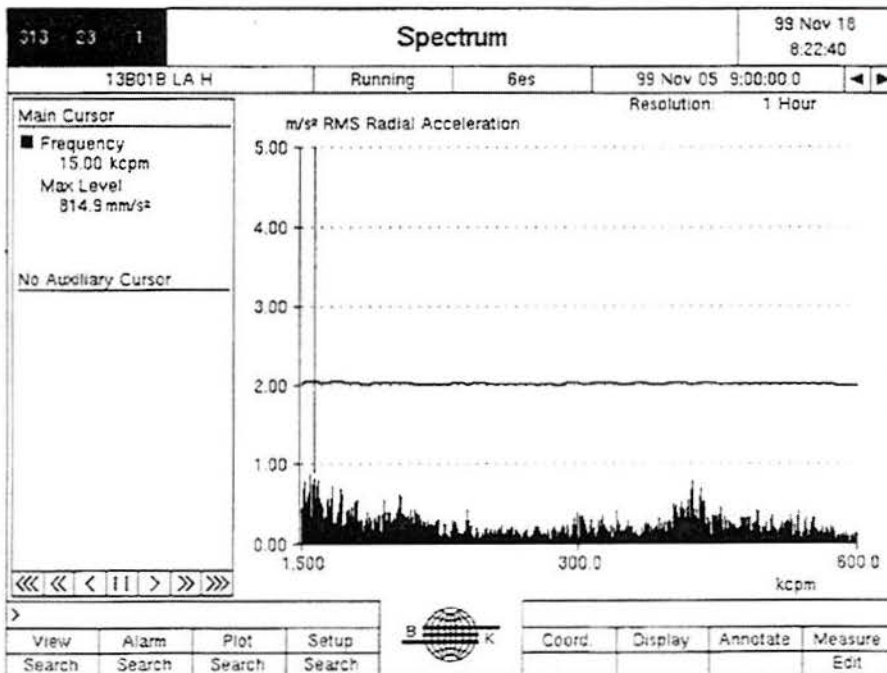


Figura 4.1.3. Espectro de envelope após troca do rolamento, em Novembro de 1999, com pico predominante de 0.8 m/s²

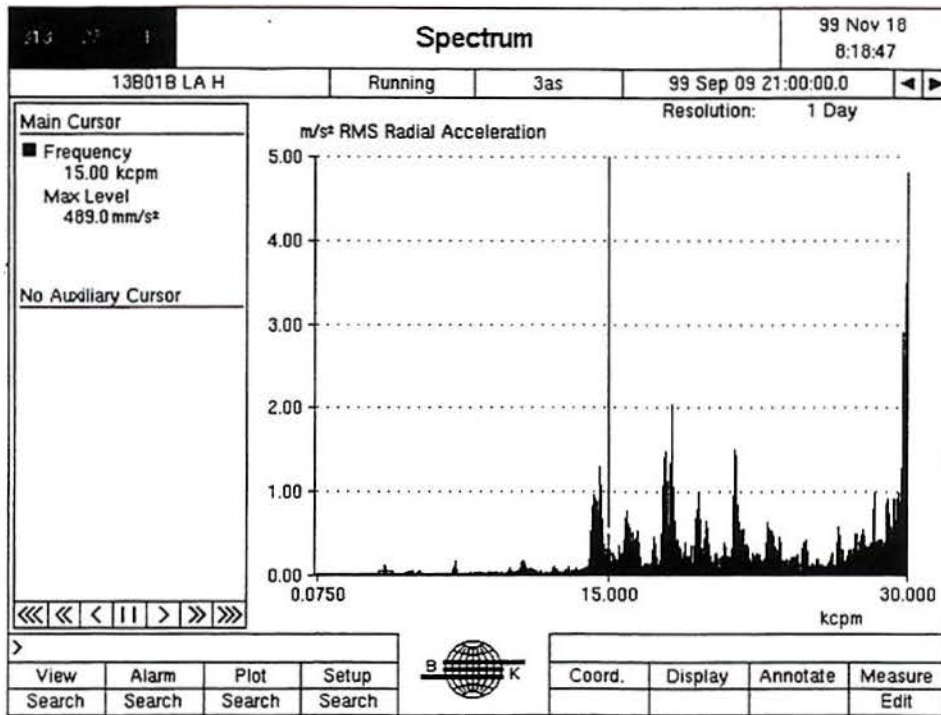


Figura 4.1.4. Autoespectro antes da intervenção mostrando pequena alteração em 15.000 RPM (cerca de 1 m/s²)

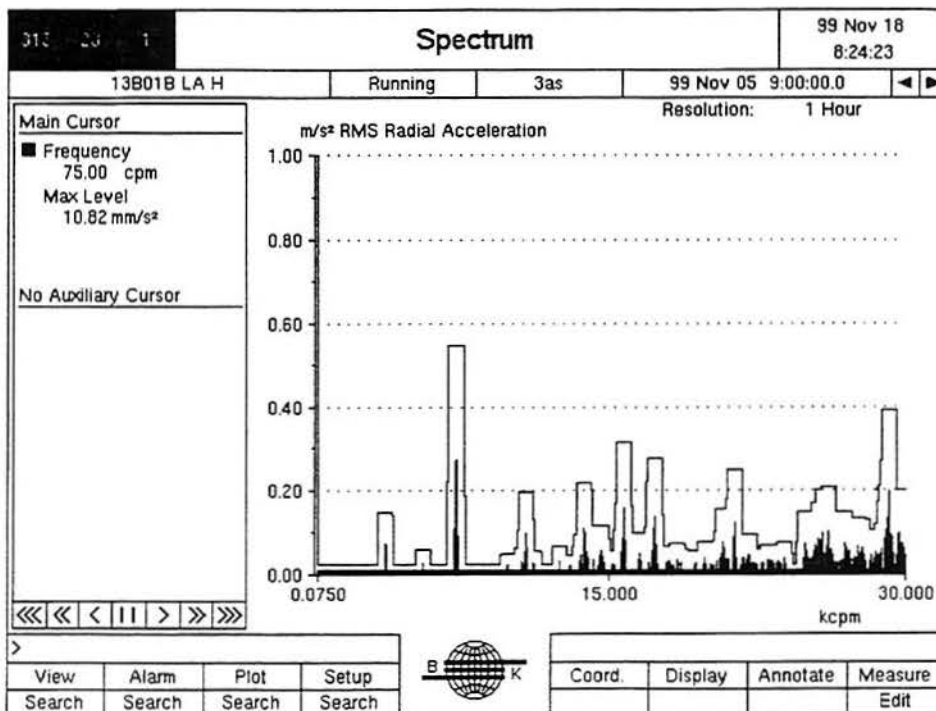


Figura 4.1.5. Autoespectro após intervenção mostrando redução dos picos para a faixa de 0,25 m/s².

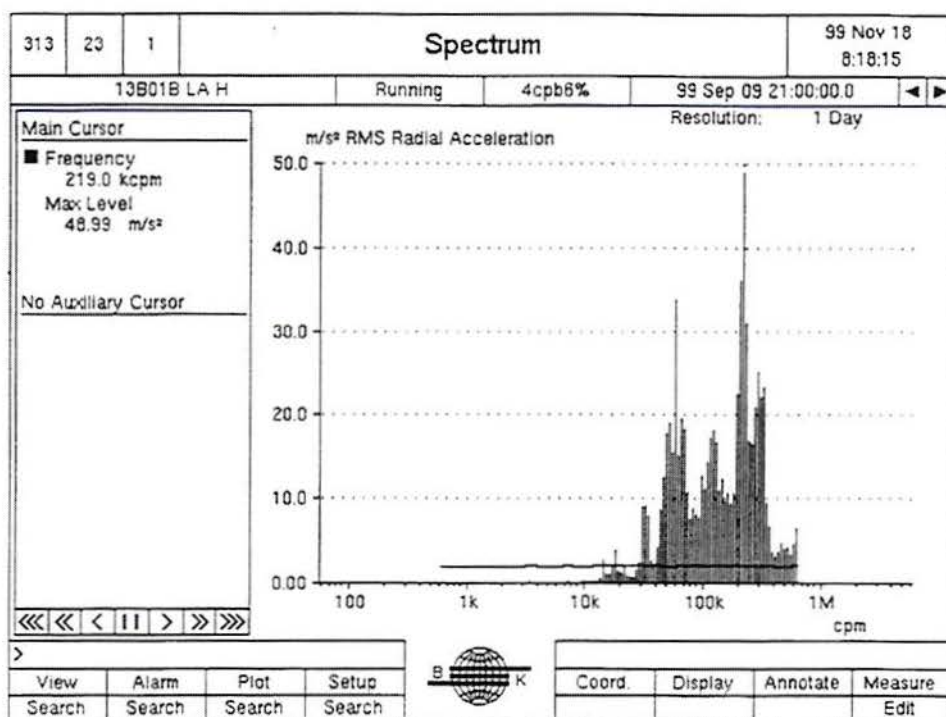


Figura 4.1.6. Picos pronunciados em alta frequência (219.000 RPM com 49 m/s² e 60.000 RPM com 35 m/s²) antes da intervenção.

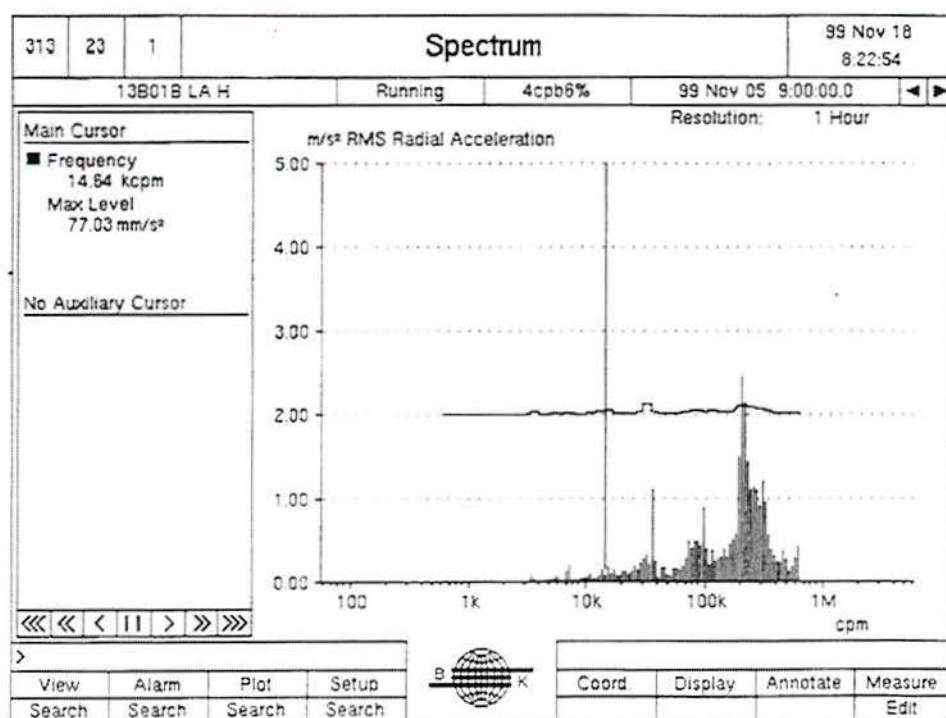


Figura 4.1.7. Redução da amplitude para 2.5 m/s² em 219.000 RPM após intervenção. A linha vertical é o cursor (em 14.640 RPM) e a linha horizontal é o limite de alarme (2 m/s²).



Figura 4.1.8. 13B01B pista externa, lado oposto ao acoplamento (LOA).



Figura 4.1.9. 13B01B - outro detalhe da pista externa (LOA)

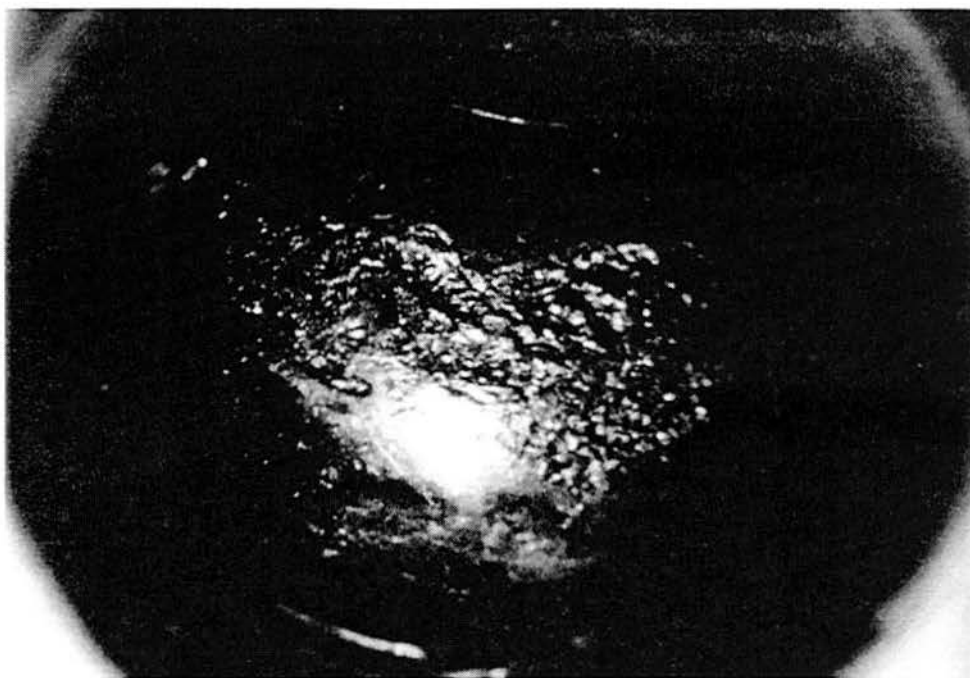


Figura 4.1.10. 13B01B - Detalhe da esfera LOA



Figura 4.1.11. 13B01B - Outro detalhe da esfera LOA.

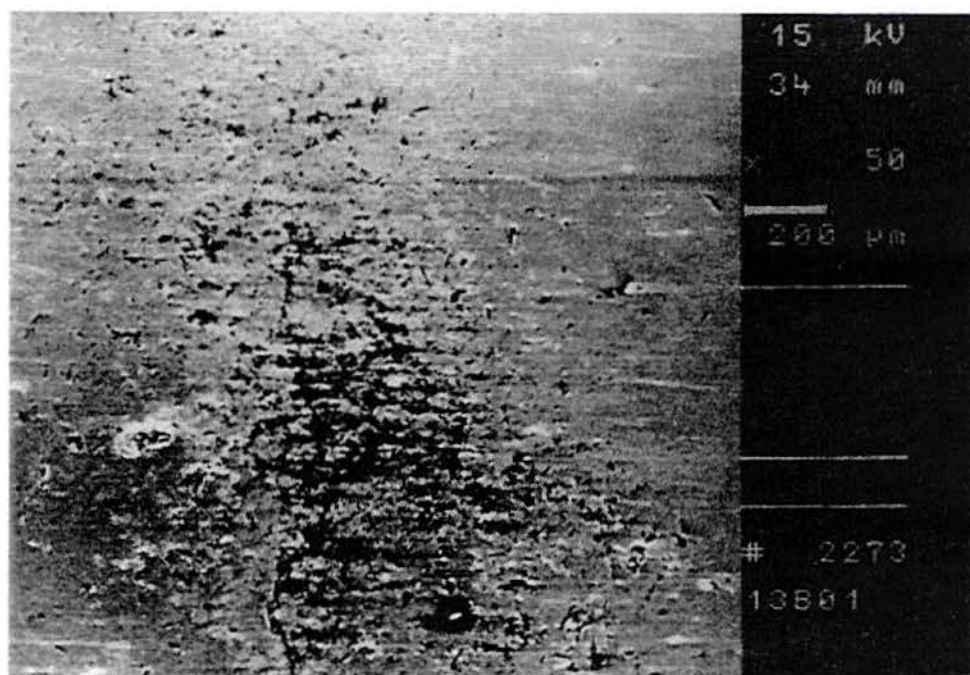


Figura 4.1.12. 13B01B – pista interna, foto no MEV – detalhe 50 X, mostrando zona de início da degradação superficial.

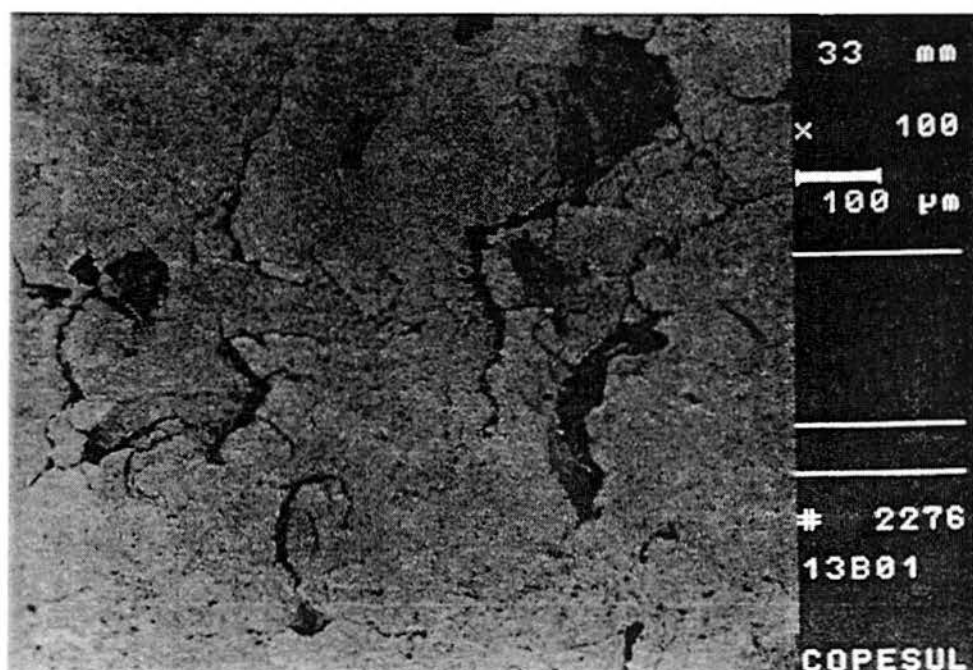


Figura 4.1.13. 13B01B – pista interna, foto no MEV. Detalhe 100 X, mostrando a esfoliação da pista.

4.2.BOMBA E MOTOR 03B03B

Bomba centrífuga horizontal de hidrocarboneto com dupla voluta acionada por motor elétrico, simples rotor em balanço, 150 HP e 3550 RPM, com leituras em Agosto e Novembro de 1999.

Mancal de rolamento motor 03MB03B LA e LOA: SKF6316 C3;

Coefficientes de frequência de danos para os mancais do motor:

gaiola: 0,39 (1.385 RPM) ;

esfera: 2,1 (7.455 RPM);

esfera contra pista externa: 3,1 (11.005 RPM);

esfera contra pista interna: 4,9 (17.395 RPM);

Mancal de rolamento da bomba 03B03B LA (2 x): SKF7312 BECBM;

Coefficientes de frequência de danos para o mancal LA:

gaiola: 0,41 (1.446 RPM);

esfera: 2,1 (7.455 RPM);

esfera contra pista externa: 4,9 (17.395 RPM);

esfera contra pista interna: 7,1 (25.205 RPM);

Mancal de rolamento da bomba 03B03B LOA: FAG6212 NWG;

Coefficientes de frequência de danos para o mancal LOA:

gaiola: 0,41 (1.446 RPM);

esfera: 2,6 (9.230 RPM);

esfera contra pista externa: 4,1 (14.555 RPM);

esfera contra pista interna: 5,9 (20.945 RPM);

O motor apresentava vibração global estável de 1,2 mm/s RMS e a bomba de cerca de 3 mm/s RMS. Foi reportado aquecimento excessivo dos mancais da bomba (mais de 100 C externamente). O envelope até 600.000 RPM da bomba indicava alterações significativas (6 m/s² em 3.000 RPM) enquanto o espectro es dos mancais do motor indicava picos de até 1 g em 12.000 RPM e 33.000 RPM. A inspeção dos mancais indicou danos severos nos mancais do motor e pequenos indicativos de desenvolvimento de danos nos mancais da bomba, em suas fases iniciais. (ver seqüência de fotos), confirmando o diagnóstico sugerido pela análise de vibração.

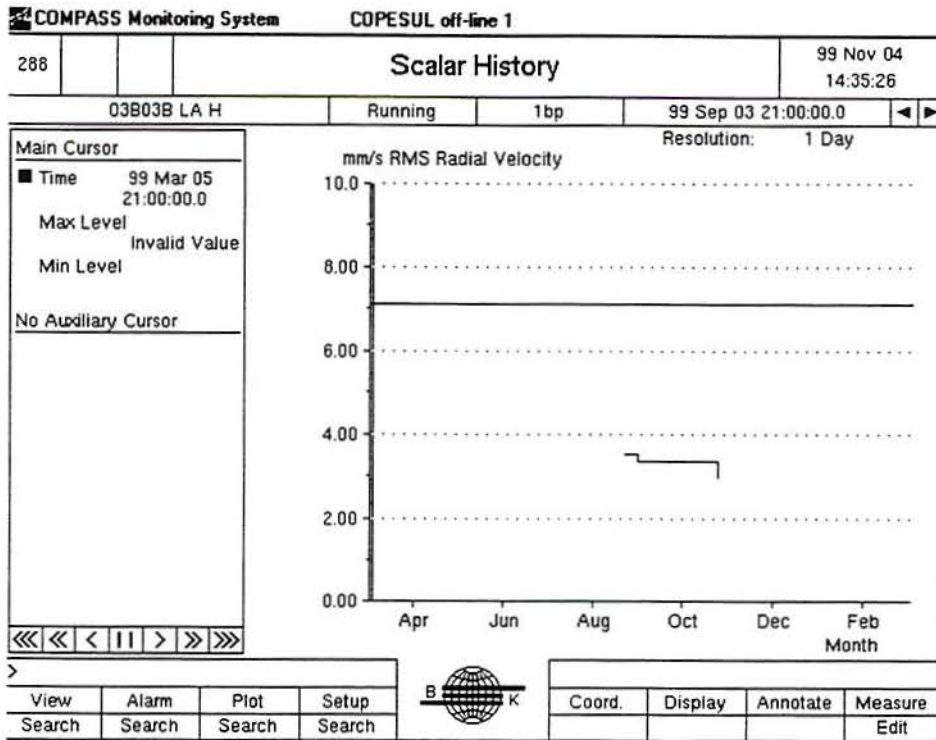


Figura 4.2.1. 03B03B LA H – Tendência do valor global, estável entre 3,5 e 3,0 mm/s RMS.

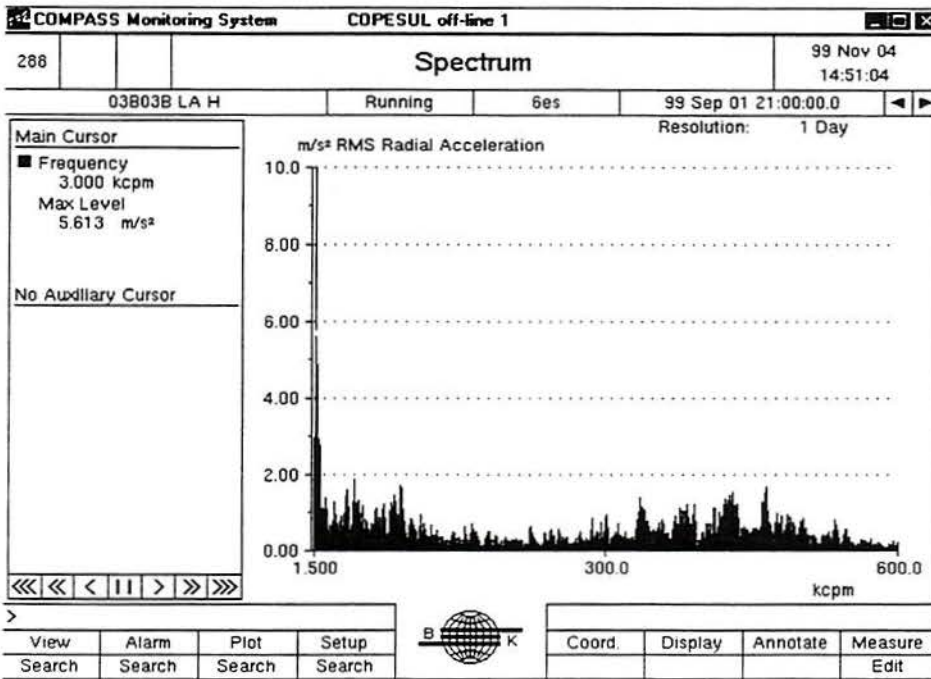


Figura 4.2.2. Espectro de envelope antes da intervenção no equipamento, indicando pico predominante em 3.000 RPM com 5,6 m/s².

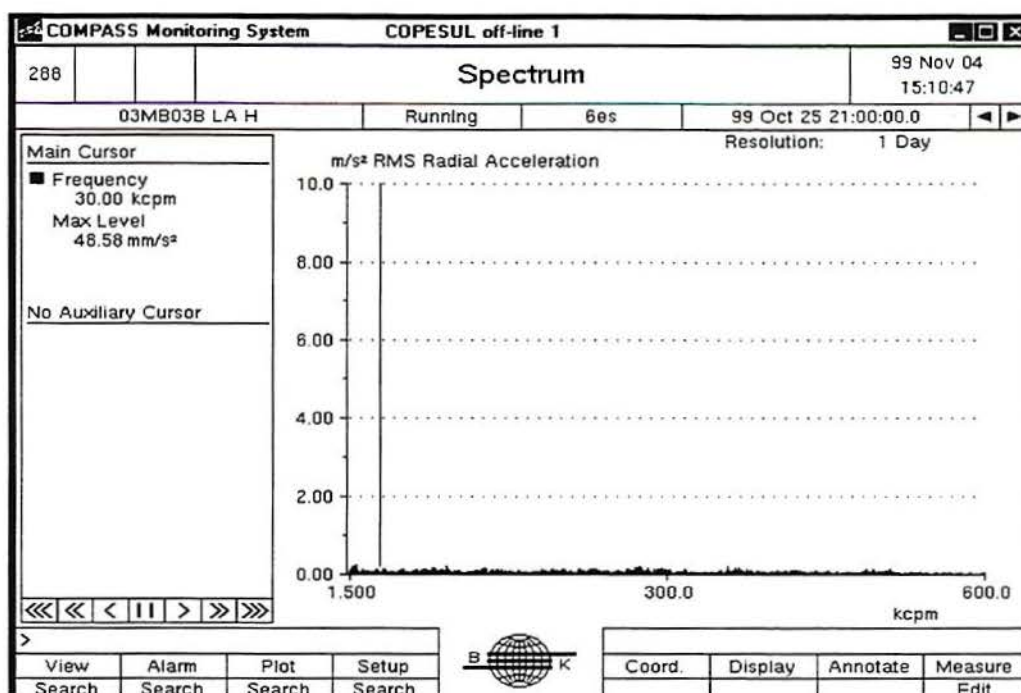


Figura 4.2.3. Espectro de envelope da bomba após a intervenção na bomba e motor

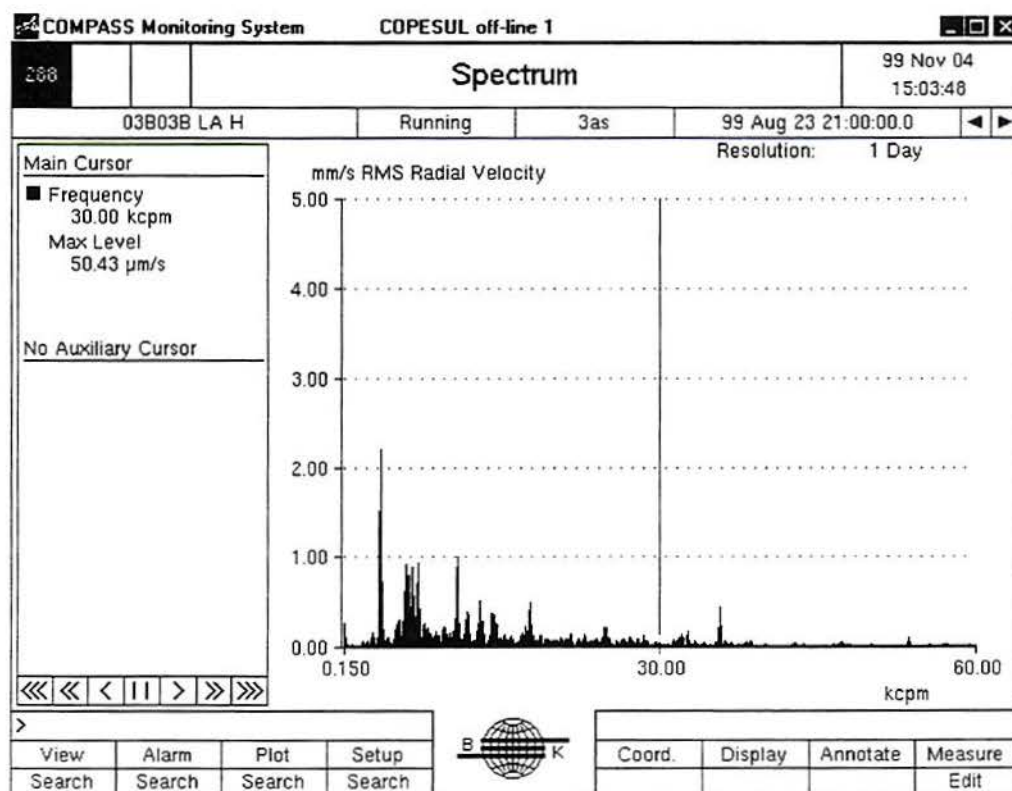


Figura 4.2.4. Autoespectro 03B03B LA H - Agosto 1999

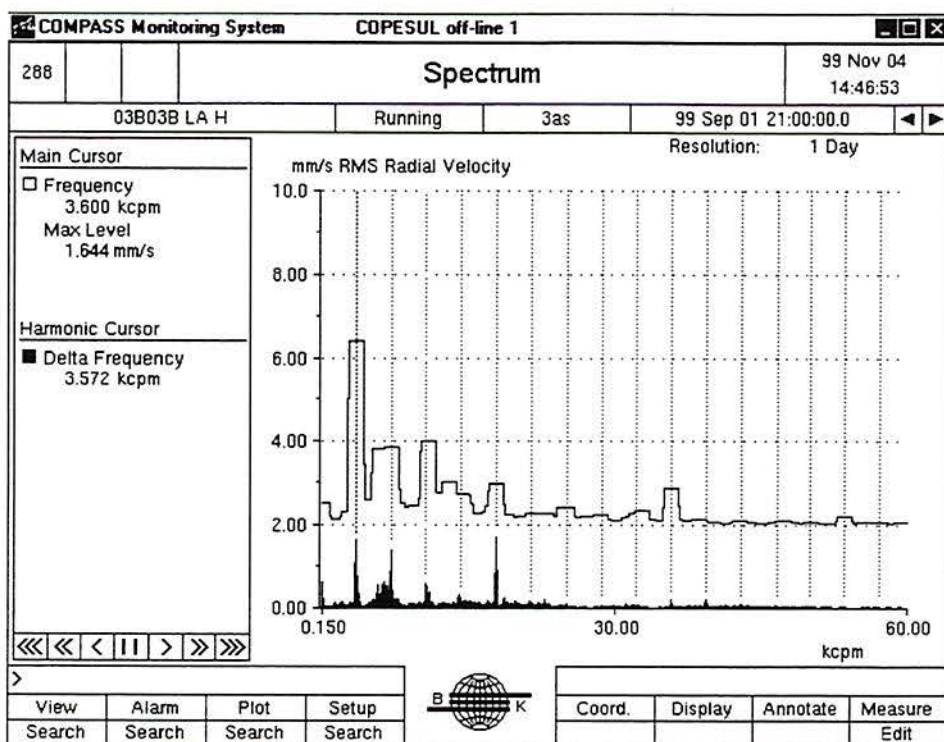


Figura 4.2.5. Autoespectro 03B03B LA H – Setembro 1999. Não houve alteração significativa nas amplitudes, comparando com o espectro antes da intervenção.

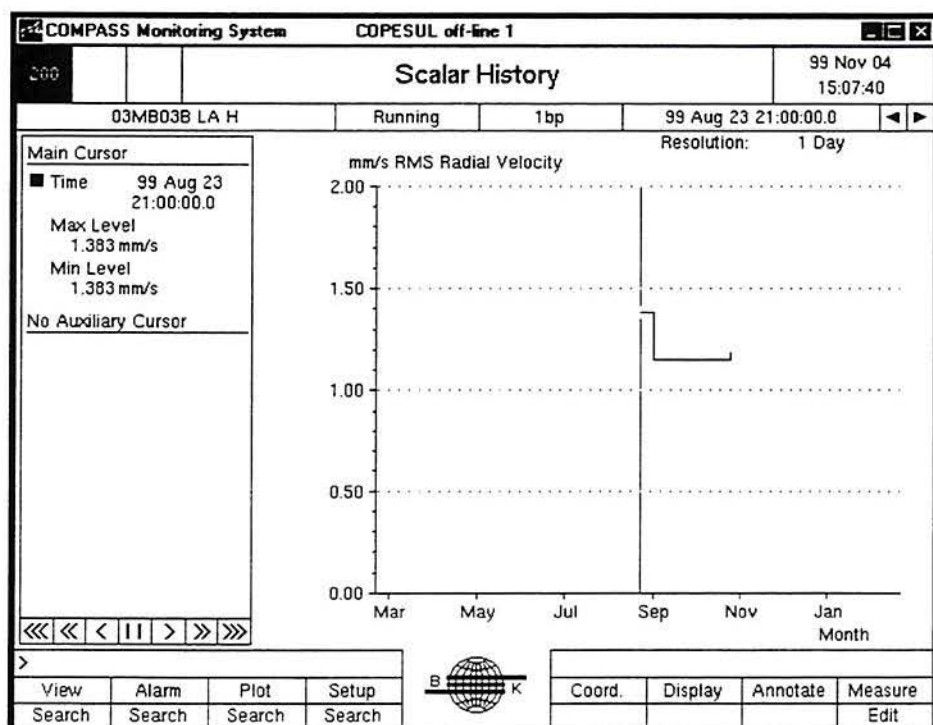


Figura 4.2.6. 03MB03 LA H – Tendência do valor global de Agosto a Novembro de 1999, mostrando que não há alteração significativa de amplitude global.

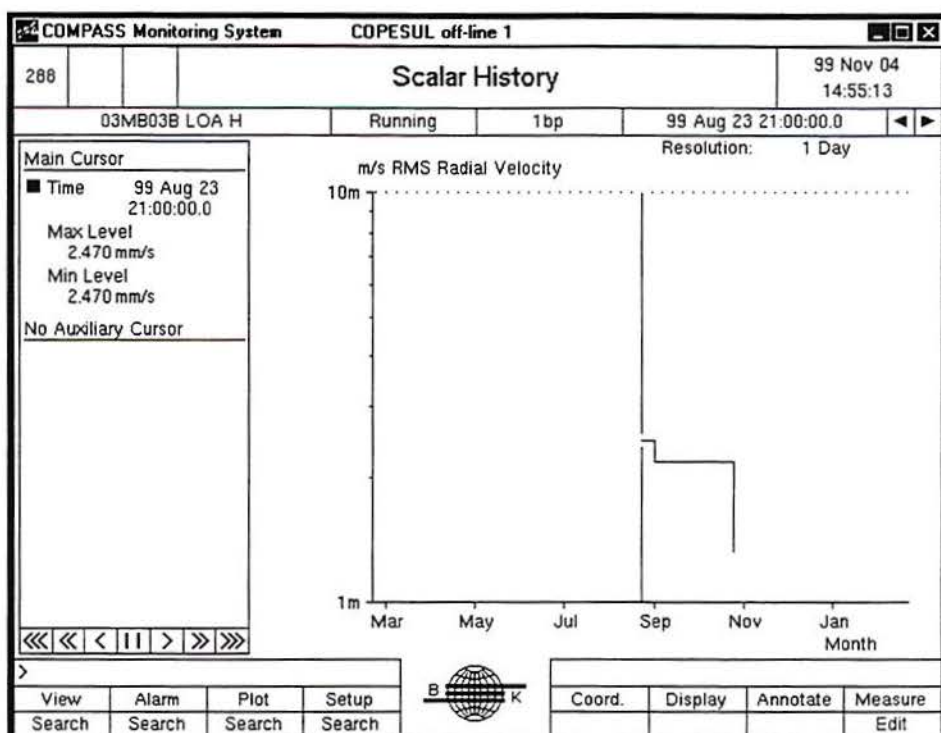


Figura 4.2.7. 03MB03 LOA H – Valor global de Agosto a Novembro de 1999, com alteração de amplitude de 2,5 mm/s antes da intervenção para 1,2 mm/s após a intervenção.

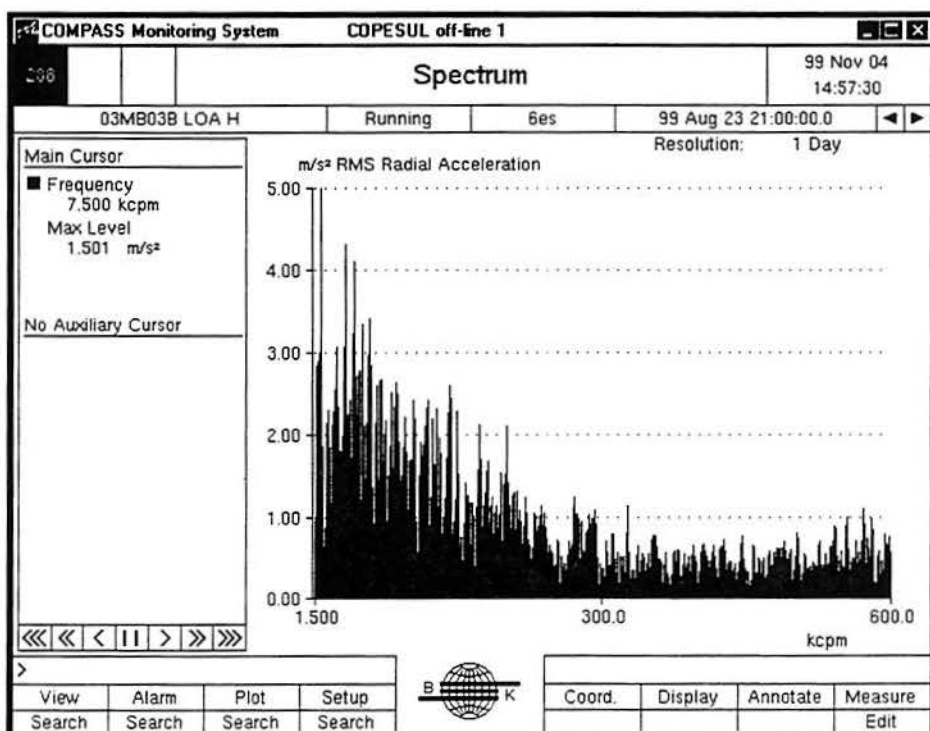


Figura 4.2.8. Espectro do envelope antes da intervenção, mostrando picos de 33.000 RPM com 4,3 m/s² e outros picos vizinhos semelhantes até 40.000 RPM.

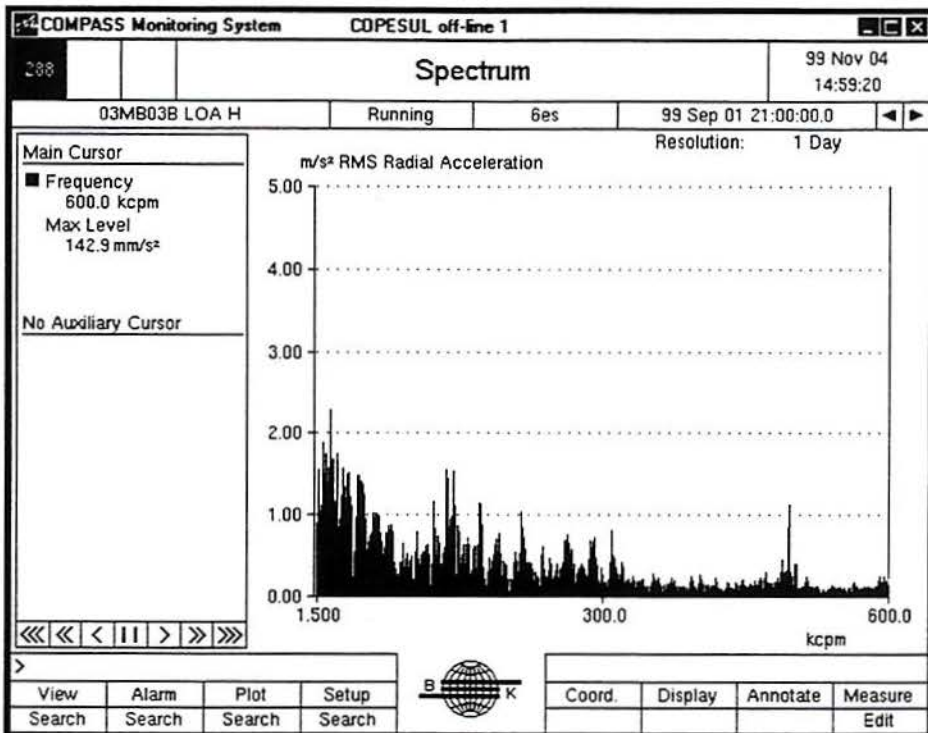


Figura 4.2.9. Espectro de envelope após troca dos mancais, com redução significativa dos valores de pico (1,5 m/s² em 33.000 RPM e 2 m/s² em 15.000 RPM).

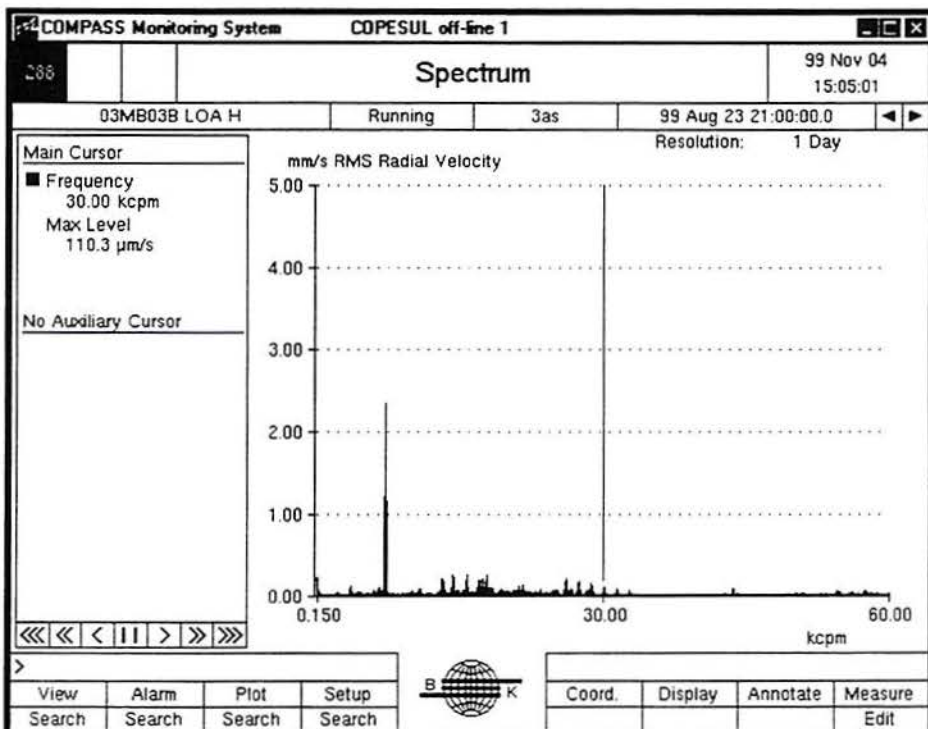


Figura 4.2.10. 03MB03B – LOA H - Autoespectro do mancal externo do motor antes da intervenção (em Agosto de 1999).

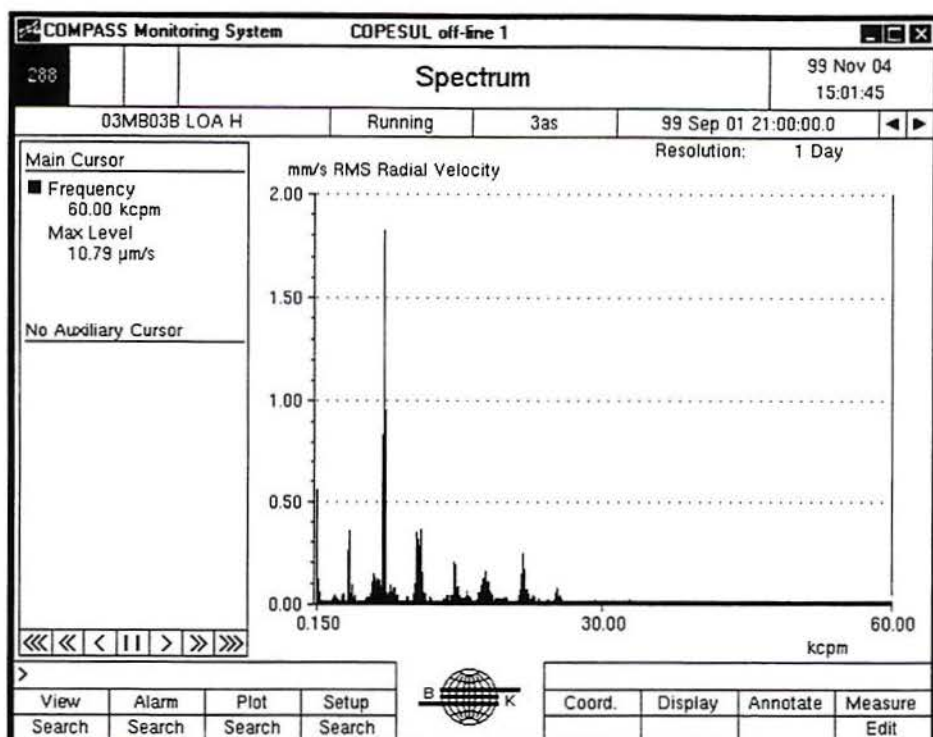


Figura 4.2.11. 03MB03B – LOA H - Autoespectro do mancal externo do motor após a intervenção (Setembro de 1999) com praticamente os mesmos valores de amplitude (cerca de 2 mm/s no maior pico). A troca do mancal e a falha não são detectáveis neste espectro.

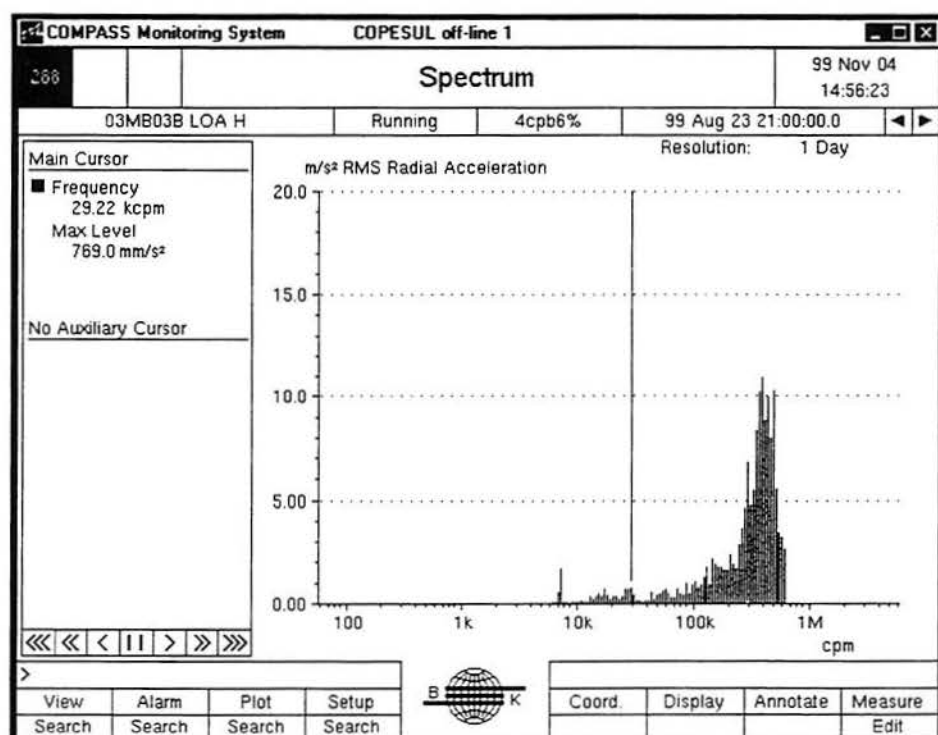


Figura 4.2.12. 03MB03B – LOA H – CPB6% do motor antes da intervenção (em Agosto de 1999).

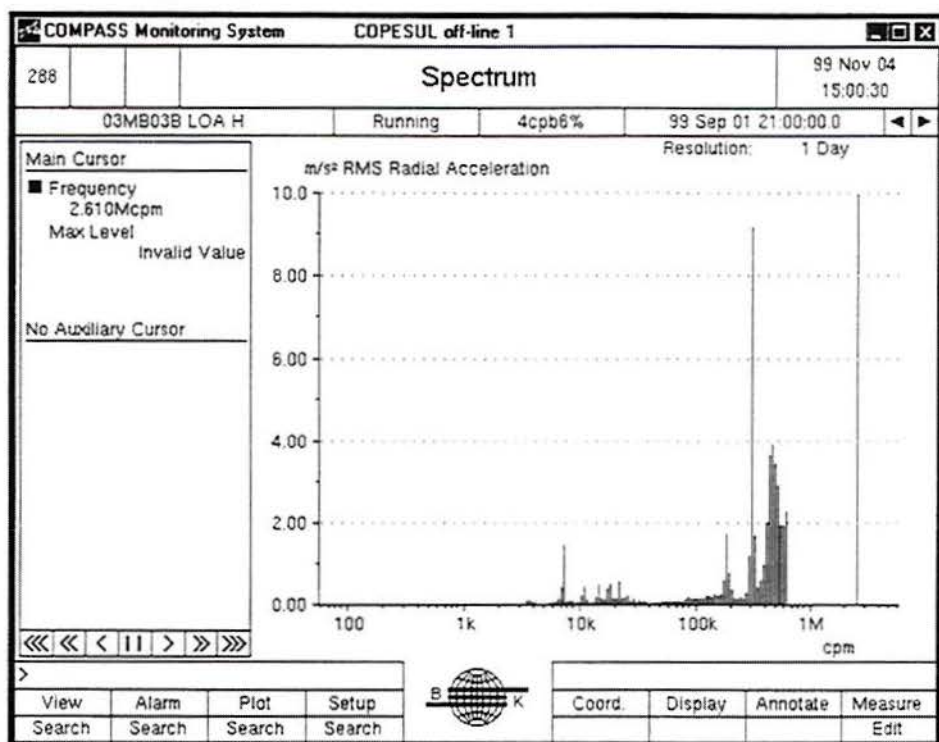


Figura 4.2.13. 03MB03B – LOA H – CPB6% do motor após a intervenção com redução da área do espectro mas com um pico em 300.000 RPM que mantém um valor máximo de cerca de 10 m/s², semelhante ao valor máximo antes da intervenção.

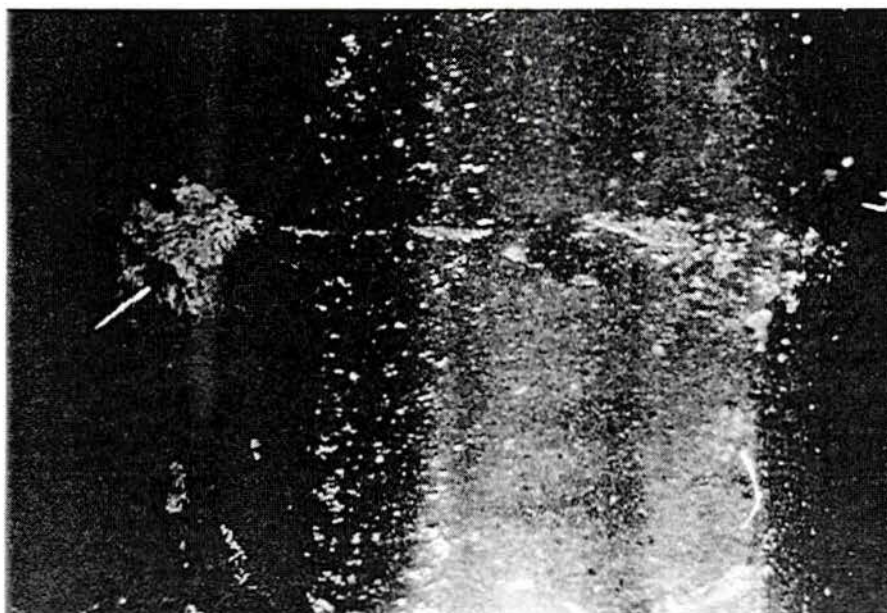


Figura 4.2.14. 03MB03B - Pista externa LA – esfoliação da pista.



Figura 4.2.15. 03MB03B - Pista externa LA detalhe – esfoliação da pista.

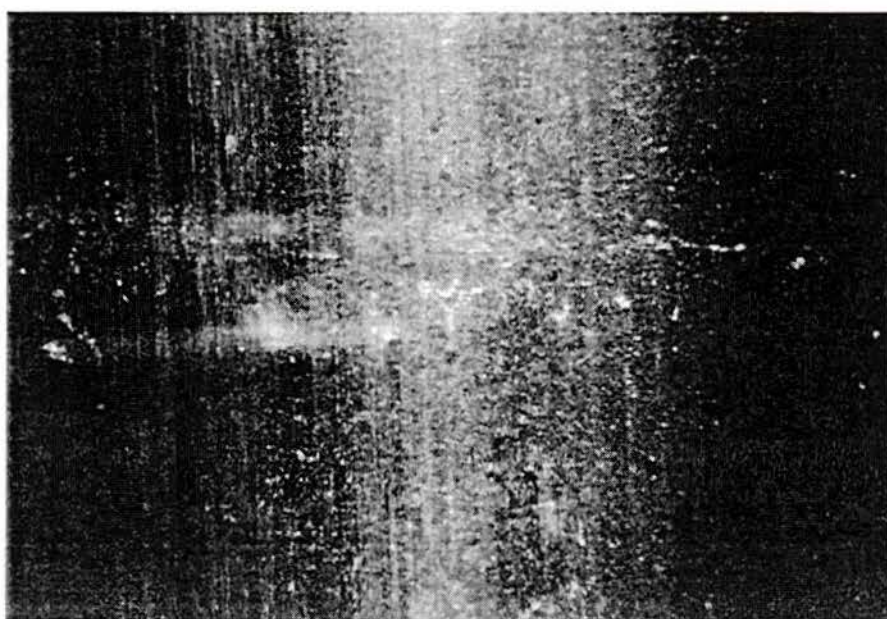


Figura 4.2.16. 03MB03B - Pista externa LOA.



Figura 4.2.17. 03MB03B - Pista externa LOA detalhe.



Figura 4.2.18. 03MB03B - Esfera LOA, dano severo.

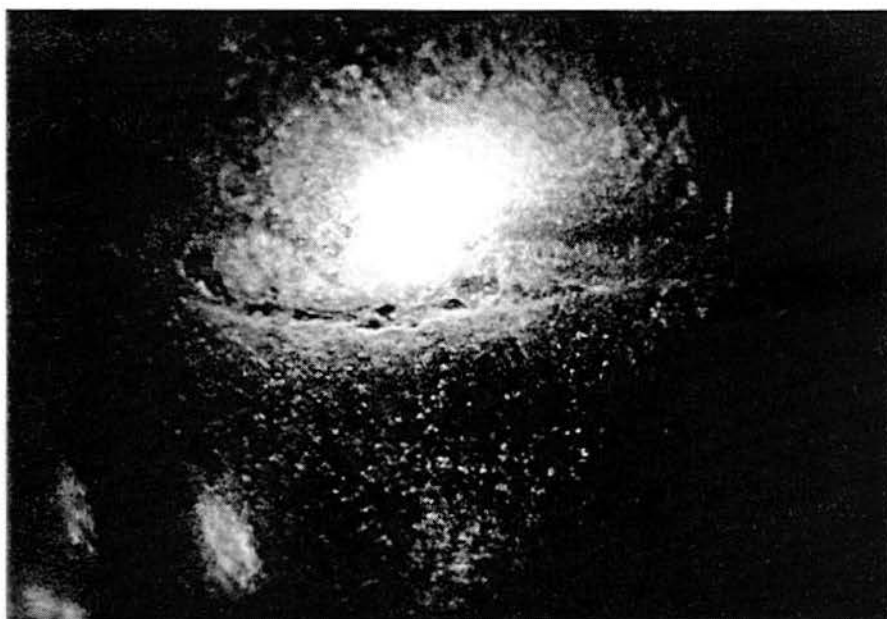


Figura 4.2.19. 03MB03B - Esfera LOA , outro detalhe – dano severo.

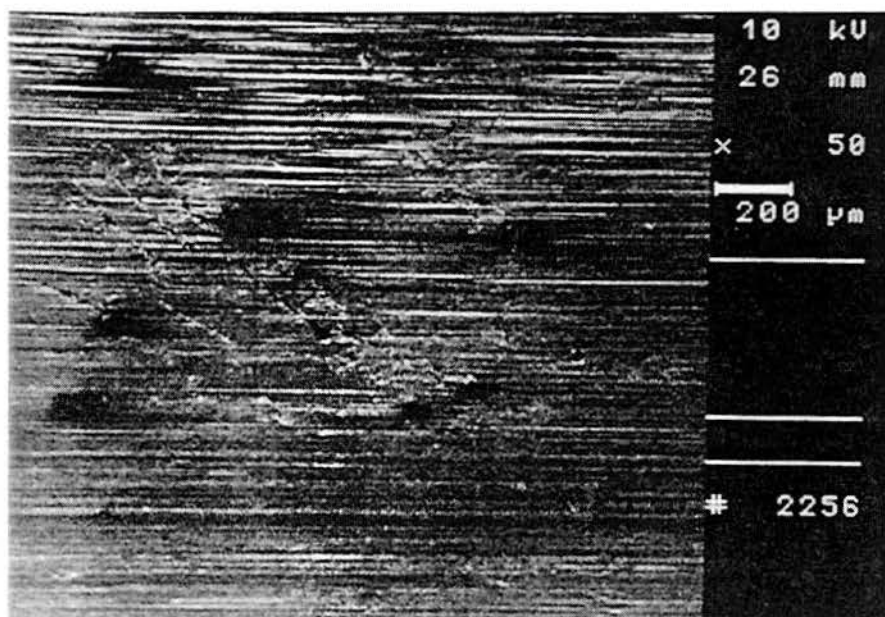


Figura 4.2.20. 03MB03B LOA – Pista interna com trincas em desenvolvimento – aumento 50 X.

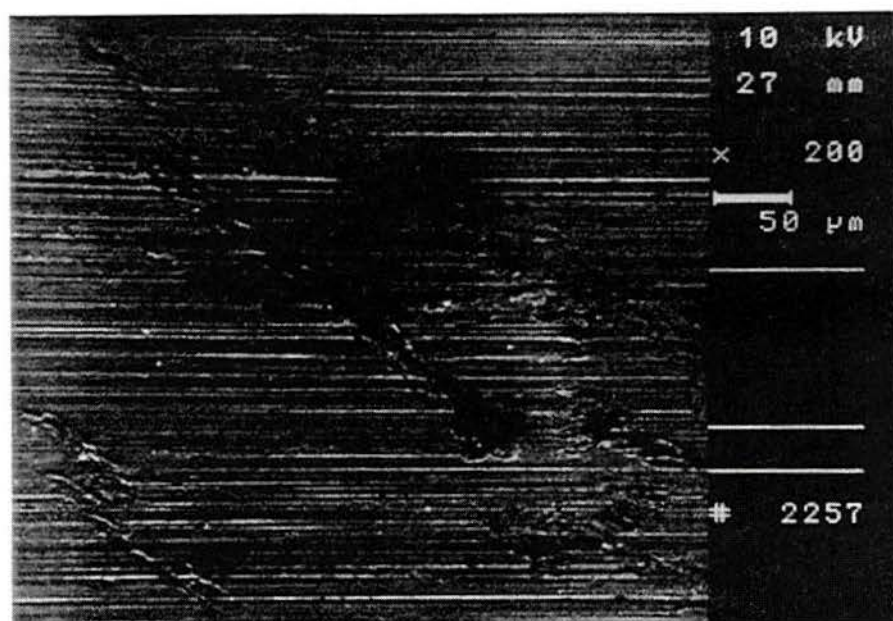


Figura 4.2.21. 03MB03 LOA - MEV – Detalhe das trincas– 200 X.

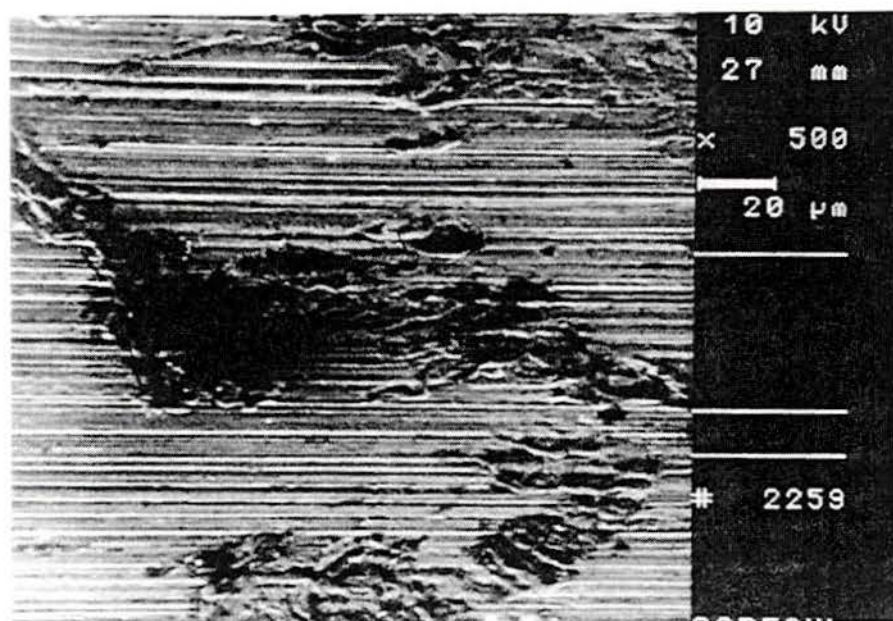


Figura 4.2.22. 03MB03 LOA - MEV –Detalhe do extremo da trinca com esfoliação – 500 X.

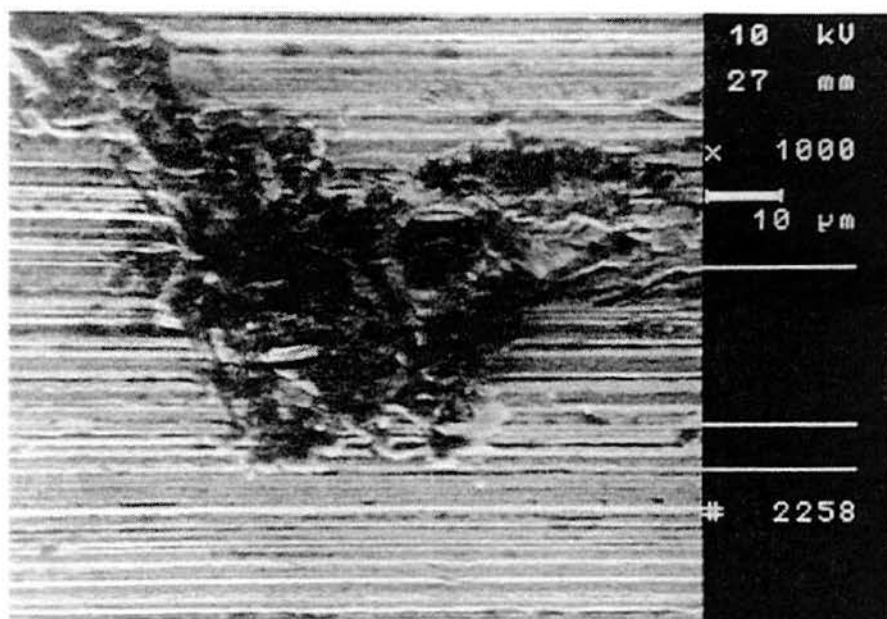


Figura 4.2.23. 03MB03 LOA - MEV - Esfoliação: detalhe - 1000 X.

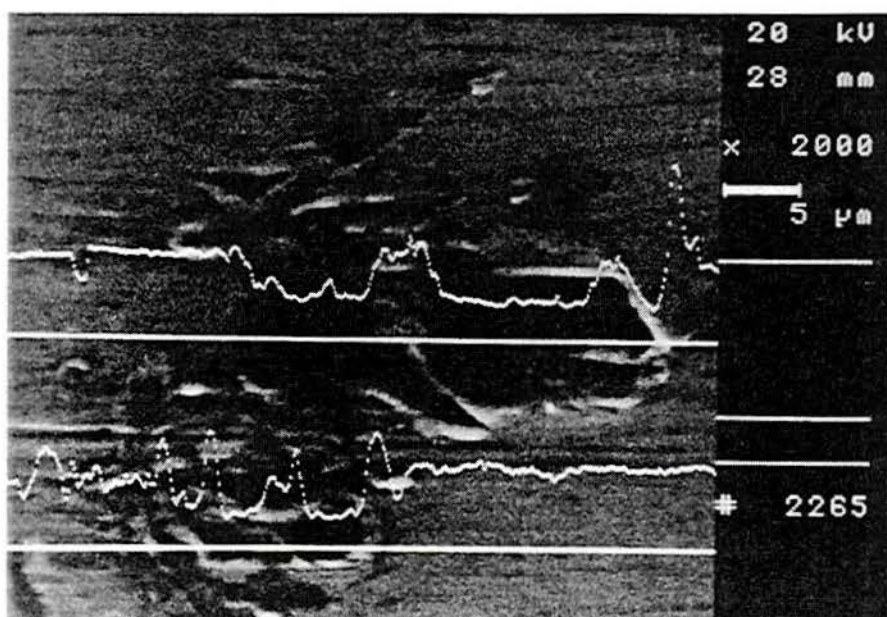


Figura 4.2.24. 03MB03 LOA - MEV - Perfis da superfície na região de uma descontinuidade (corte nas linhas brancas) , indicando que se tratam de rebaixos na superfície - 2000 X.

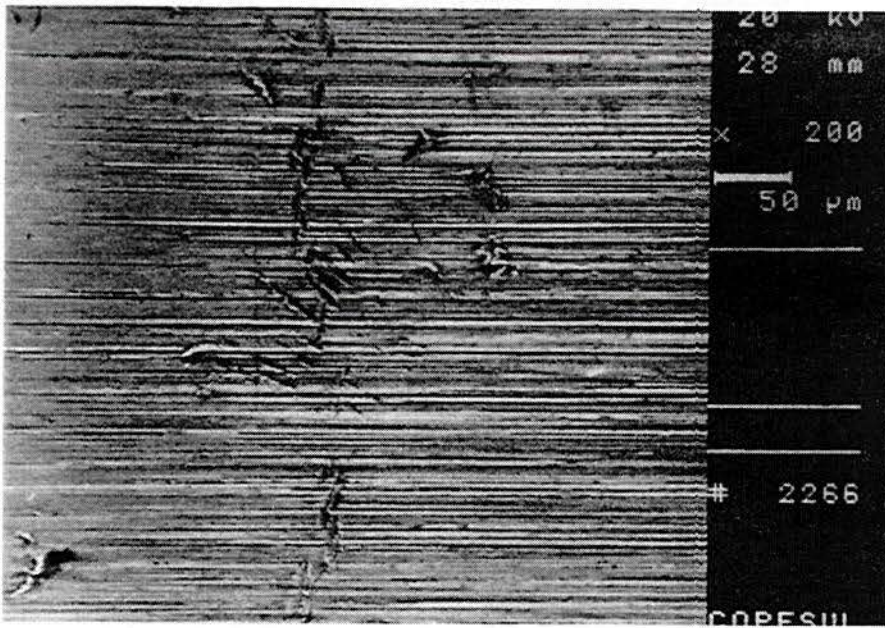


Figura 4.2.25. 03MB03B - LOA - MEV – Descontinuidades – 200 X..

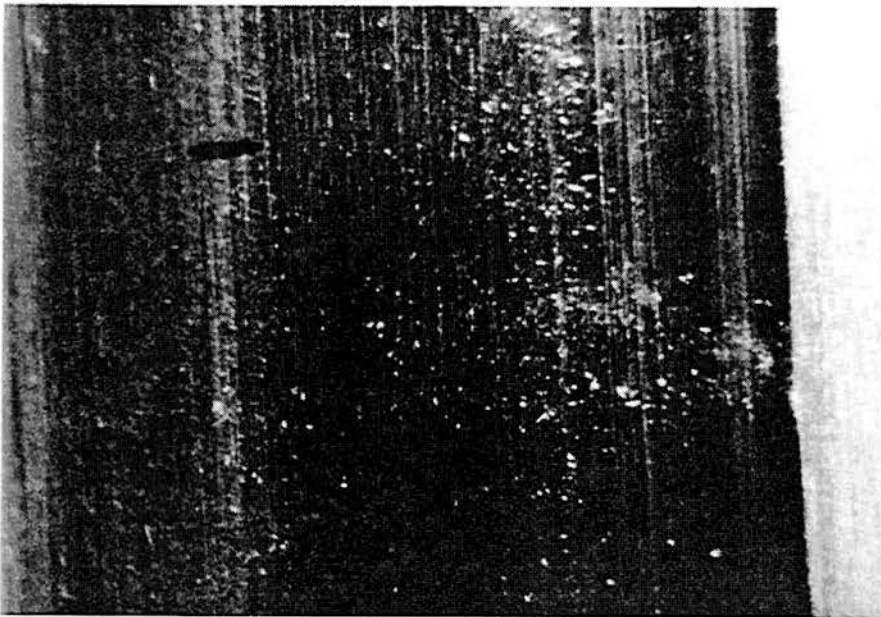


Figura 4.2.26. 03B03B - Pista externa LA, com defeitos superficiais bastante discretos (início de encruamento na pequena mancha oval em cima a esquerda na foto) – 10 X.



Figura 4.2.27. 03B03B - Pista externa LA, detalhe, mostrando pequeno encruamento da superfície, provavelmente em virtude das altas vibrações transmitidas desde o motor – 50 X.

4.3.BOMBA 13B06A

Bomba centrífuga com simples rotor em balanço horizontal acionada por motor elétrico, 100 kW e 3550 RPM.

Mancal de rolamento da bomba 13B06A LA : SKF NU313E C3;

Coefficientes de frequência de danos para os mancais da bomba:

gaiola: 0,4 (1.420 RPM) ;

esfera: 2,4 (8.520 RPM);

esfera contra pista externa: 5,2 (18.460 RPM);

esfera contra pista interna: 7,8 (27.690 RPM);

A bomba apresentava ruído elevado e vibração global de cerca de 6 mm/s. O espectro de envelope indicava picos de 1,6 a 1,2 m/s² em baixas frequências (menores de 3.000 RPM, 5.400 RPM e 19.000 RPM) e picos disseminados em toda a faixa de frequências. Estes

valores indicavam para dano nas gaiolas (separadora de esferas) e na pista externa. A análise das frequências foi prejudicada pela escala do gráfico, tornando difícil separar as frequências muito baixas. Entretanto o pico em 19.000 RPM parece indicar claramente defeito na pista externa. Ao desmontar o rolamento para análise, a gaiola foi danificada, impossibilitando uma avaliação de seu estado em operação.

Após a intervenção estes valores caíram para 0,4 a 0,5 m/s² no espectro de envelope e para 4,5 mm/s para o valor global. O espectro CPB6% corroborava a indicação de alteração, com picos 3,5 m/s² em 2.740 Hz. A substituição dos mancais de rolamento reduziu este valor máximo para 2 m/s² em 350 Hz, pico que já existia no gráfico anterior. A queda da área coberta pelo espectro entretanto foi significativa. O autoespectro estava bastante atípico, com muitas harmônicas pronunciadas e quase não sofreu alterações antes e após a intervenção. A única modificação significativa foi a redução dramática do pico em 90 Hz de amplitude 3,5 mm/s que passou para 0,6 mm/s (e a redução de seu segundo harmônico em 180 Hz). O autoespectro neste caso não parece ser conclusivo sobre as origens da vibração, com exceção do fato daquelas frequências remanescentes não estarem sendo geradas pelas pistas dos mancais de rolamento LA (ver os gráficos abaixo). Neste equipamento tanto o espectro "es" quanto o espectro CPB6% indicaram alterações no estado do equipamento e responderam à troca dos mancais, enquanto o autoespectro e o valor global apresentavam informações não conclusivas.

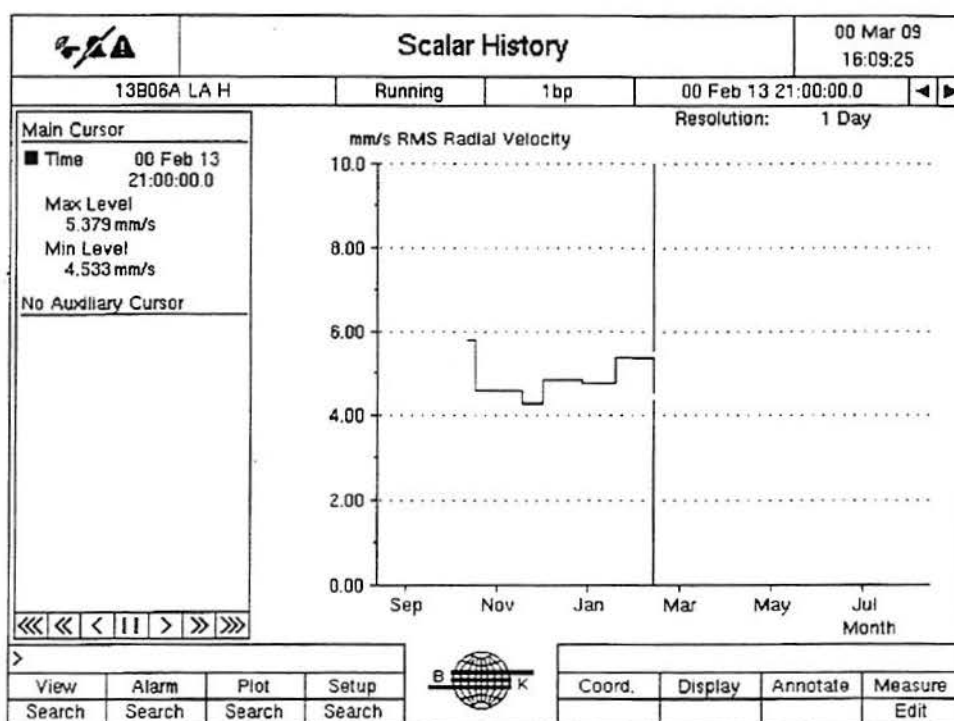


Figura 4.3.1. 13B06A - Acompanhamento do valor global de vibração da bomba

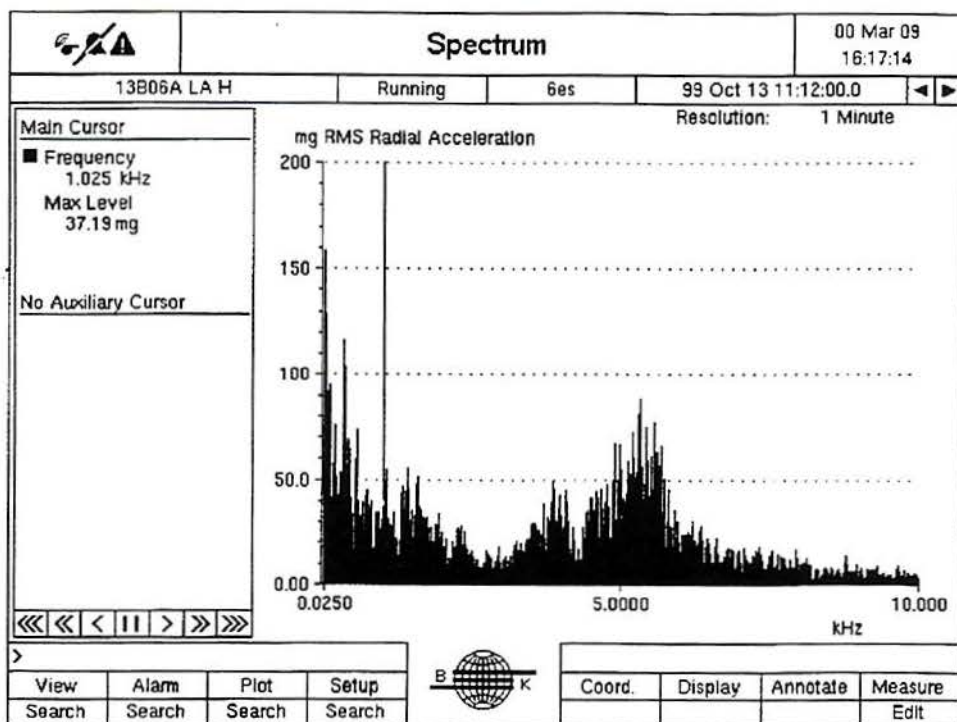


Figura 4.3.2. 13B06A - Espectro de envelope antes da intervenção, com valores elevados em baixa frequência (<50, 90 e 330 Hz) e em torno de 5000 Hz.

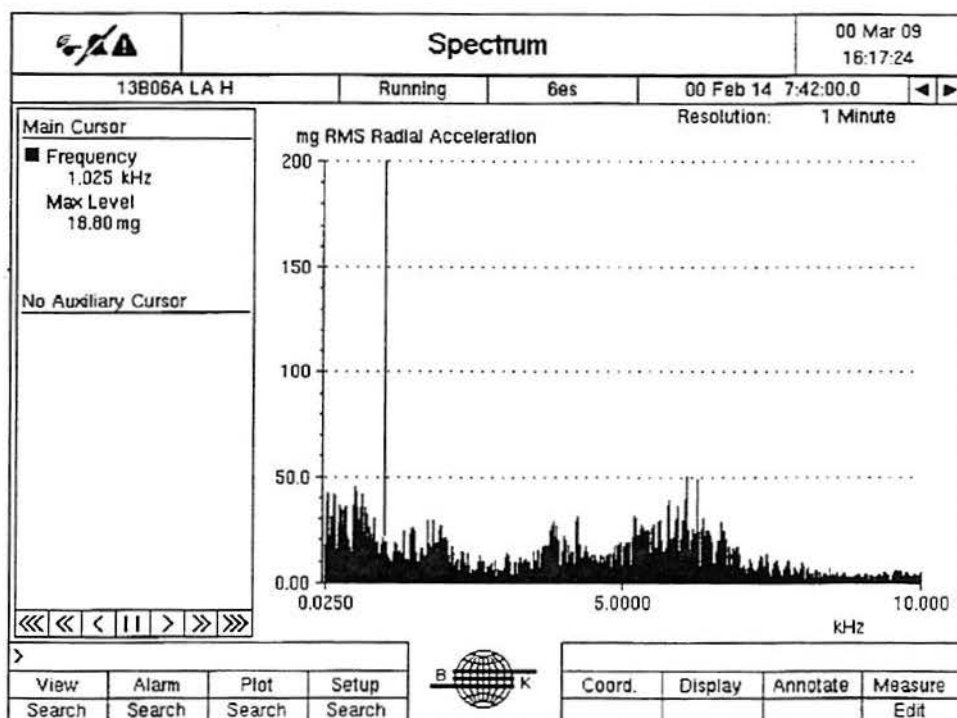


Figura 4.3.3. 13B06A - Após intervenção, com redução geral das frequências predominantes, especialmente nas baixas frequências, para menos de um terço dos valores anteriores.

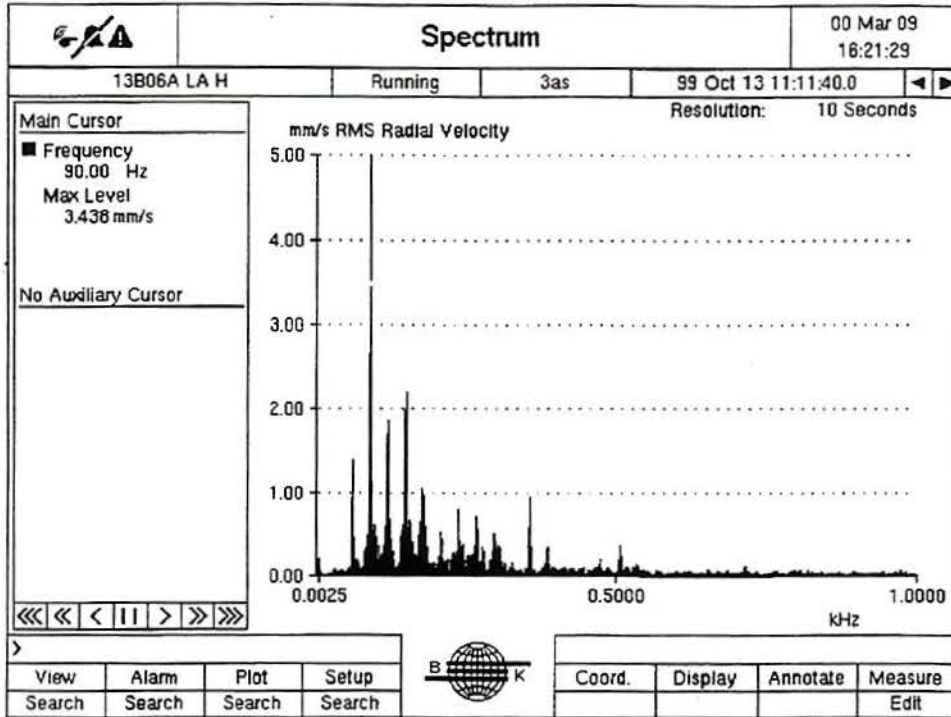


Figura 4.3.4. 13B06A - Autoespectro antes da intervenção com vários harmônicos pronunciados. Cursor indica frequência de 90 Hz com 3,4 mm/s.

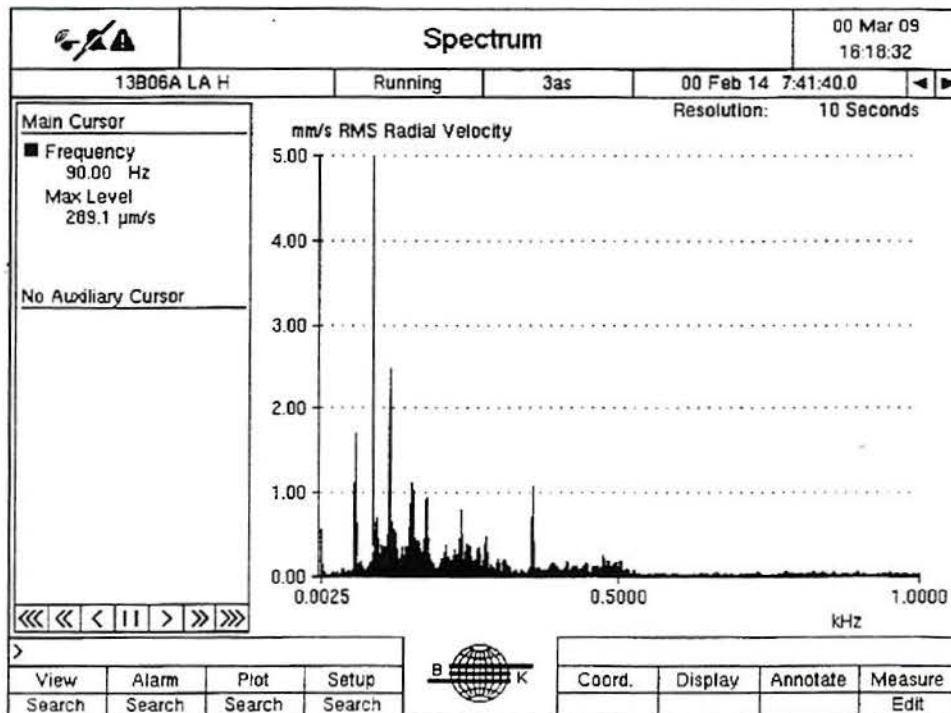


Figura 4.3.5. 13B06A - Autoespectro após intervenção com alteração apenas no pico de 90 Hz que praticamente desapareceu.

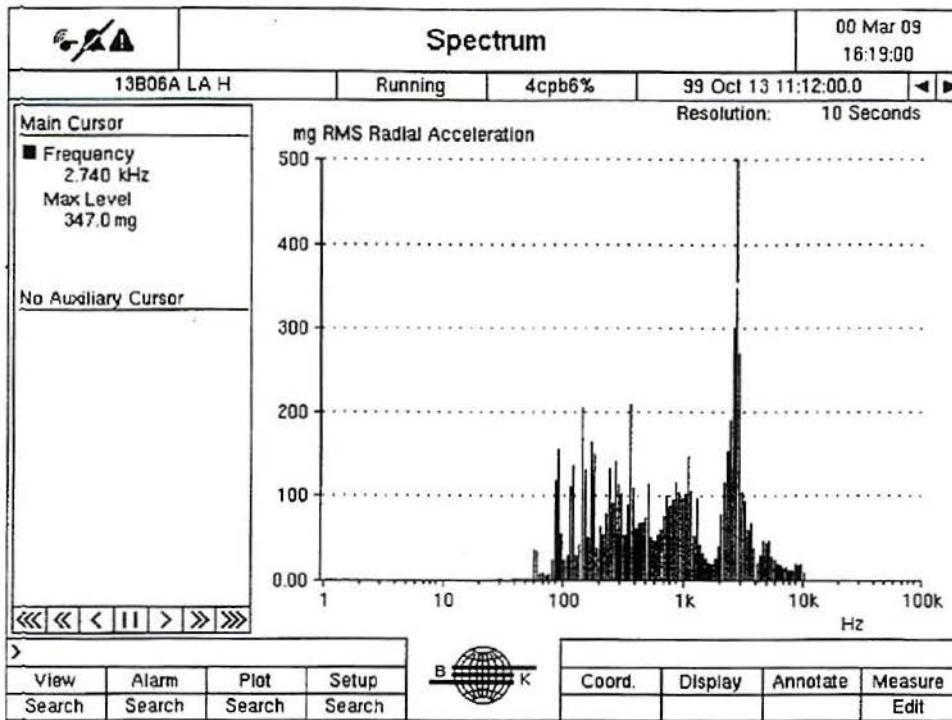


Figura 4.3.6. 13B06A - Espectro CPB6% com pico dominante de 2.740 Hz com 3,5 m/s², antes da intervenção.

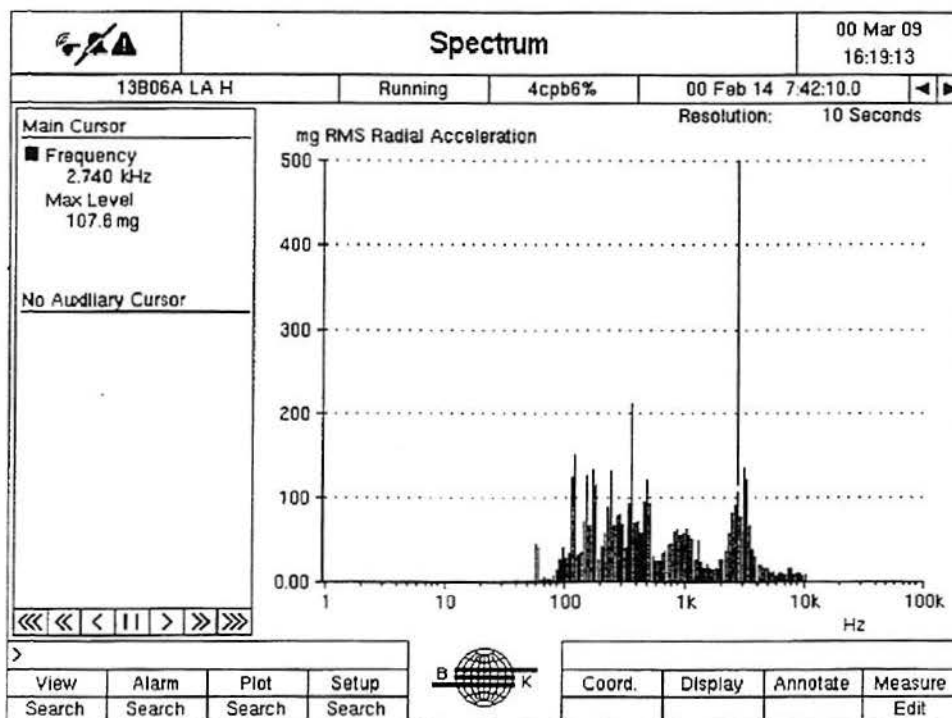


Figura 4.3.7. 13B06A - Espectro CPB6% com virtual desaparecimento do pico em 2.740 Hz após a intervenção. Esta frequência pode ter sido a portadora da modulação de amplitude de 300 Hz e outras frequências menores que apareciam no gráfico do "es".

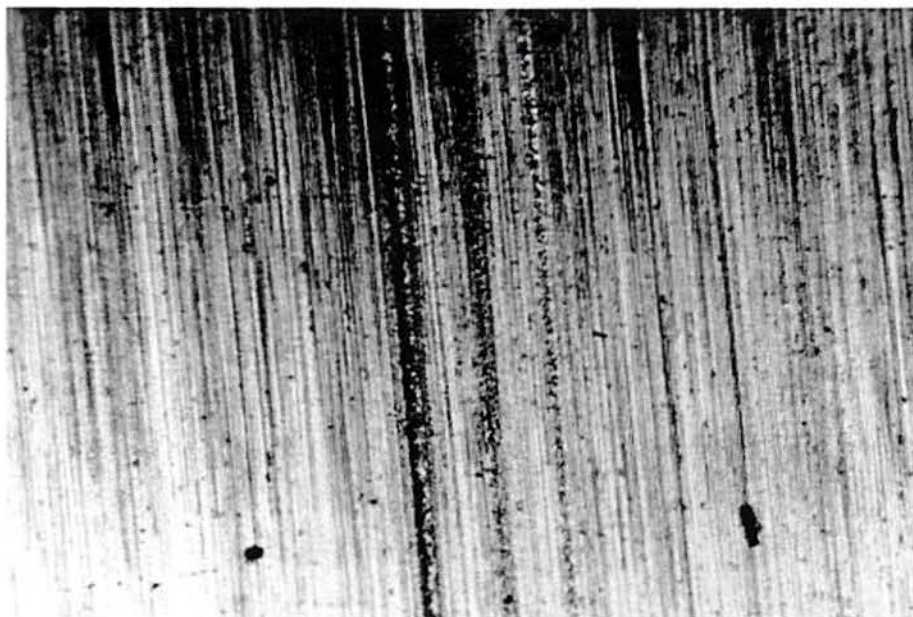


Figura 4.3.8. 13B06A - Pista externa com descontinuidade, mancal do lado acoplado (LA). Possivelmente causada por presença de material estranho ao mancal.

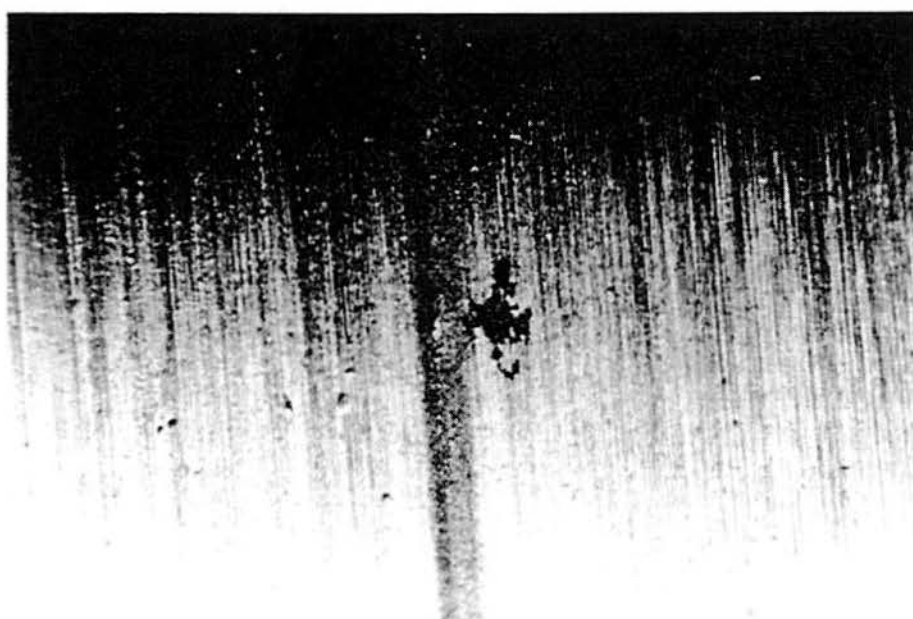


Figura 4.3.9. 13B06A - Pista externa, LA, outro detalhe do dano na pista com arrancamento de material e alguns "pittings".

4.4.MOTOR 13B04A

Motor elétrico de bomba criogênica (-29 C) de eteno centrífuga horizontal de dois estágios, com alimentação trifásica 60 Hz e 2300 volts, com potência de 200 kW e 3550 RPM.

Mancal de rolamento motor 13MB04A LA e LOA: SKF6315 C3;

Coefficientes de frequência de danos para os mancais do motor:

gaiola: 0,39 (1.385 RPM) ;

esfera: 2,1 (7.455 RPM);

esfera contra pista externa: 3,1 (11.005 RPM);

esfera contra pista interna: 4,9 (17.395 RPM);

O motor apresentava vibração global da ordem de 4 mm/s e um autoespectro e espectro de envelope alterados em relação às condições consideradas usuais. Após a intervenção os valores globais caíram para 2,4 mm/s. Houve alteração visível nas frequências do espectro de envelope antes e após a intervenção no equipamento (troca de mancais do motor) na faixa de baixas frequências associadas aos defeitos nas pistas de rolamento e esferas ou roletes de mancais de rolamento. Entretanto existe uma faixa em frequências mais altas que não sofreu alterações significativas na amplitude, mesmo após a intervenção (pequena redução). A origem destes picos não está clara, mas certamente não está associada a defeitos nas superfícies de rolamento. Outros fatores como folgas ou ajustes de montagem, perturbações de fluxo e impactos ou roçamentos em outras partes do equipamento ou transmissão de outros equipamentos podem estar influenciando estes resultados e necessitariam de uma investigação posterior que está fora do escopo deste trabalho. Deve ser ressaltada a pequena variação nos valores globais antes e após a manutenção e nos valores máximos de vibração obtidos na carcaça, mesmo com os mancais de rolamento seriamente danificados.

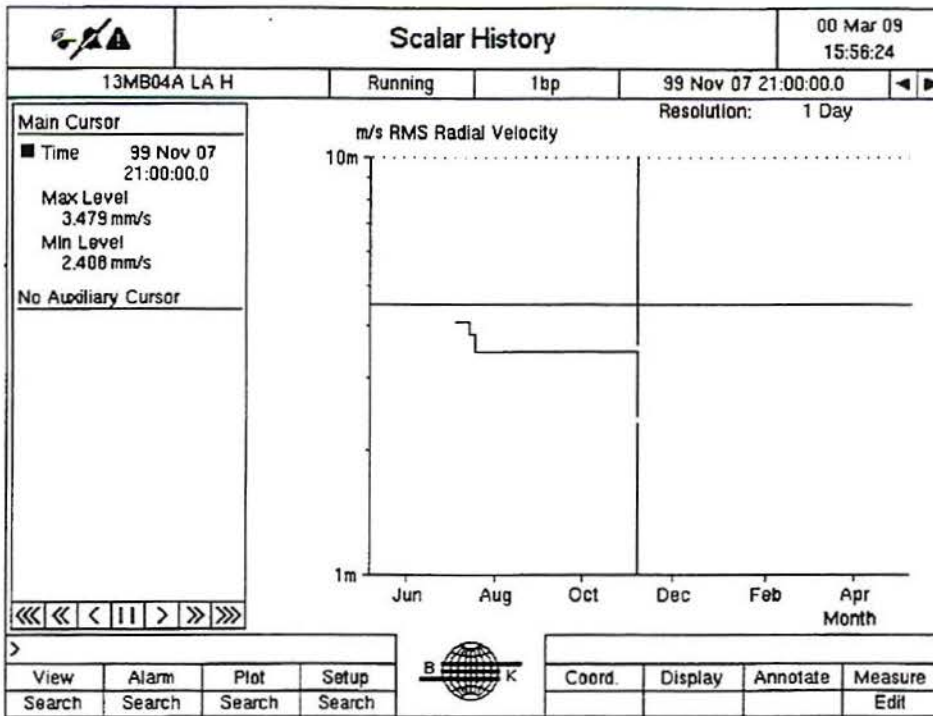


Figura 4.4.1. 13MB04A LA H - Tendência do valor global de vibração.

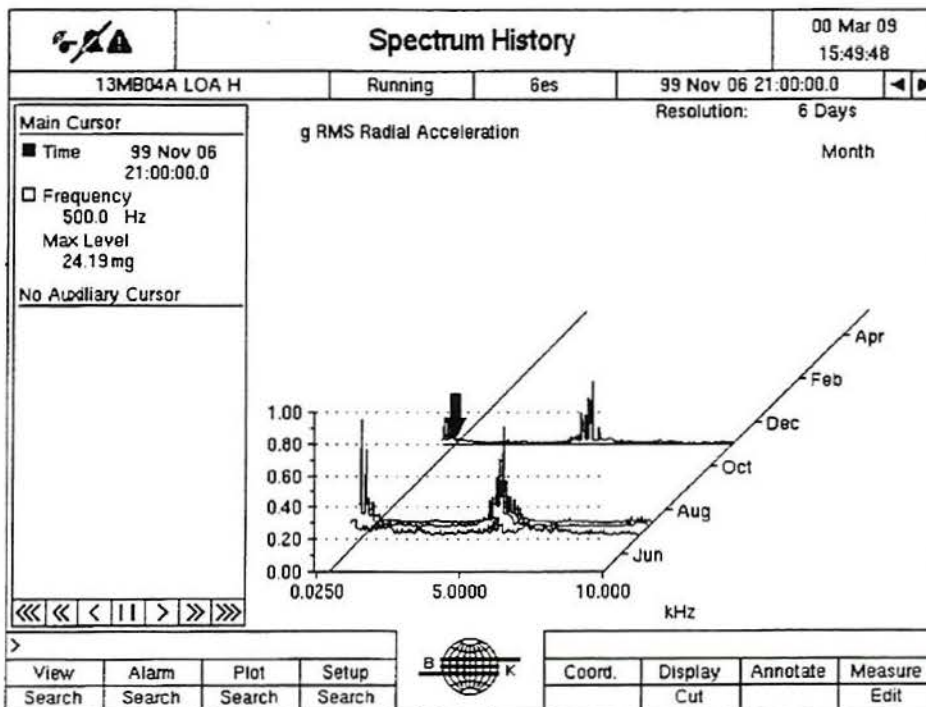


Figura 4.4.2. 13MB04A LOA - Espectro "es" em cascata mostrando todas as coletas e análises. Após a intervenção apenas as baixas frequências são reduzidas (seta).

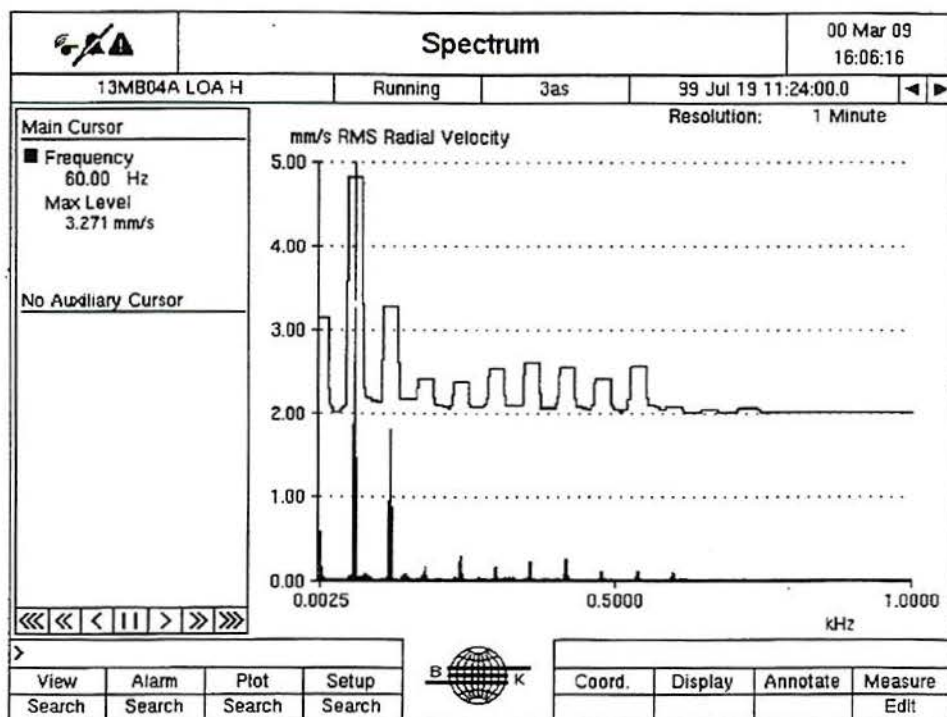


Figura 4.4.3. 13MB04A LOA - Autoespectro antes da intervenção no motor. Picos de 3 e 2 mm/s em uma e duas vezes a primeira harmônica indicam anormalidade.

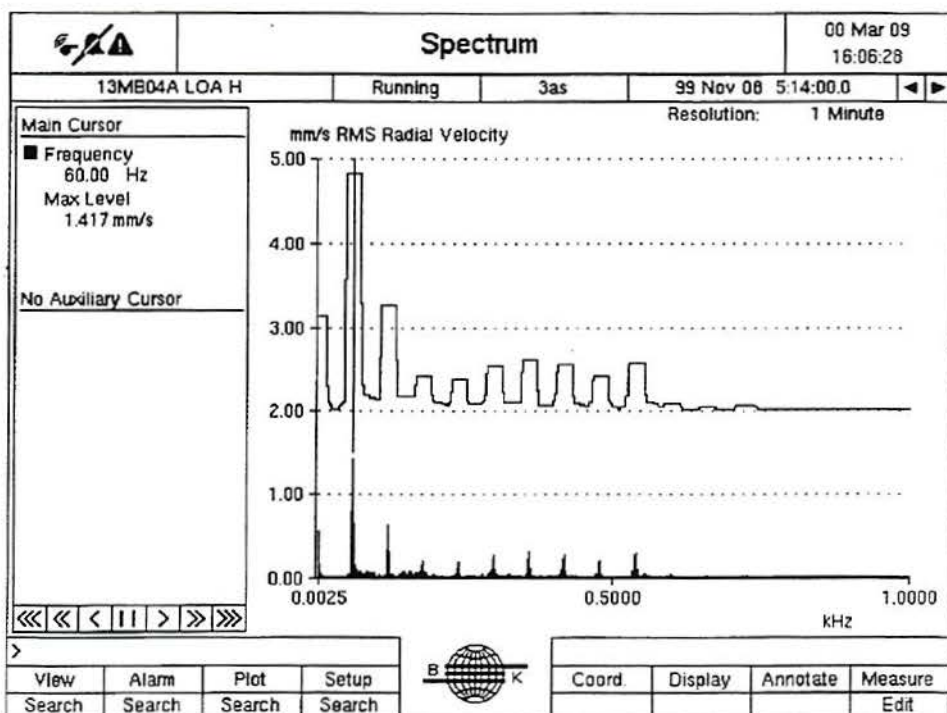


Figura 4.4.4. 13MB04A LOA- Após a intervenção o autoespectro mostra amplitudes reduzidas de 1,4 mm/s a 60 Hz.

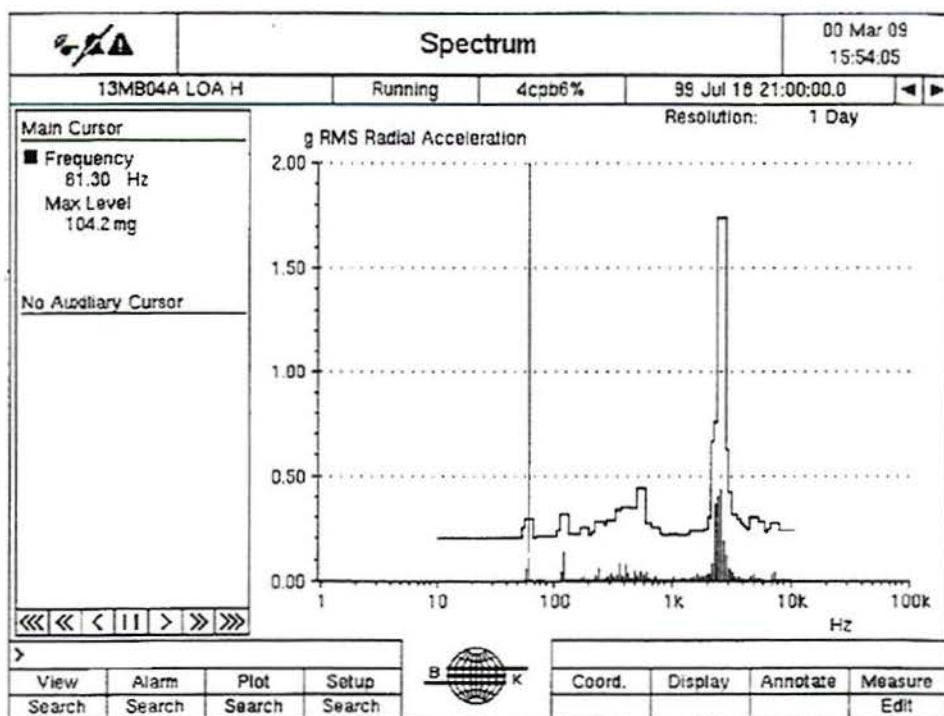


Figura 4.4.5. 13MB04A LA - O espectro CPB6% ainda mostra valores de quase 5mm/s^2 em 2500 Hz mesmo após a intervenção, indicando que alguma anormalidade não associada a defeitos nas superfícies dos mancais permanece.

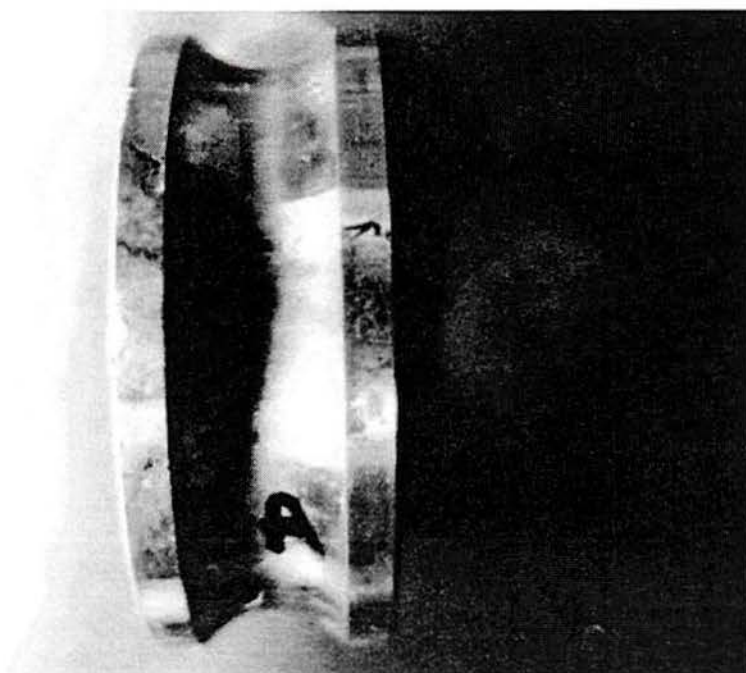


Figura 4.4.6. 13MB04A Pista interna do lado acoplado (LA).



Figura 4.4.7. 13MB04A - Detalhe da pista interna LA.



Figura 4.4.8. 13MB04A pista externa LA – detalhe dos defeitos.

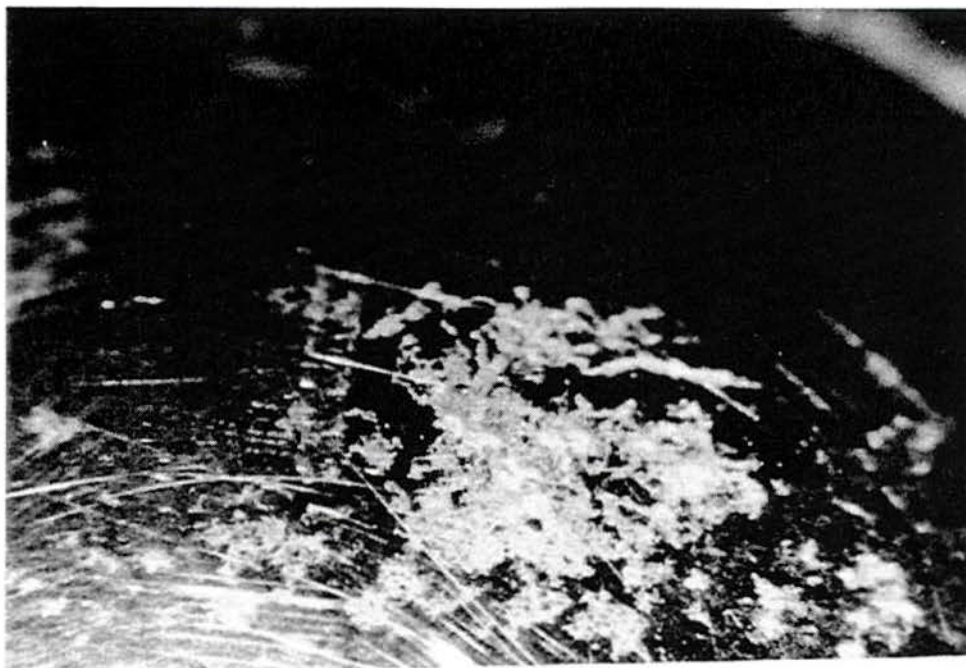


Figura 4.4.9. 13MB04A Esfera LA – detalhe da escamação – 10 X.



Figura 4.4.10. 13MB04A pista externa LOA – detalhe do encruamento ("brinelling").



Figura 4.4.11. 13MB04A - pista externa LOA.

4.5.MOTOR 48MVT01D

Este motor elétrico de indução trifásico de 60 Hz e 2300 volts com potência 200 HP e 1770 RPM aciona um ventilador axial de seis pás de 10 metros de diâmetro através de um eixo e de um redutor de velocidades em uma torre de resfriamento. O motor e o redutor são monitorados continuamente respectivamente com um e dois acelerômetros instalados em suas carcaças nas direções horizontal (motor) e horizontal e vertical (redutor). Os mancais do motor são os seguintes:

Mancal de rolamento LA e LOA – SKF6322 C3

Coefficientes de frequência de danos para o mancal:

gaiola: 0,39 (11,3 Hz);

esfera: 2,0 (59,4 Hz);

esfera contra pista externa: 3,1 (90,6 Hz);

esfera contra pista interna: 4,9 (146,6 Hz);

Em Setembro de 1999 foi efetuado um diagnóstico que não indicou qualquer anormalidade. O acompanhamento ao longo do tempo mostrou em Novembro de 1999 o desenvolvimento de uma falha em um dos rolamentos que somente foi capaz de causar uma alteração no espectro de envelope do sinal de vibração do motor. Os valores globais e espectros

de Fourier de alta e baixa frequência permaneceram virtualmente inalterados. O espectro de envelope (es) indicou um claro pico na frequência de passagem da esfera na pista externa (cerca de 5400 RPM ou 90 Hz) e seus múltiplos com picos de até 14 m/s^2 , o que é um valor absoluto bastante alto quando comparado com o histórico do equipamento e de outros equipamentos similares. Normalmente estes valores estão abaixo de 1 ou 2 m/s^2 . O autoespectro de velocidade não indicou alteração significativa durante o desenvolvimento do defeito, apresentando valores absolutos baixos (menores do que $0,7 \text{ mm/s}$). O valor global de vibração estava em torno de $1,2 \text{ mm/s}$ com o valor estável ao longo do tempo, com uma tendência muito discreta de crescimento. Os gráficos em cascata do espectro CPB6% não indicaram alteração significativa, mas o gráfico em cascata do envelope (es) apresentou um claro e inequívoco aumento de amplitude em 90,6 Hz, o que coincide com a frequência calculada de danos na pista externa ($3,06 \times 29,6 \text{ Hz}$). O valor do pico em 90,6 Hz passou de $0,2$ a cerca de $1,4 \text{ g}$ em 15 dias de operação. Abaixo são mostradas as fotos dos rolamentos como foram encontrados. Percebe-se que os defeitos foram encontrados conforme esperado e que apesar de inequívocos, eram ainda de pequena dimensão. Isto pode explicar o motivo do não haver apresentado alterações no autoespectro, valor global ou CPB6%. O "es" entretanto evidenciou a alteração física no mancal com precisão e antes que houvesse qualquer outro alarme, alteração de temperatura ou ruído perceptível, sugerindo que apresenta uma sensibilidade maior do os demais métodos utilizados.

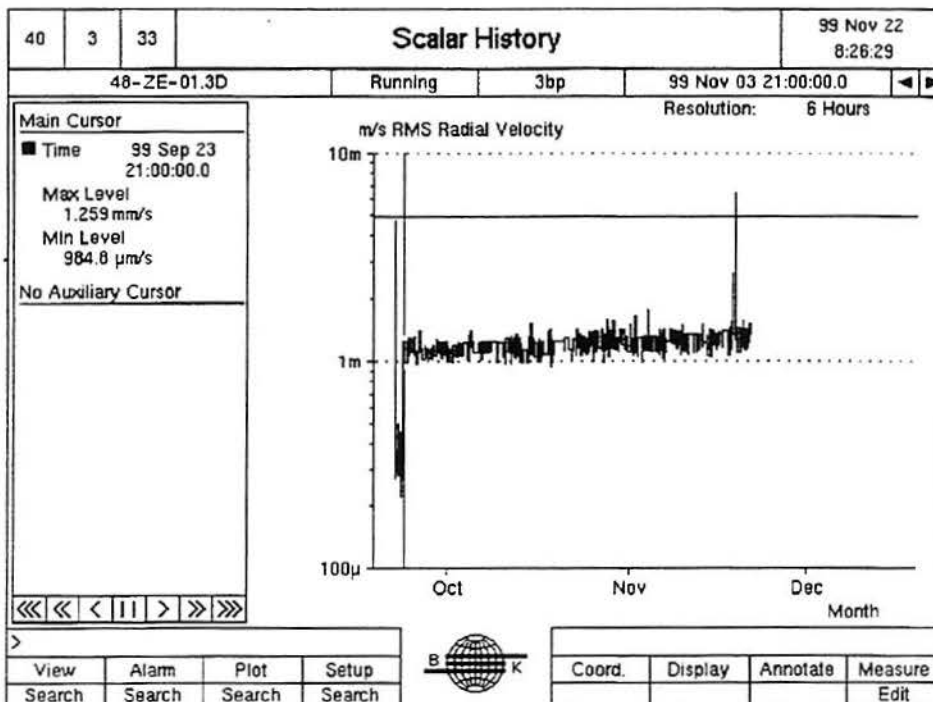


Figura 4.5.1. 48MVT01D - Tendência do valor global de vibração estável em $1,2 \text{ mm/s}$. Picos eventuais significam transientes de partida e parada do motor.

COPEsul
Engenharia de Manutenção e Avaliação - Preditiva de Rotativos
ADVISOR v.1.10 - Symptom Report

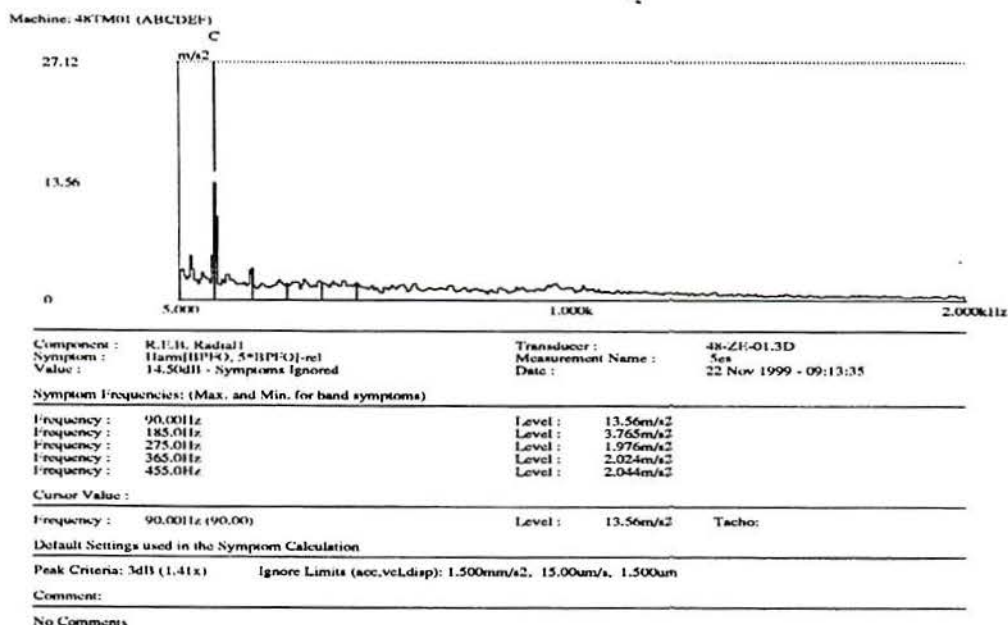


Figura 4.5.2. 48MVT01D - Espectro de envelope antes da intervenção com a marcação do pico de 90 Hz e seus harmônicos (defeito na pista externa).

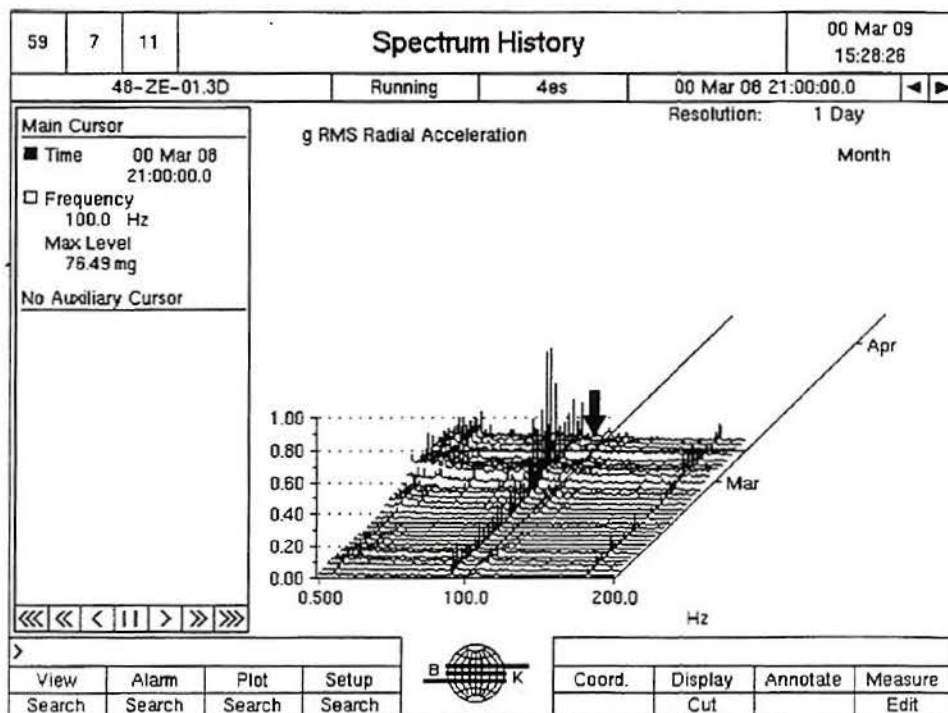


Figura 4.5.3. 48MVT01D - Cascata dos espectros "es" com a evolução do pico de 90 Hz até o valor de 14m/s² e a queda após a substituição do mancal. É visível também o segundo harmônico em 180 Hz.

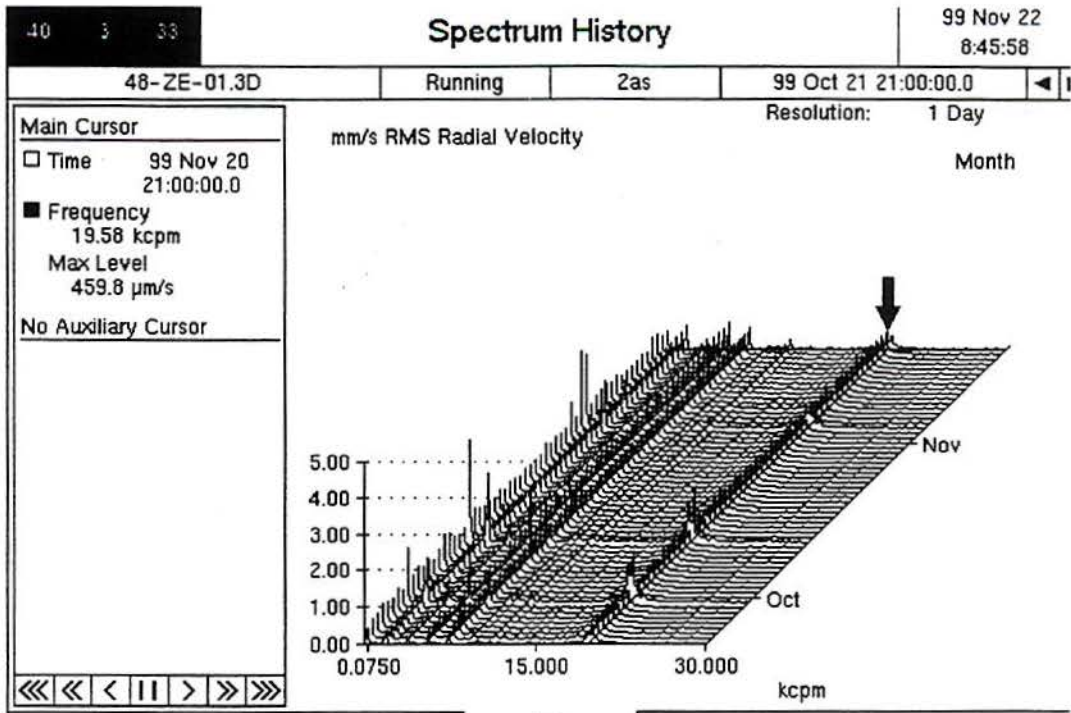


Figura 4.5.4. 48MVT01D - Cascata do autoespectro na qual não se percebe alteração causada pelo mancal.

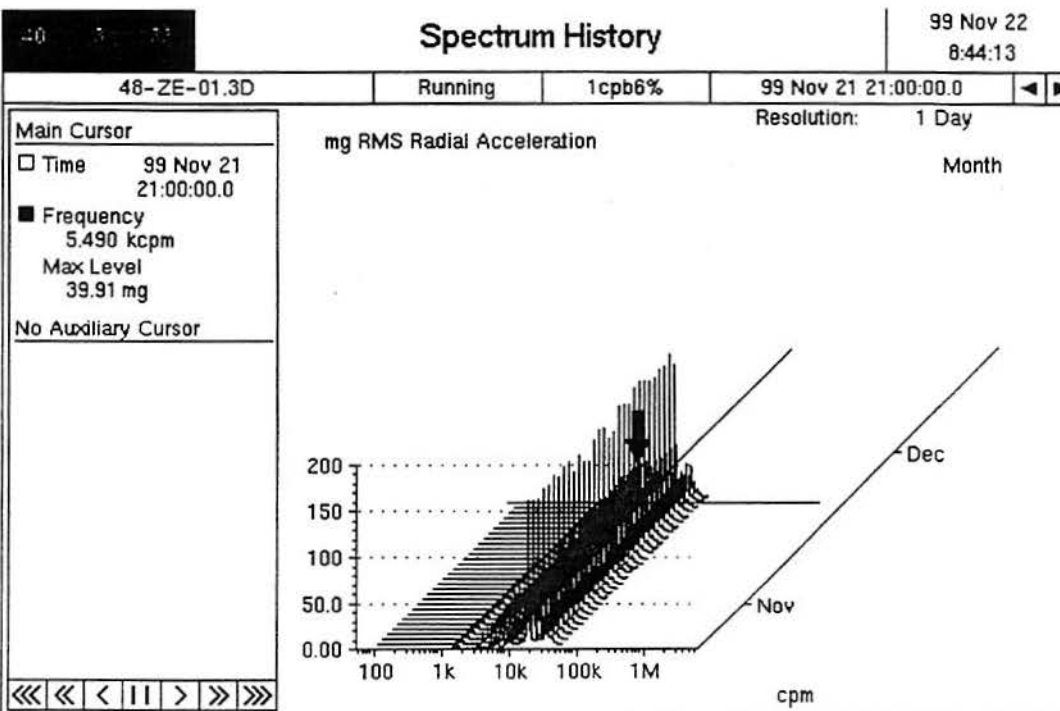


Figura 4.5.5. 48MVT01D - O espectro CPB6% igualmente não mostra alterações relacionadas ao mancal, mantendo-se estável antes e após a intervenção.

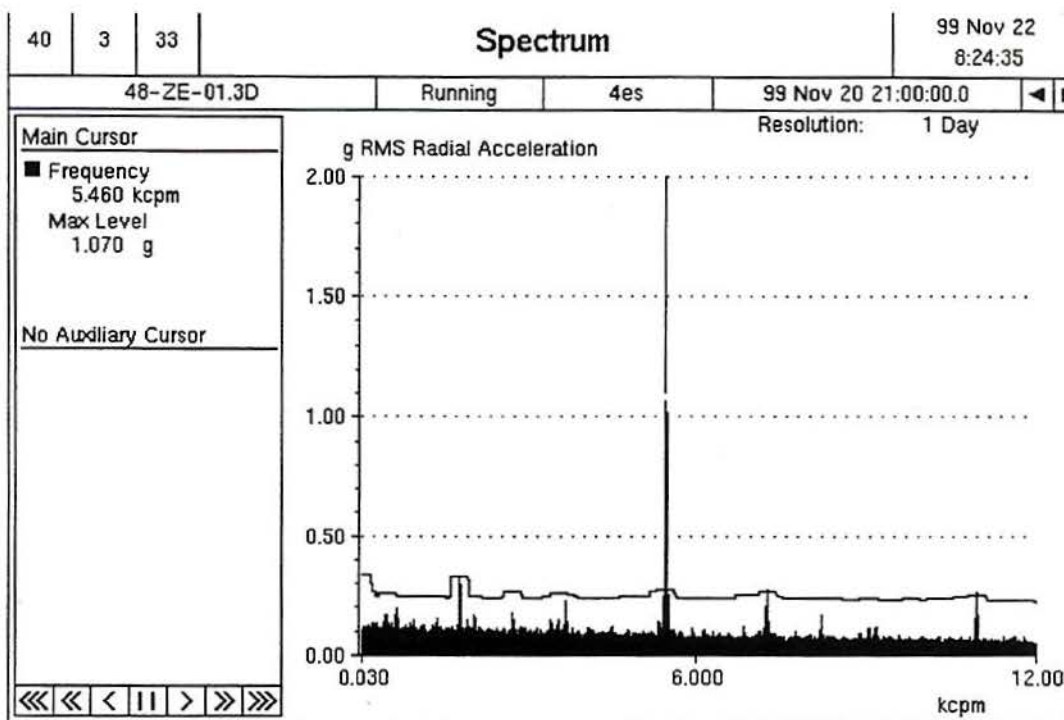


Figura 4.5.6. 48MVT01D - Espectro do envelope antes da intervenção.

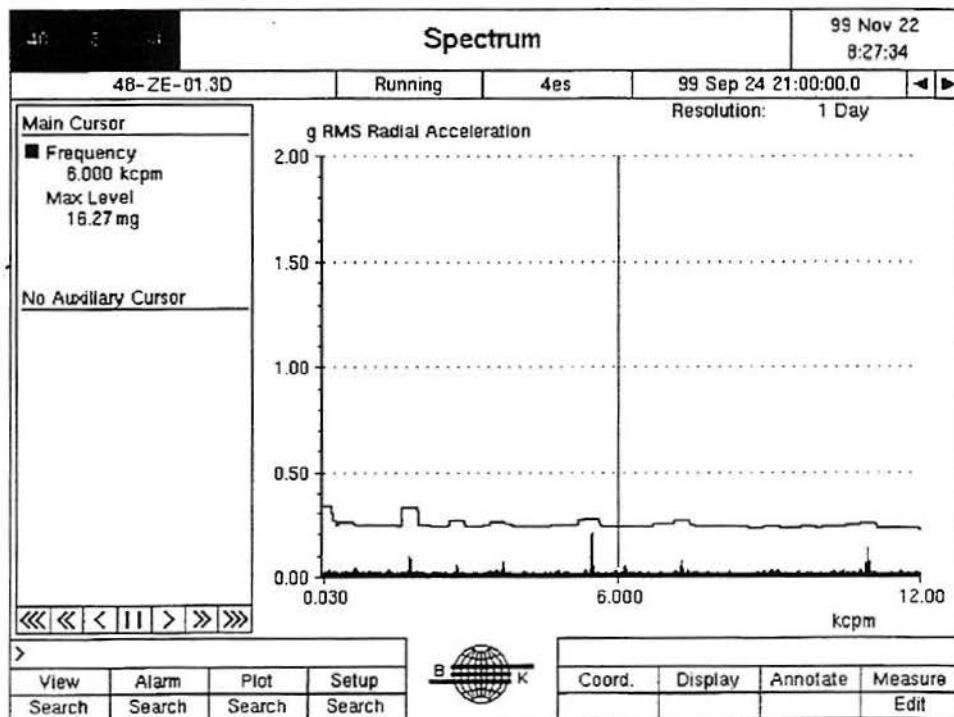


Figura 4.5.7. 48MVT01D - Espectro de envelope após a intervenção, com picos de pequena amplitude (máximo 0,2 g).

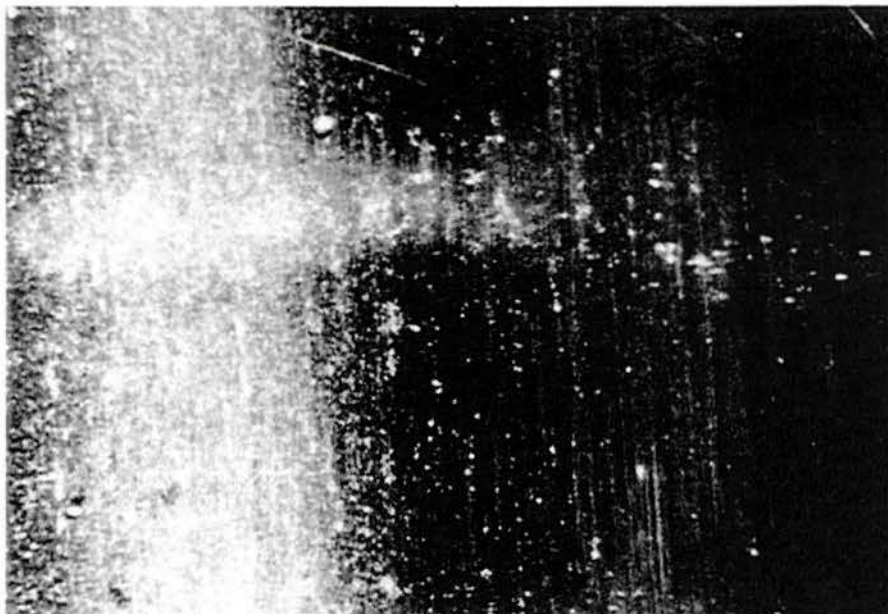


Figura 4.5.8. 48MVT01D - pista externa LOA - detalhe.

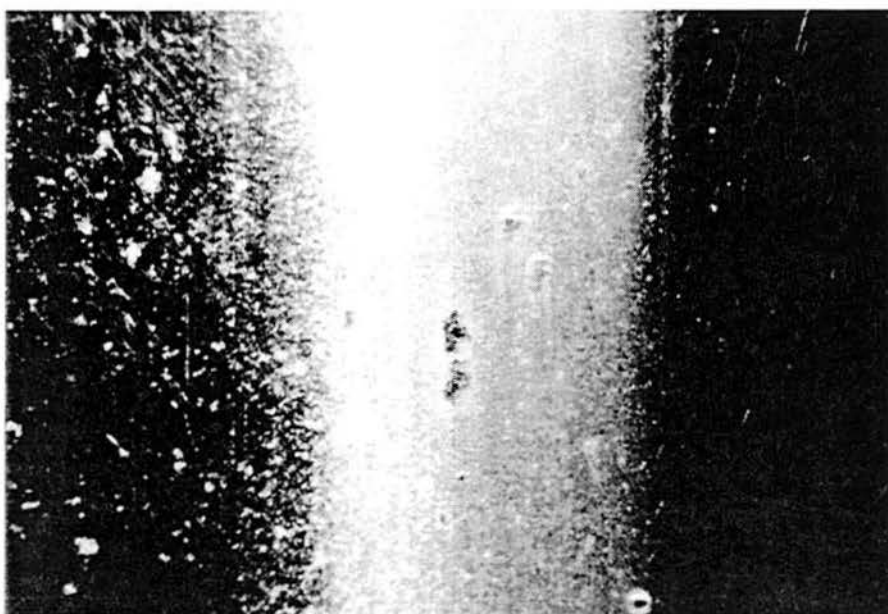


Figura 4.5.9. 48MVT01D - pista externa LOA, outro detalhe.

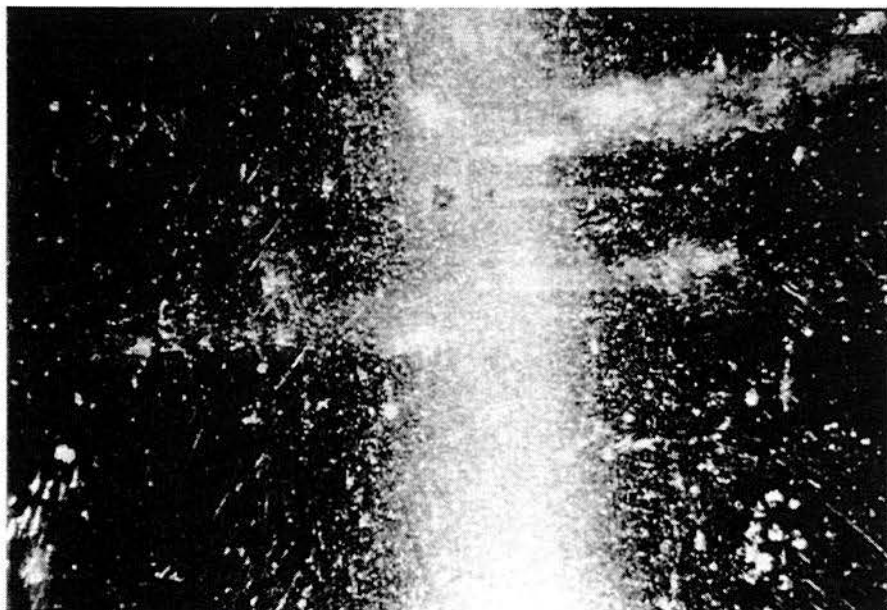


Figura 4.5.10. 48MVT01D - pista externa LA, detalhe.

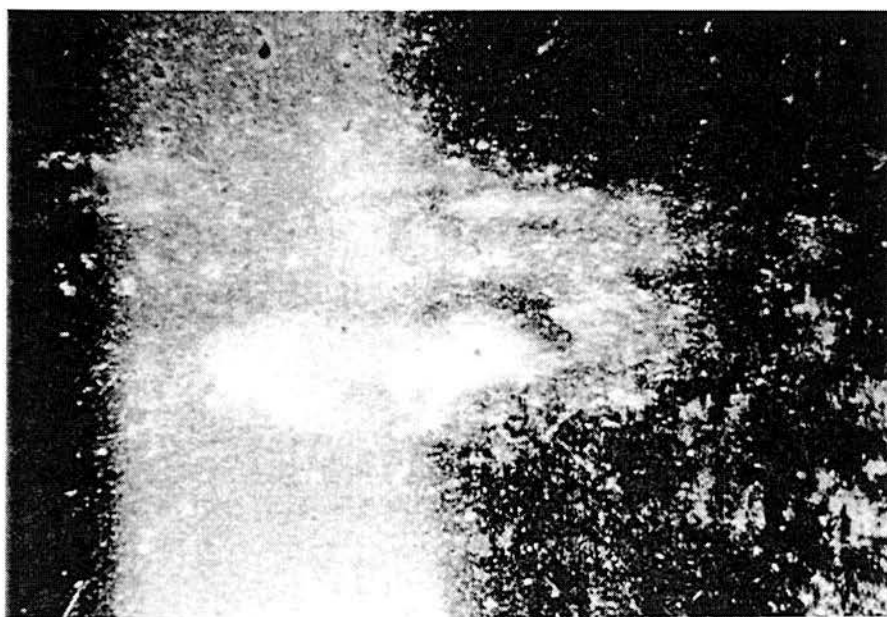


Figura 4.5.11. 48MVT01D - Pista externa LA, outro detalhe

4.6.MOTOR 48MVT01J

O motor deste ventilador, idêntico ao 48MVT01D (trabalha em paralelo com aquele, continuamente) apresentou uma ocorrência similar ao motor citado acima, ou seja, uma alteração no espectro de envelope e nenhum outro sintoma em valor global, autoespectro de alta ou baixa frequência. O defeito se desenvolveu ao longo de Janeiro de 2000. Este motor já operava há 3 anos sem nenhuma intervenção. A abertura e inspeção do rolamento no microscópio mostrou claramente o desenvolvimento de defeitos pequenos nas pistas dos rolamentos, bastante similares aos já descritos. Os rolamentos (na verdade o motor inteiro foi trocado por um motor completo reserva idêntico) foram substituídos e o espectro de envelope voltou a apresentar uma aparência anterior ao do início da falha, ou seja, somente um "carpete" de sinal, sem picos significativos. A similaridade entre os casos é interessante, pois sugere que este equipamento em particular, talvez por sua massa ou pela posição dos mancais, apresenta primeiro o sintoma de início de dano nos mancais através do espectro do envelope. É um fato marcante a total ausência de sintomas no autoespectro ou no espectro em altas frequências, em especial quando fazemos a análise dos mancais e dos defeitos evidentes que estes possuem. Os gráficos abaixo ilustram as afirmações.

Não foram colocadas fotos dos mancais, pois o tipo de dano se assemelha aos já ilustrados no caso anterior, ou seja, possui indicações clara de descontinuidades em progresso mas com tamanho físico ainda reduzido, o que limitava as demais manifestações físicas externas da falha.

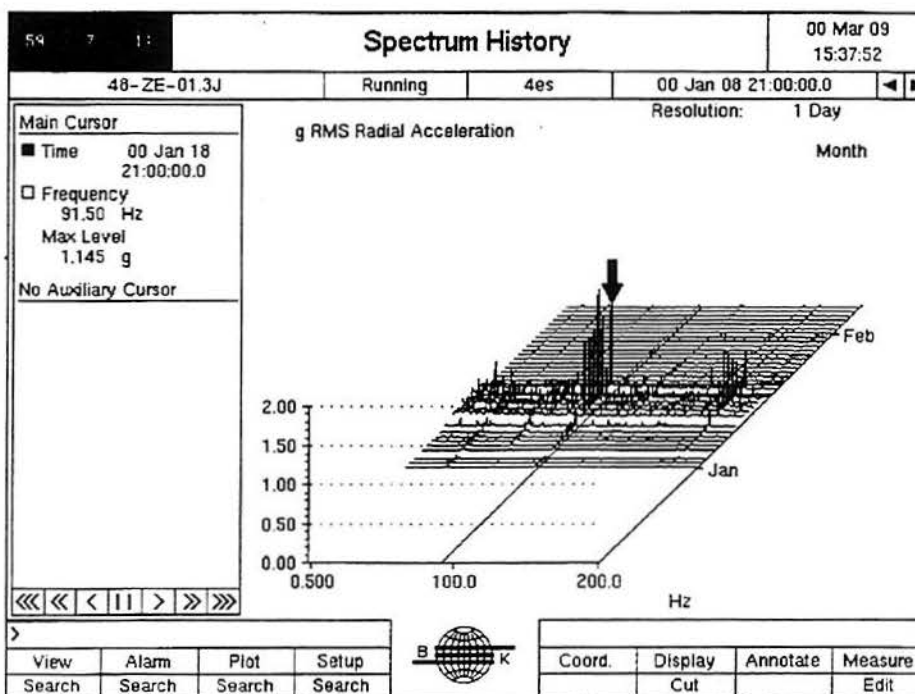


Figura 4.6.1. 48MVT01J - Espectro de envelope antes e após a intervenção.

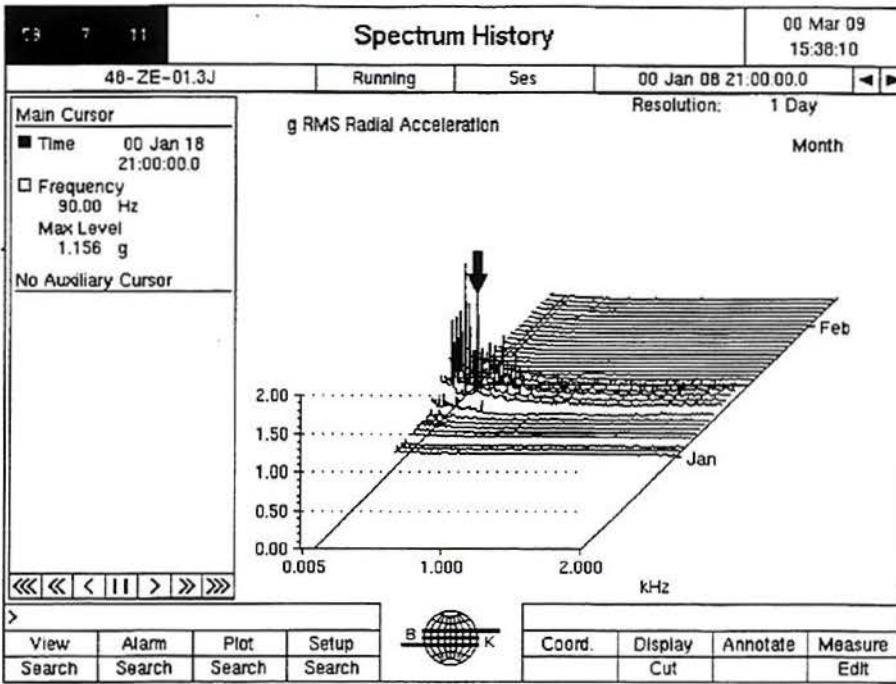


Figura 4.6.2. 48MVT01J - Cascata do "es" com uma faixa maior de frequências, antes e após a intervenção.

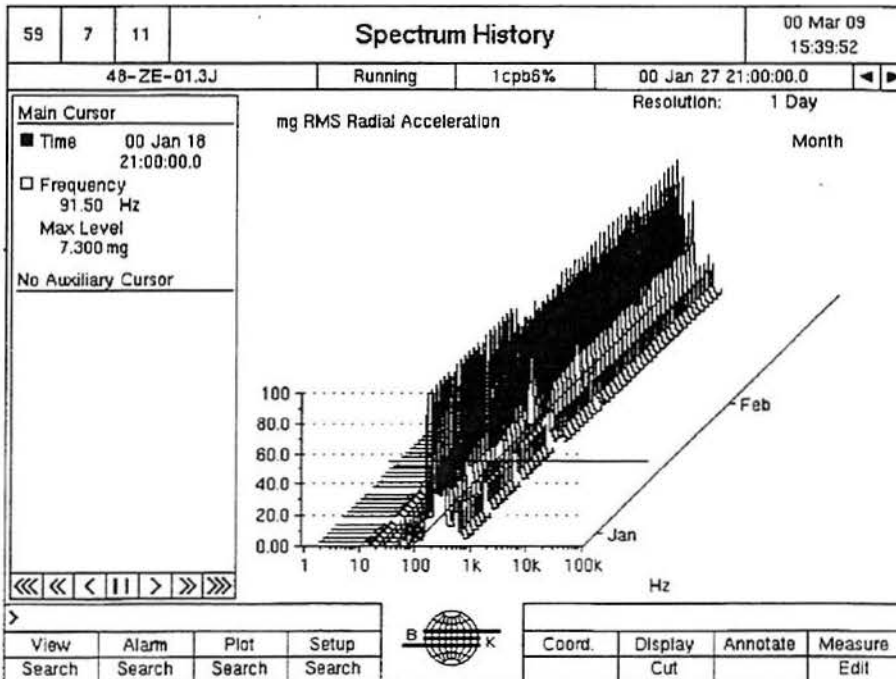


Figura 4.6.3. 48MVT01J - Cascata dos espectros CPB6% antes e após a intervenção, não apresentando indicação evidente do desenvolvimento da falha.

4.7.MOTOR 02MB05B

Motor elétrico trifásico de acionamento de bomba centrífuga horizontal de solvente com 3550 RPM, potência de 125 HP e com 60 Hz e 440 volts.

Mancal de rolamento do motor 02MB05B LA e LOA: SKF6316 C3;

Coefficientes de frequência de danos para os mancais do motor:

gaiola: 0,39 (1.385 RPM) ;

esfera: 2,1 (7.455 RPM);

esfera contra pista externa: 3,1 (11.005 RPM);

esfera contra pista interna: 4,9 (17.395 RPM);

Este motor foi diagnosticado como tendo indício de danos nos rolamentos, conforme a indicação do espectro de envelope, apesar de apresentar valores globais baixos e inalterados em relação à sua história. O diagnóstico foi feito em Novembro de 1999. O motor não sofreu intervenção de nenhuma espécie e o rolamento entrou em colapso em Fevereiro de 2000. Isto fez com que o bobinado do motor enfrentasse roçamento contra as partes estacionárias. Apenas o custo de recuperação do motor está estimado em cerca de R\$ 25.000,00. Esta situação ilustra uma ocorrência relativamente comum em motores elétricos. A monitoração de valores globais e eventualmente mesmo do autoespectro não mostra sinais claros de dano e a falha intempestiva ocorre, implicando grandes riscos e custos. Outro fato que o caso deste equipamento ilustra de maneira dramática é a intempestividade com que pequenos danos podem evoluir para o colapso total do equipamento, propagando o dano e possibilitando condições potencialmente catastróficas.

O valor global de vibração do motor neste caso indicou uma alteração em 10 de Novembro de 1999, passando de 1,4 mm/s para 2,3 mm/s, permanecendo nesta faixa de 2 mm/s até o colapso. O espectro do envelope estava bem alterado, conforme se vê abaixo, com vários picos destacados. O maior pico na zona de baixa frequência estava em 450 Hz. Os gráficos abaixo ilustram as análises indicando o defeito em desenvolvimento e a situação após o colapso e a substituição do equipamento. Não foi feita análise das pistas do mancal de rolamento pois uma vez em colapso, o dano se multiplica e torna-se impraticável definir qual dano já era pré existente e qual ocorreu durante ou após o colapso do componente. Esta análise torna-se supérflua também pelo fato do sinistro já confirmar de maneira espetacular o diagnóstico.

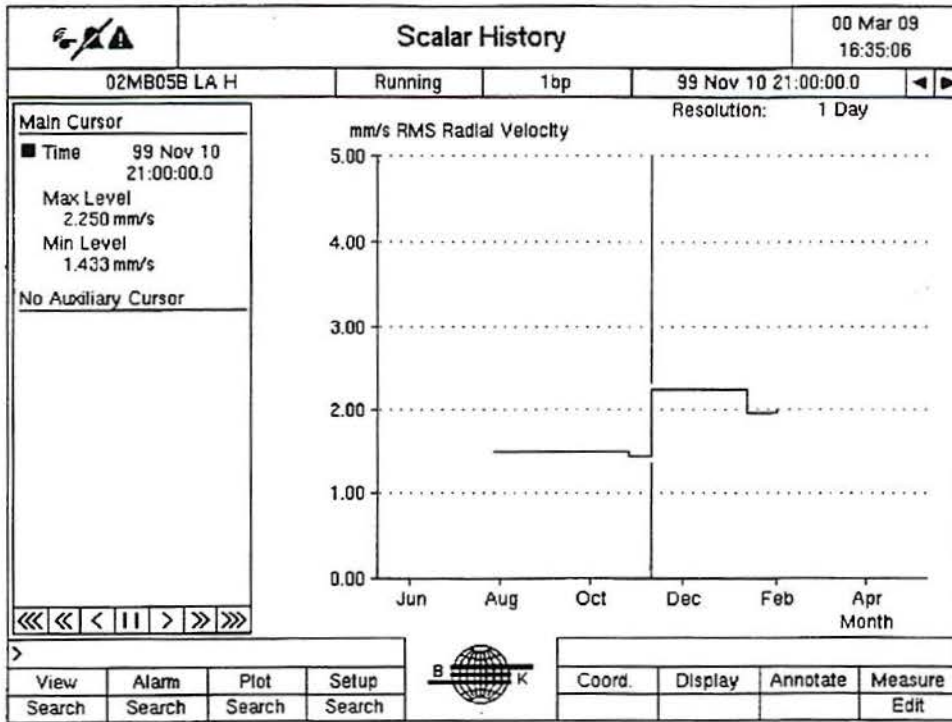


Figura 4.7.1. 02MB05B - Valor global até o colapso, com o cursor indicando a alteração de valor de 1,4 para 2,3 mm/s.

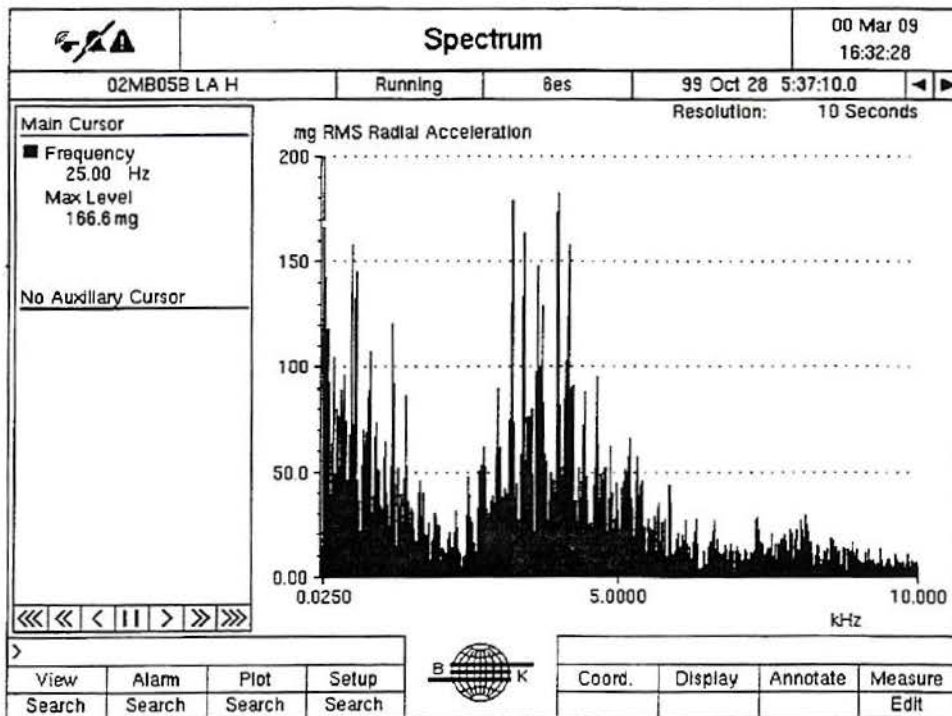


Figura 4.7.2. 02MB05B - Espectro de envelope antes do colapso.

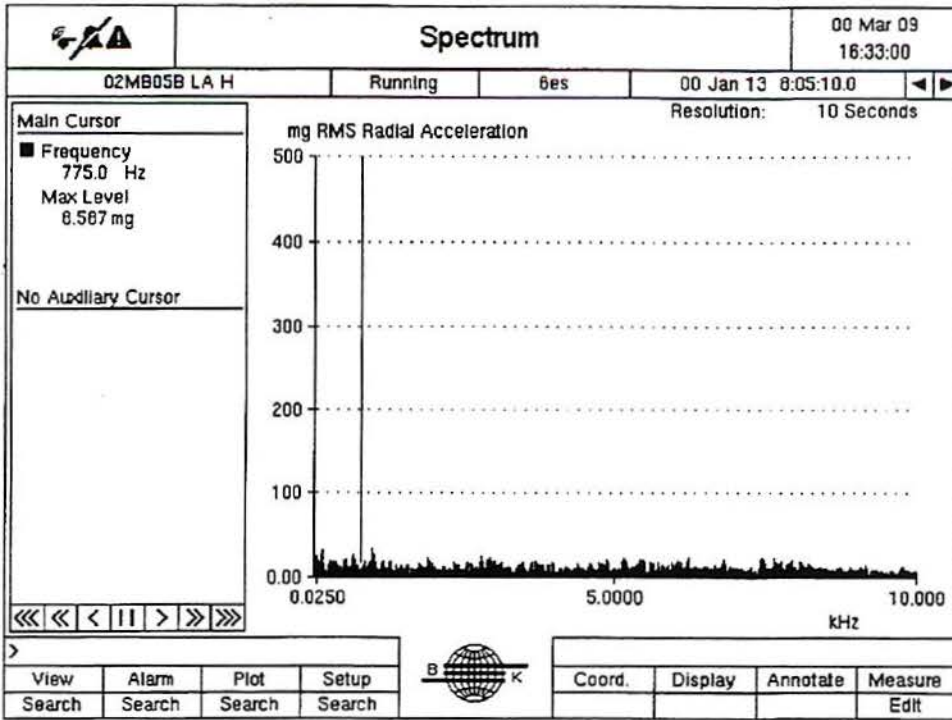


Figura 4.7.3. 02MB05B - Espectro de envelope após o reparo do equipamento (condição como novo).

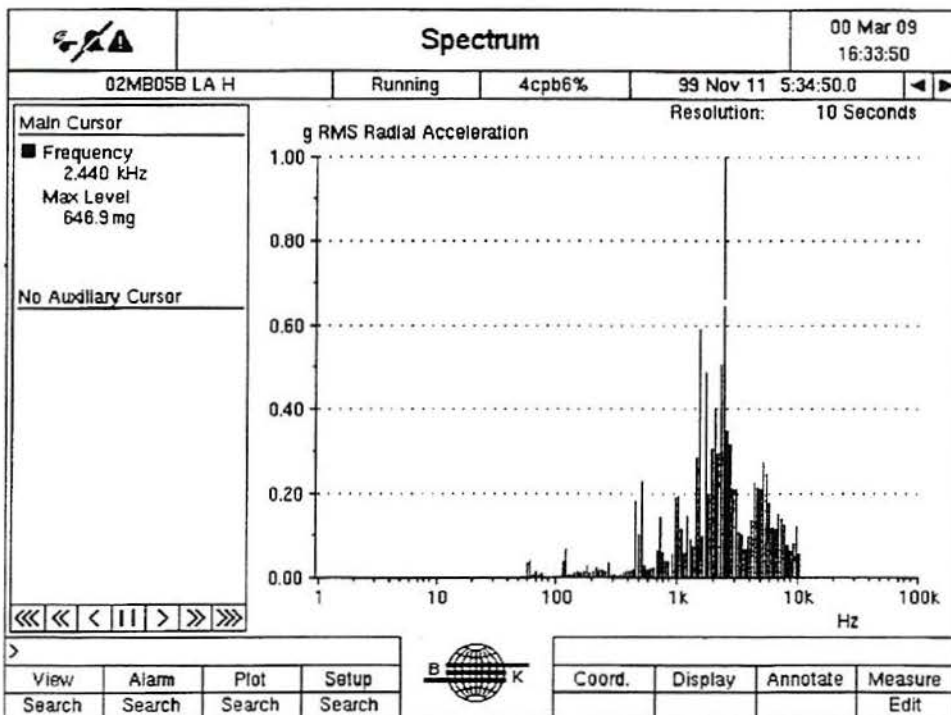


Figura 4.7.4. 02MB05B - CPB6% antes do colapso.

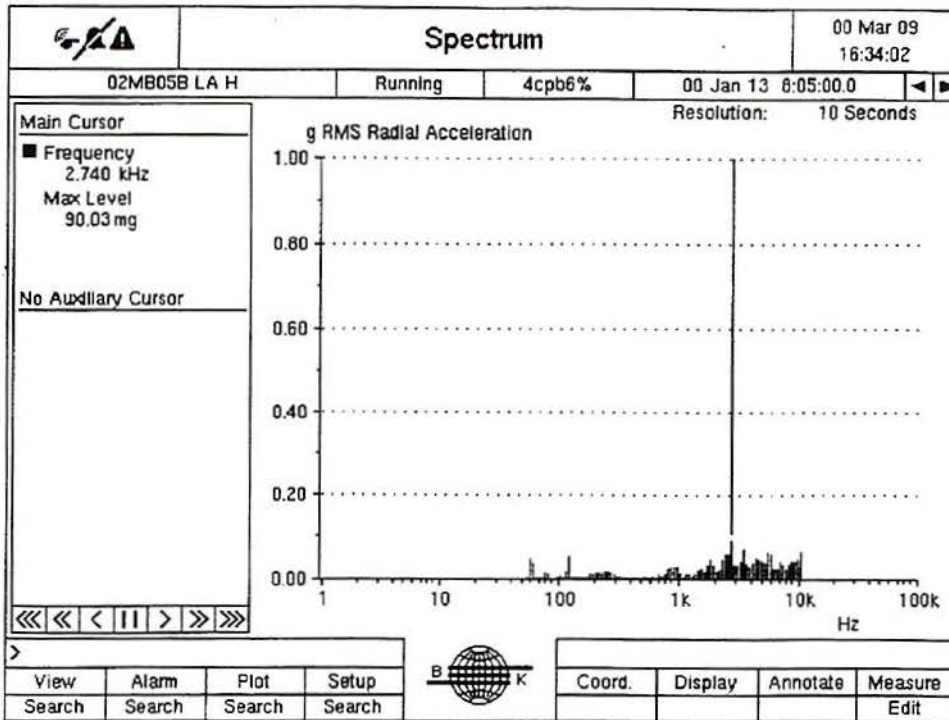


Figura 4.7.5. 02MB05B - CPB6% após reparo.

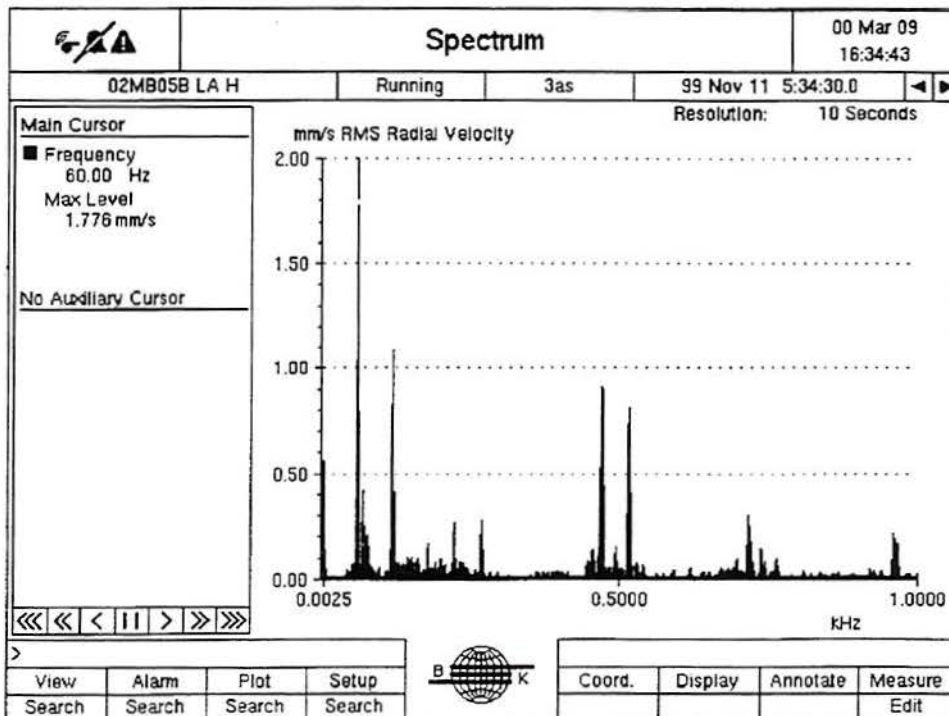


Figura 4.7.6. 02MB05B - Autoespectro antes do colapso.

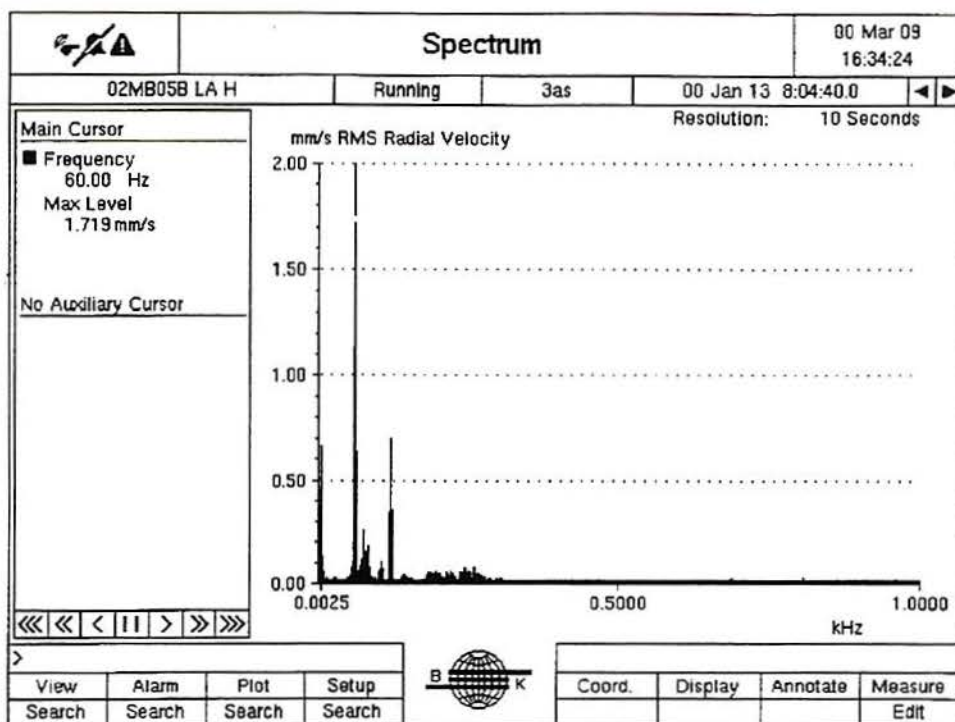


Figura 4.7.7. 02MB05B - Autoespectro após reparo.

5. DISCUSSÃO DE RESULTADOS E CONCLUSÕES

5.1. CONCLUSÕES

Chega-se a várias conclusões importantes a partir da análise dos dados coletados:

- A primeira e mais elementar delas é que a simples leituras de valores globais não é suficiente para indicar deteriorações nas superfícies de contato dos mancais de rolamento em seus estados iniciais, apesar deste ser o recurso mais utilizado rotineiramente nos planos de manutenção sob condição. Como as leituras são realizadas nas carcaças dos equipamentos e não são conhecidas as funções de transferência das carcaças que contém os mancais, não é possível saber a atenuação que o sinal sofre no ponto escolhido para a leitura. Some-se a isso o fato de que a massa dos componentes dos mancais de rolamento que estão em contato é milhares de vezes menor do que a massa bruta das carcaças dos equipamentos, especialmente no caso de motores elétricos. Não é de espantar portanto que um mancal de rolamentos precise estar virtualmente destruído para causar uma alteração significativa nos valores globais tomados externamente ao equipamento, se é que isto chegará a acontecer antes do colapso total do componente.

- Um segundo ponto que se destaca é que ao tratar-se o sinal através da demodulação utilizando a Transformada de Hilbert, a detecção de defeitos em uma população de equipamentos pode ser feita de modo mais inequívoco e com mais antecedência do que utilizando o sinal não tratado no domínio da frequência. A necessidade de monitorar centenas de equipamentos torna essencial a antecedência no diagnóstico e a possibilidade prática de coletar os dados significativos em tempo hábil a fim de manter um ciclo de leituras que forneça um grau de confiabilidade global de população em um nível aceitável. Isto pode ser conseguido com aparelhos manuais de coleta com rotas de aquisição de dados e configurados de modo a coletar não apenas os valores globais, mas capazes de efetuar o espectro de Fourier e utilizar a Transformada de Hilbert no sinal de vibração. Todas estas análises podem ser realizadas tomando em média um minuto por ponto lido. Como se tem em cada equipamento, dependendo

de seu porte, de seis a doze pontos de leitura, considerando 3 pontos (horizontal, vertical e axial para cada vizinhança de mancal), um equipamento rotativo toma somente 10 a quinze minutos efetivamente para efetuar a coleta completa de dados. Podem ser lidos por uma pessoa em média cinco equipamentos por hora, ou quarenta por dia, o que é um valor suficientemente grande para permitir adquirir dados para grandes populações de equipamentos em um ambiente industrial.

- Este tipo de coleta de dados além de ser eficaz é viável de ser executada mesmo para uma unidade grande com grande número de equipamentos por uma única pessoa, desde que com o equipamento adequado.

- Deve ser citada a conveniência de se conhecer o mancal instalado e de se calcular as frequências esperadas para os tipos de danos possíveis, tornando a análise de espectros um exercício mais simples de relação causa e efeito. Para tanto é necessário conhecer as dimensões físicas dos mancais conforme definido na Figura 3.4.1 e aplicar as equações (36), (37), (38) e (39).

- Outra observação relevante é que mesmo pequenos danos, praticamente imperceptíveis a olho nu, podem causar alterações no sinal de vibração, permitindo sua detecção.

- Sensores de boa qualidade, com sensibilidade adequada, altas frequências naturais próprias e uma larga faixa em frequências são fundamentais, pois os sinais esperados além de serem de pequena amplitude, podem causar alterações tanto em baixas como em altas frequências. Limitações na faixa de frequências podem comprometer severamente o resultado das análises.

- O método de fixação do sensor no equipamento, pelo fato de alterar a faixa de frequências que pode ser lida sem distorções, é fundamental para a qualidade dos dados adquiridos. Testes simples realizados antes do início da coleta de dados para este trabalho confirmaram as informações da literatura. A utilização de sensores com base magnética ou fixação manual alteram significativamente as análises, enquanto a fixação rosqueada mantém a repetibilidade e precisão dos resultados.

- Pode-se concluir finalmente que a aplicação do procedimento proposto na coleta e análise de sinais pode efetivamente melhorar o diagnóstico do estado de mancais de rolamento

em grandes populações de equipamentos rotativos. Método e cuidados na especificação dos sensores, na fixação dos mesmos, na periodicidade da aquisição dos dados, no tratamento do sinal e no levantamento das características físicas dos componentes dos mancais são imprescindíveis. Considerando-se estes cuidados, os resultados das análises do espectro de envelope são significativamente mais eficazes para mancais de rolamento com danos nas superfícies de contato do que a simples coleta de valores globais e a aplicação direta da Transformada de Fourier no sinal coletado.

5.2.FUTUROS DESENVOLVIMENTOS

Dado o apresentado deste trabalho, algumas questões surgem como naturais desenvolvimentos dos resultados e conclusões obtidas. Podemos sintetizar as mais importantes como segue abaixo:

- Investigar a influência da banda de frequências no resultado do diagnóstico: foi utilizada a mesma faixa de filtro passa-banda em todas as análises, aproveitando toda a faixa admissível para os acelerômetros empregados. Faixas mais reduzidas podem ou tornar mais fácil de identificar os defeitos ou tornar menos confiável o diagnóstico, devido a perda de informação.

- Levantar de modo estatisticamente significativo a taxa de detecção de falhas do método de análise por envelope: como existe a possibilidade de coletar dados de um grande número de equipamentos, a continuação da aquisição a longo prazo de análises, diagnósticos e resultados pode permitir calcular uma taxa de confiabilidade geral pra o método baseada em critérios estatísticos.

- Como isolar a influência de outras ressonâncias que não sejam originadas nos mancais de rolamento (máquinas alternativas, redutores)? Nenhum dos equipamentos selecionados apresentou esta dificuldade no período amostrado, porém para uma população maior e ao longo do tempo certamente este problema se apresentará. Outras fontes de modulação em amplitude podem se superpor ao sinal do rolamento, indizundo a diagnósticos equivocados. Uma metodologia para identificar estes sinais indesejados deve ser estudada.

- Como as janelas de amostragem influenciam no resultado do espectro de envelope?

Assim como a Transformada de Fourier, a Transformada de Hilbert se desenvolve de menos a mais infinito. Estas janelas (hanning e outras) introduzem alterações no resultado das transformadas sob o ponto de vista numérico. Como estas alterações modificam o resultado da análise do espectro de envelope pode ser avaliada, possivelmente através de simulações numéricas.

- Qual o menor defeito que pode ser detectado? Descontinuidades

surpreendentemente pequenas foram detectadas. A ordem de grandeza da menor descontinuidade poderia ser investigada em uma bancada de testes. Um cuidado que deve ser tomado entretanto na confecção da bancada é que ela deve simular a função de transferência dos equipamentos reais, manter a relação massa do mancal pela massa do equipamento e manter a distância entre o sensor e o mancal observado na média dos equipamentos industriais rotativos encontrados na população de interesse.

6. BIBLIOGRAFIA

- Bendat, Julius S., e Piersol, A. G., 1986. "Random Data, Analysis and Measurement Procedures", Ed. Wiley-Interscience, 2ª edição, Nova Iorque, EUA.
- Babkin, A. S., 1972. "Mechanical signature analysis of ball bearings using real-time spectrum analysis", S-173, New York, EUA.
- Block, Heinz P., "Handbook of Loss Prevention", 1978, pp. 137-140, Allianz Versicherungs AG, Springer Publishing, Berlin, Alemanha.
- BK Technical review 1987, N°1, Dinamarca.
- BK Artigos Profile Dezembro 1995, Dinamarca.
- Brüel & Kjaer application notes, "Detecting faulty rolling-element bearings". BO 0210-11, Dinamarca.
- BNC, 1988. Revista Orbit, Setembro de 1988, Volume 9 No. 1, pp. 20-22, EUA.
- BNC, 1989. Revista Orbit, Dezembro de 1989, Volume 10, No. 3, BNC, pp. 26-29, EUA.
- BNC, 1992. Bently Nevada Applications Note AN044-02, EUA.
- BNC, 1999. "Acceleration Enveloping – avoid it". Revista Orbit, pp. 499 envelop.htm, EUA.
- Clay, J., 1990. Revista Orbit, Junho de 1990, Volume 11, No. 1, BNC, pp 14-15, EUA.
- Finley, Howard F., 1995. "Equipment Reliability and High-tech Maintenance", Apostila do Seminário, EUA.
- Gerges, Samir N. Y., 1985. "Manutenção Preventiva: Um Estudo Sobre o Método de Curtose". VIII COBEM, São José dos Campos, São Paulo, Brasil.
- Ghosh, Malay e Rajamani, A., 1986. "Diagnostic Monitoring of Antifriction Bearings", Internoise 86, Cambridge, EUA.
- Herraty, A. G., 1993. "Bearing vibration - failures and diagnosis", Mining Technology", pg. 51-53, EUA.
- Hopson, Charles B., 1987. "Incipient Failure Detection of Space Shuttle Main Engine Turbopump Bearings Using Vibration Envelope Detection", 1995.
- Huddachek, R. J., e Dood, V. R., 1976. "Progress and Payout of a Machinery Surveillance and Diagnostic Program", - ASME PAPER, Petroleum Division, apresentado no Joint Petroleum Mechanical Engineering and Pressure Vessels and Piping Conference, Cidade do México, México.
- Imai, Yukio, 1993. "Diagnosis Technique of Rotary Machine with FFT Analyzer". Ono Sokki Co. Ltda., Data Processing Technology Department, Japão.

- Kowalczyk, Robert, e Myers, Clayton, Junho de 1991. Revista Orbit, Volume 12, No. 2, BNC, pp. 6-10 - Bently Nevada Corporation.
- Li, James C. e Wu, S. M., 1989. "On-line Detection of Localized Defects in Bearings by Pattern Recognition Analysis". Journal of Engineering for Industry, Vol. 111, pp. 331-336.
- McFadden, P. D., PhD, -1986 - "Condition Monitoring of Rolling Element Bearings by Vibration Analysis" - Department of Engineering Science, University of Oxford, Inglaterra.
- Martin, K. F. e Thorpe, P., 1992. "Normalised Spectra in Monitoring of Rolling Bearing Elements". Wear Magazine, vol. 159, pp. 153-160, Ed. Elsevier Sequoia, EUA.
- Moubray, John, 1997. "Reliability-centred Maintenance", Ed. Butterworth-Heinemann, 2ª edição, MA EUA.
- Myers, Clayton e Kowalczyk, Robert, 1991. Revista Orbit, Junho de 1991, Volume 12, No. 2, BNC, pp. 6-10, Bently Nevada Corporation, EUA.
- Nakajima, Seiichi, 1990 - IX Seminário Internacional de TPM & Quebra Zero, JIPM (Japan Institute of Plant Maintenance) - São Paulo, Brasil.
- Randall, R. B., 1987. "Frequency Analysis", Ed. K. Larsen & Son A/S para Brüel & Kjaer, 3ª edição, Dinamarca.
- Randall, R. B. e Bradshaw, P., 1982. "Early detection and diagnosis of machine faults on the Trans Alaska pipeline". Pp. 7-17, EUA.
- Ratcliffe, G. A., 1988. "Condition monitoring of rolling element bearings using the enveloping technique". Development Engineering International Limited, Southampton, Inglaterra.
- Rice, Stuart L. et alli, 1975. "Metals Handbook – ASM Committee on Failures of Sliding and Rolling-element Bearings", Volume 10, pp. 416-436, oitava edição, EUA.
- Riera, Jorge D., 1996. "Introdução à análise de vibrações em estruturas" – UFRGS. Porto Alegre, Brasil.
- Scheite, W. 1992. "Better Bearing Vibration Analysis" - Hydrocarbon Processing, pp. 57-64, EUA.
- Serridge, Mark, e Licht, Torben L., 1987. "Piezoelectric Accelerometer and Vibration Preamplifier Handbook", Ed. K. Larsen & Son A/S para Brüel & Kjaer, Dinamarca.
- Serridge, Mark, 1991. "Machine Condition Monitoring Group" - Turbomachinery International, pp. 40-48. Edição Julho/Agosto. Bruel&Kjaer, Naerum, Dinamarca..
- Shao, Yimin e Nezu, Kikuo, 1995. "An On-line Monitoring and Diagnostic Method of Rolling Element Bearing with Artificial Intelligence". SICE 95, Vol 1. Pp. 1543-1548, Sapporo, Japão.
- Timken Company, The, 1970. "How to Recognize and Prevent Tapered Roller Bearing Damage" - Canton, Ohio 44706, EUA.

- Toyota, Toshio, Dr., 1993. "How to Proceed Equipment Diagnosis". Japan International Cooperation Agency (JICA), Japão.
- Varga, G., 1990. "Vibration testing of machines and their maintenance", Elsevier NY pp. 84-121, EUA.

7. APÊNDICES

7.1.APÊNDICE I - PROGRAMAS EM MATLAB

Abaixo estão os programas em MatLab que geram os gráficos de aplicação da Transformada de Hilbert para diversas funções analíticas comuns. Estes gráficos estão no capítulo 3 e são aplicações diretas da definição da Transformada de Hilbert e do módulo da função resultante, também chamada de "envelope".

% Programa para plotar a transformada de Hilbert do cosseno e o envelope A

```
t=1:0.001:31.4;
a=sin(t)/t;
end;
```

```
b=imag(Hilbert(a));
bb=b(1:1000);
g=((a.^2)+(b.^2)).^0.5;
```

```
gg=g(14000:16000);
x=t(14000:16000);
aa=a(14000:16000);
```

figure

```
subplot(3,1,1),
plot(x,aa, 'b')
title('Cosseno')
axis([14 16 -1.5 1.5])
```

```
subplot(3,1,2),
plot(x,bb, 'b')
title('Transformada Hilbert')
axis([14 16 -1.5 1.5])
```

```
subplot(3,1,3),
plot(x,gg, 'b')
title('A(t) - "envelope" ')
axis([14 16 -1.5 1.5])
```



```
% Programa para plotar a transformada de Hilbert de sen(t)/t e o envelope e A(t)
n=0;
for t=0.1:0.1:120.4;
n=n+1;
a(n)=1/(1+t^2);
end;
```

```
b=imag(Hilbert(a));
bb=b(100:68000);
g=((a.^2)+(b.^2)).^0.5;
```

```
gg=g(10:68000);
%x=t(10:68000);
aa=a(10:68000);
```

```
figure
```

```
subplot(3,1,1),
plot(aa, 'b')
title('sint/t')
axis([19000 57000 -0.06 0.06])
```

```
subplot(3,1,2),
plot(bb, 'b')
title('Transformada Hilbert')
axis([19000 57000 -0.06 0.06])
```

```
subplot(3,1,3),
plot(gg, 'b')
title('A(t) - "envelope" ')
axis([19000 57000 -0.06 0.06])
```

```
% Programa para plotar a transformada de Hilbert de exp(a*t)*cos(2PI*f*t) e o envelope e A(t)
n=0;
for t=0.1:0.01:60.4;
n=n+1;
a(n)=(exp(-0.3*t))*cos(2*pi*t);
end;
```

```
b=imag(Hilbert(a));
bb=b(10:6000);
g=((a.^2)+(b.^2)).^0.5;
```

```
gg=g(10:6000);
%x=t(10:6000);
aa=a(10:6000);
```

figure

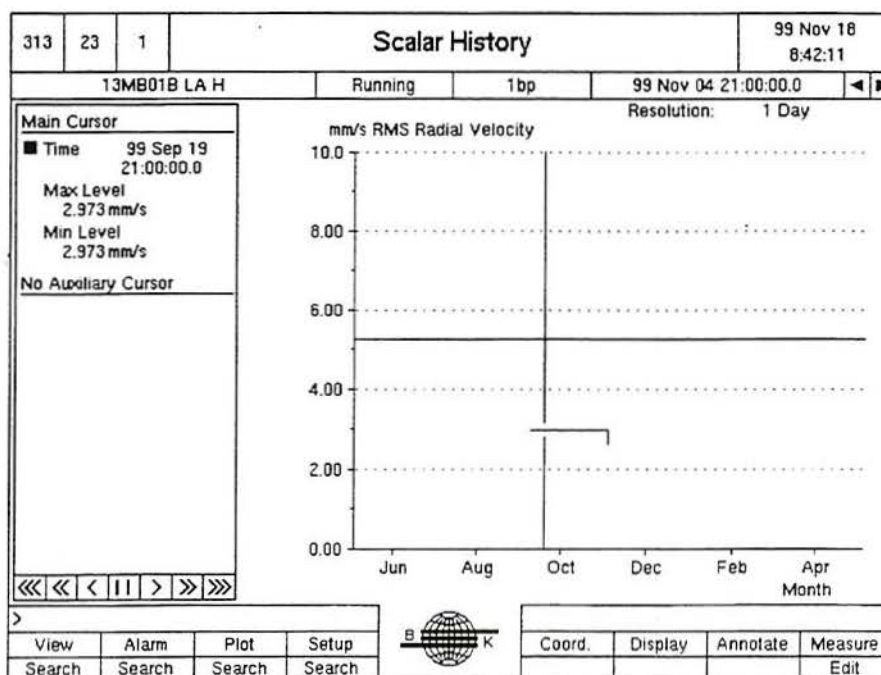
```
subplot(3,1,1),
plot(aa, 'b')
title('exp(-c.t)*cos(s.pi.f0.t) ')
axis([100 1200 -0.9 0.9])
```

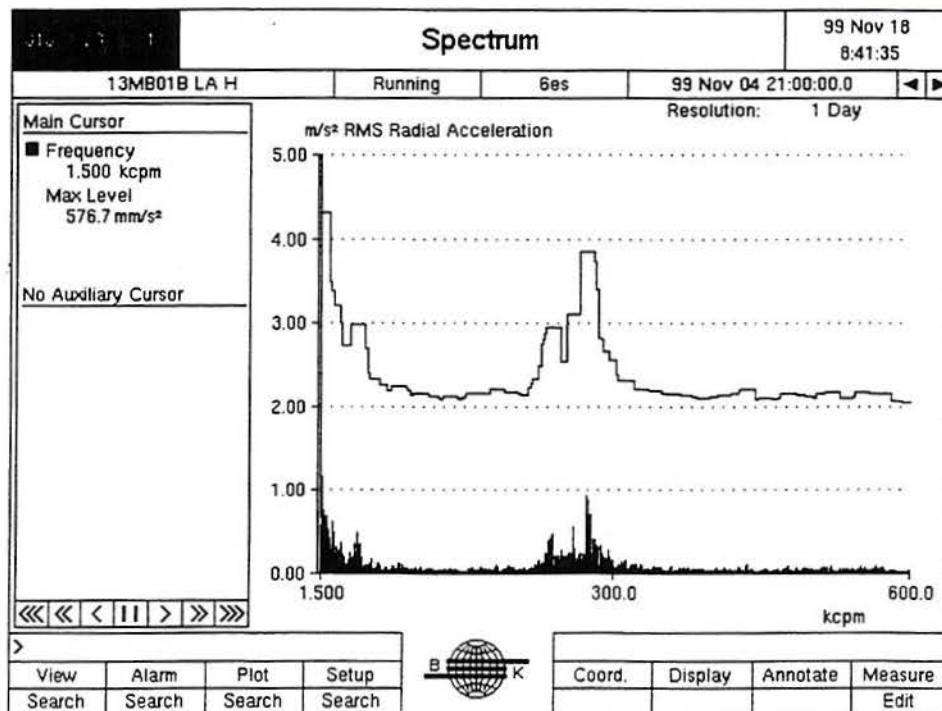
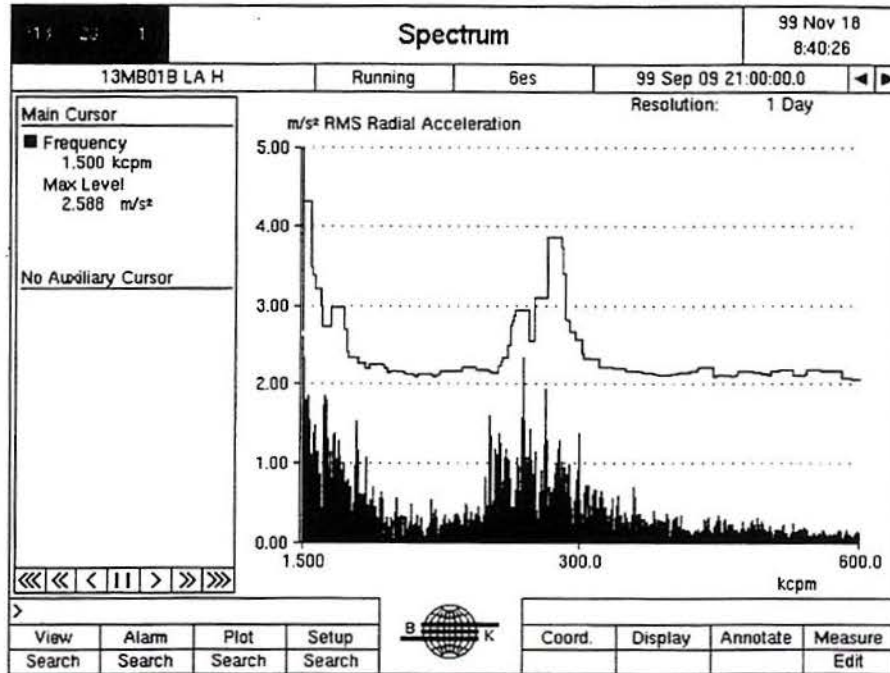
```
subplot(3,1,2),
plot(bb, 'b')
title('Transformada Hilbert')
axis([100 1200 -0.9 0.9])
```

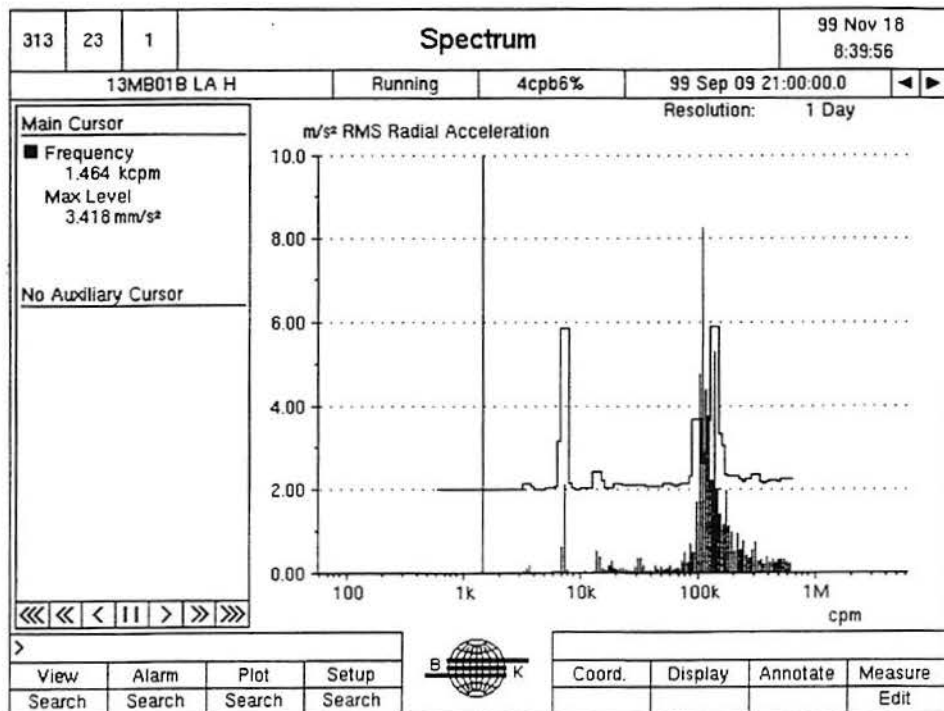
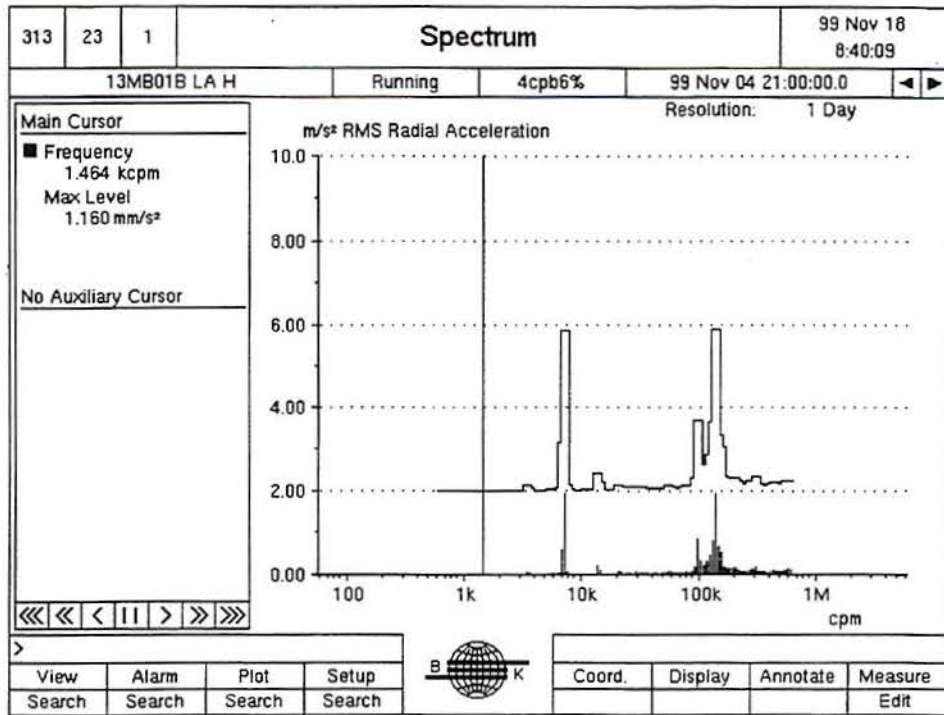
```
subplot(3,1,3),
plot(gg, 'b')
title('A(t) - "envelope" ')
axis([100 1200 -0.9 0.9])
```

7.2.APÊNDICE II - GRÁFICOS ADICIONAIS

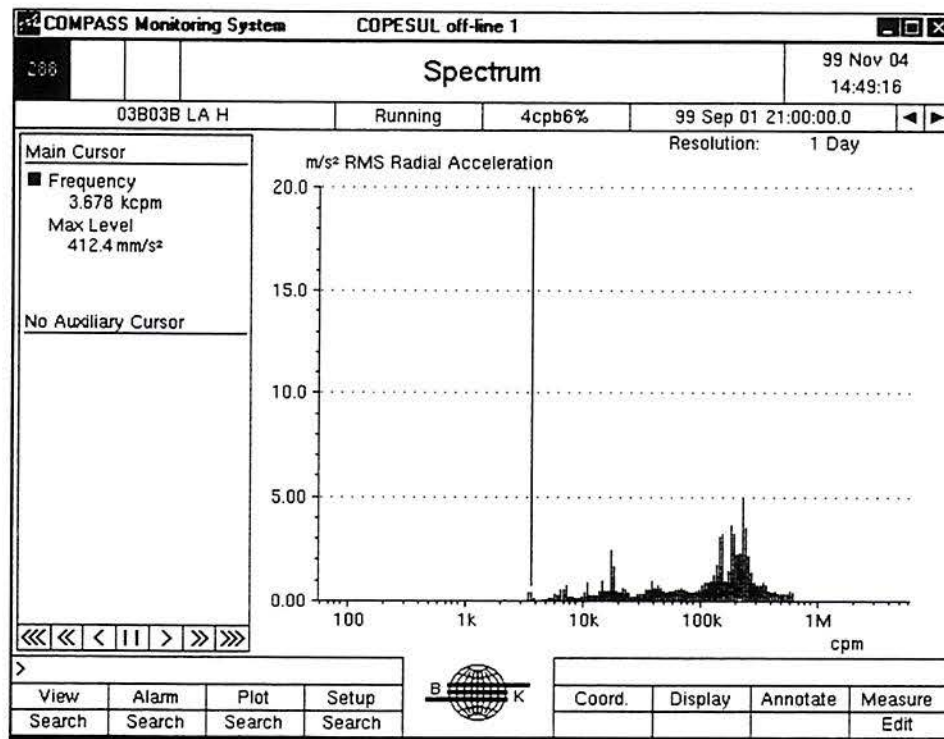
13MB01B – Espectros que mostram o reflexo do dano do rolamento da bomba e de sua substituição nos valores de vibração medidos no motor. Atentar para o fato de que os rolamentos do motor não foram substituídos. Os gráficos são autoexplicativos.



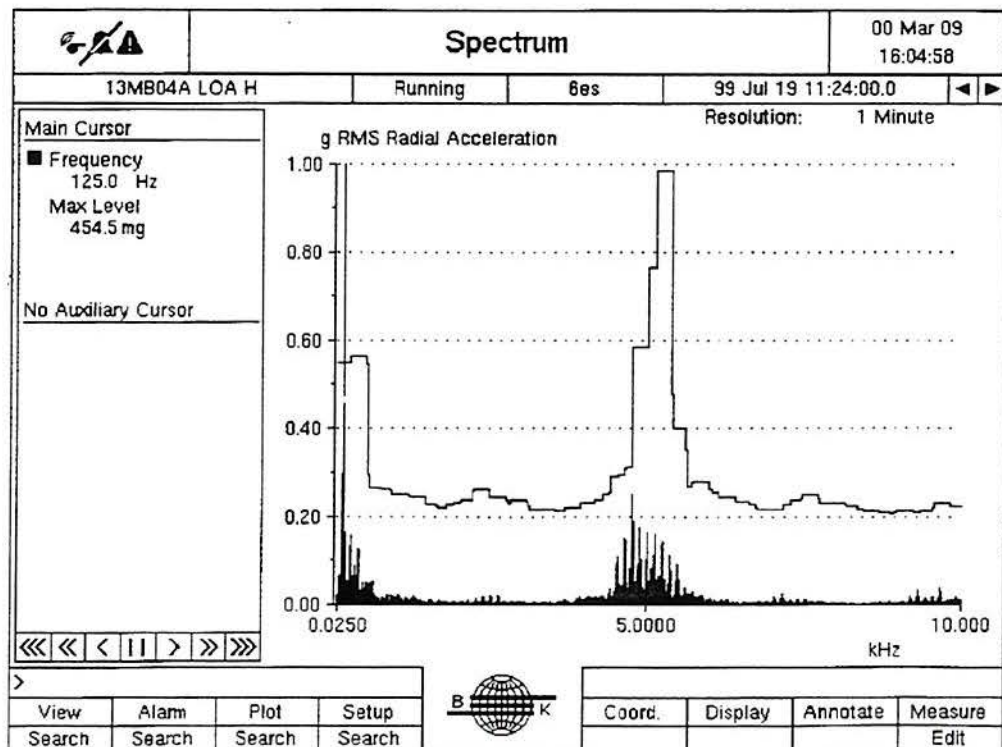


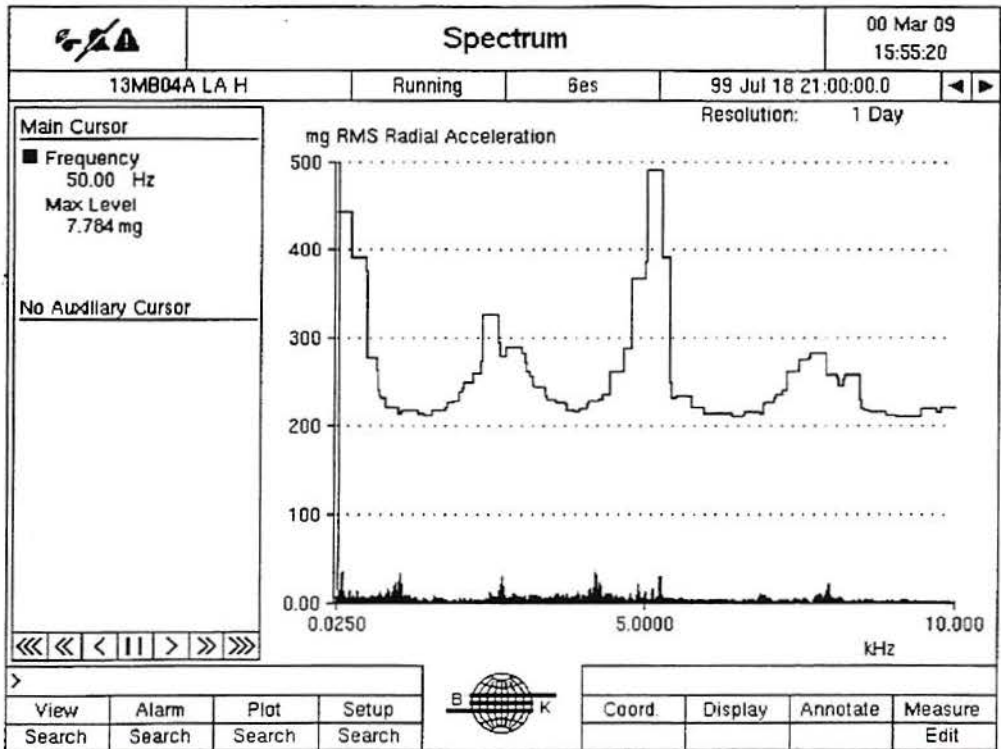
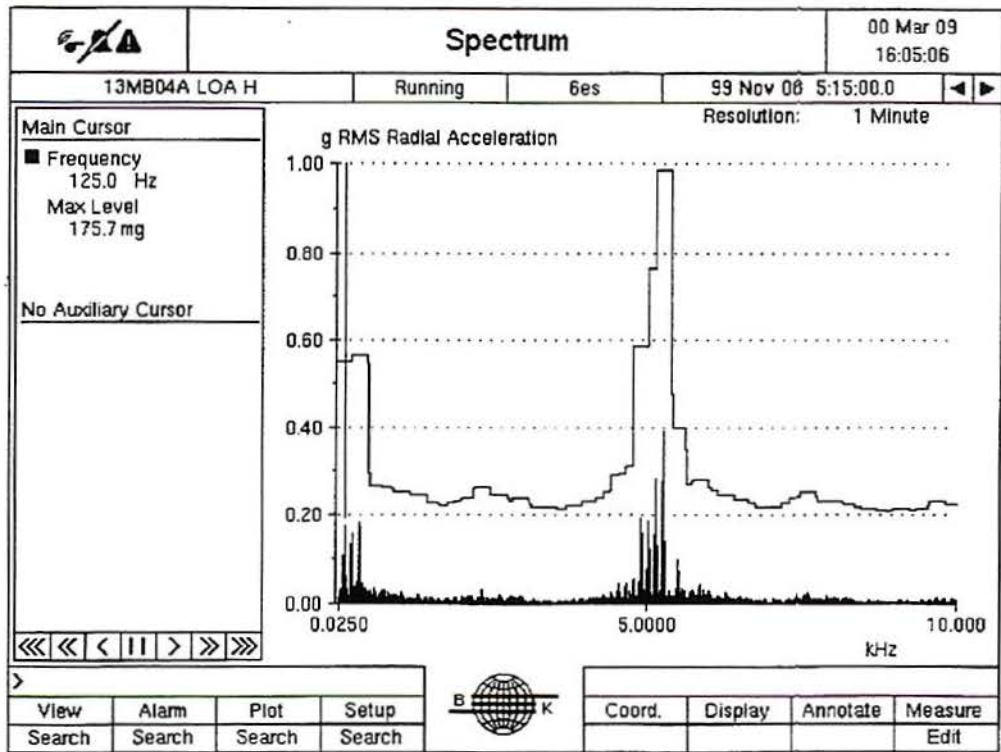


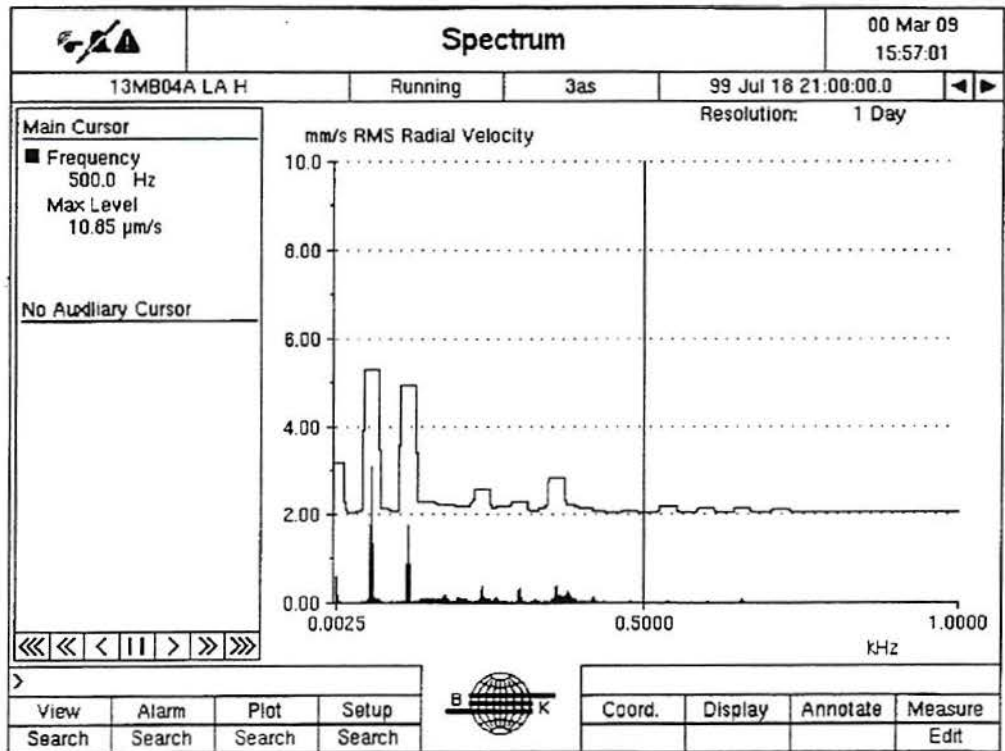
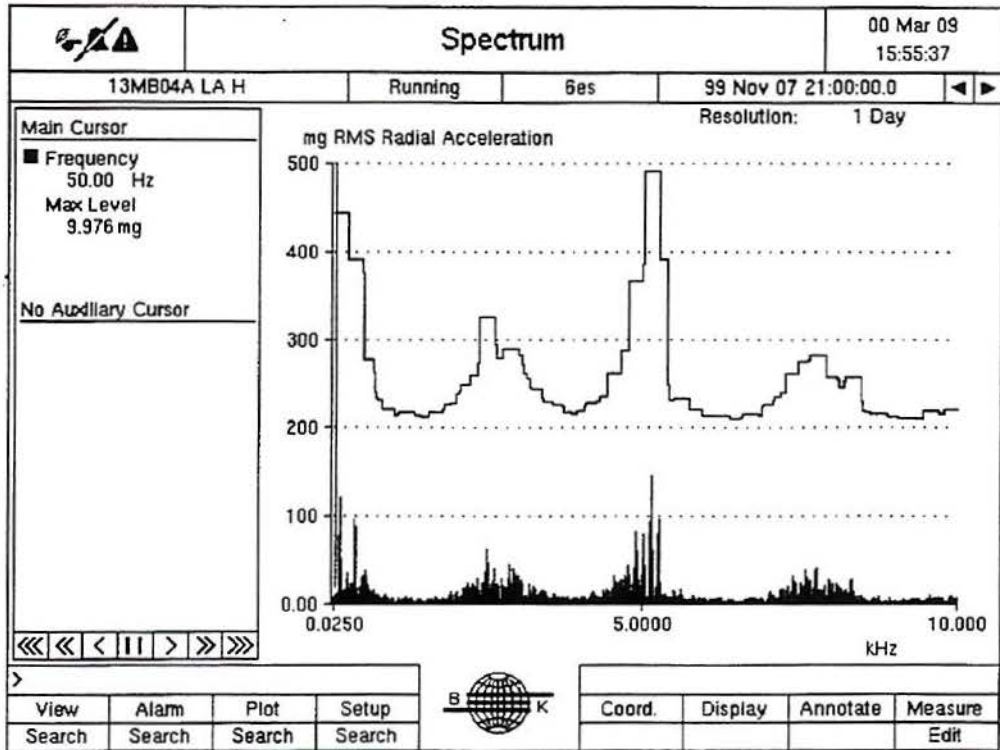
03B03B LA H – Abaixo está o Espectro CPB – Setembro 1999, da bomba, após a intervenção que substituiu mancais defeituosos no motor.

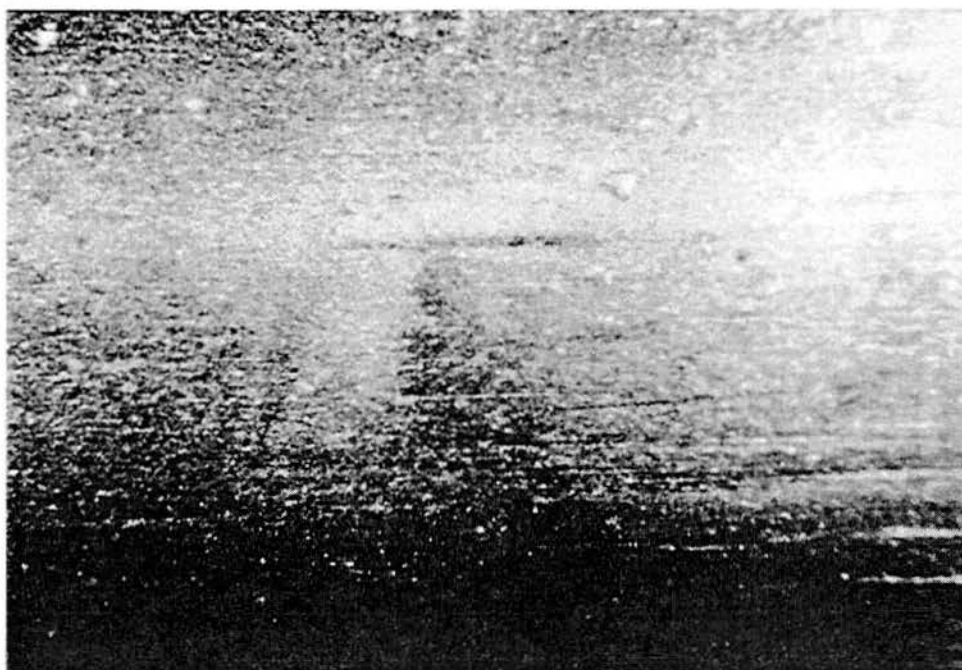
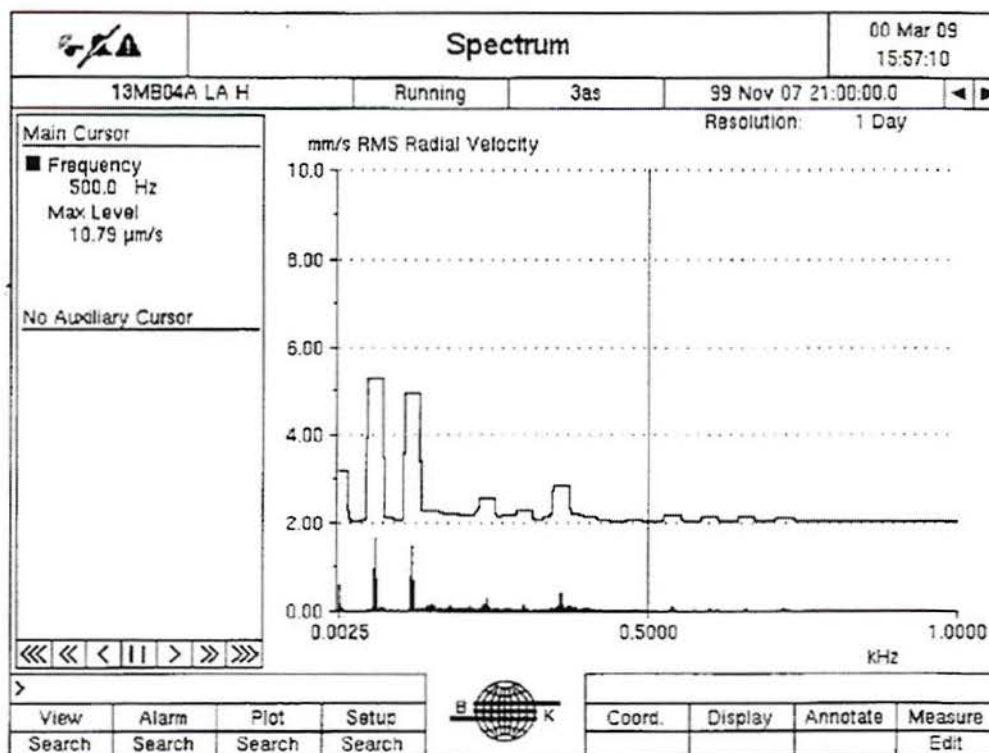


13MB04A LA e LOA – Detalhes dos espectros deste motor em ambos os lados do equipamento (lado acoplado e lado oposto ao acoplamento).



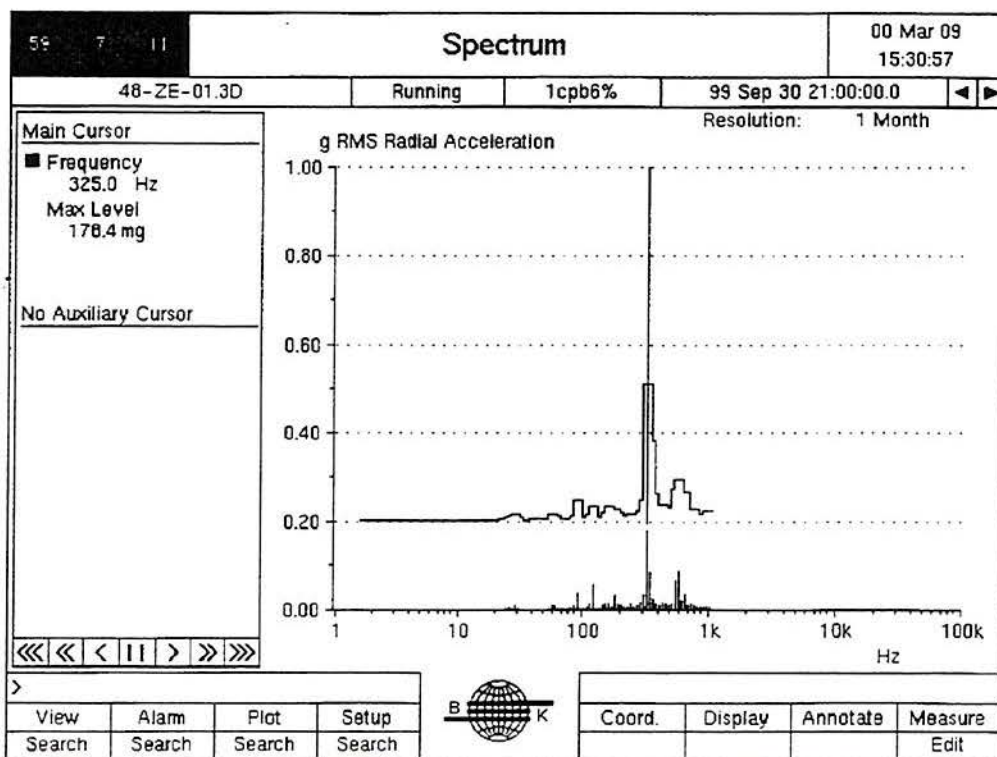
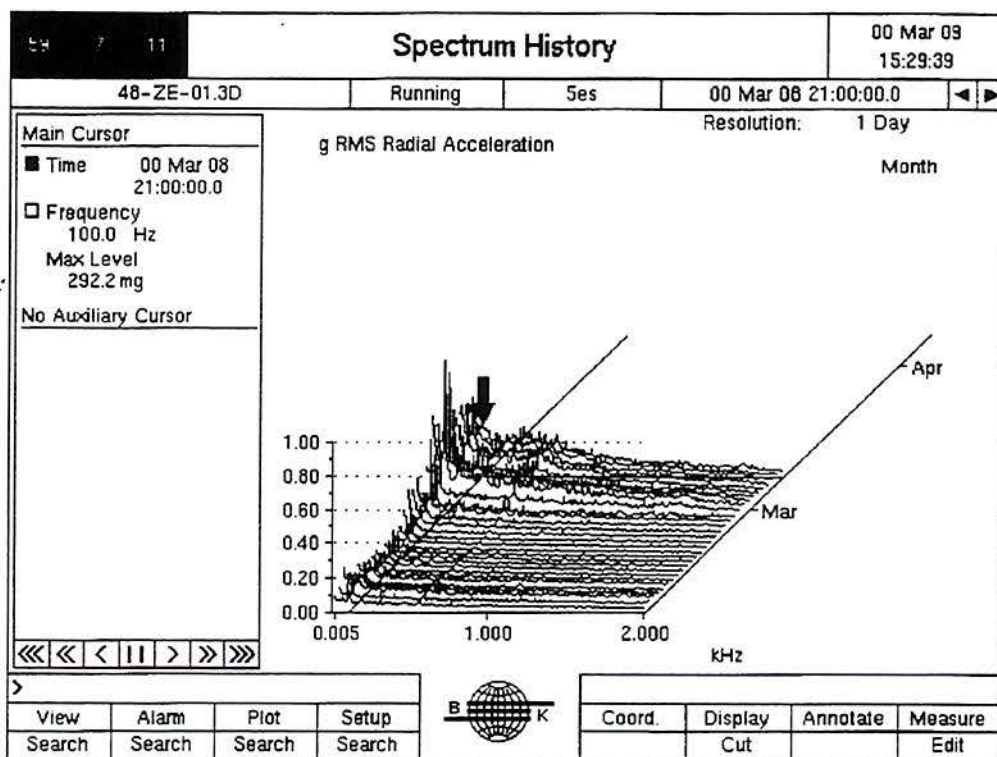




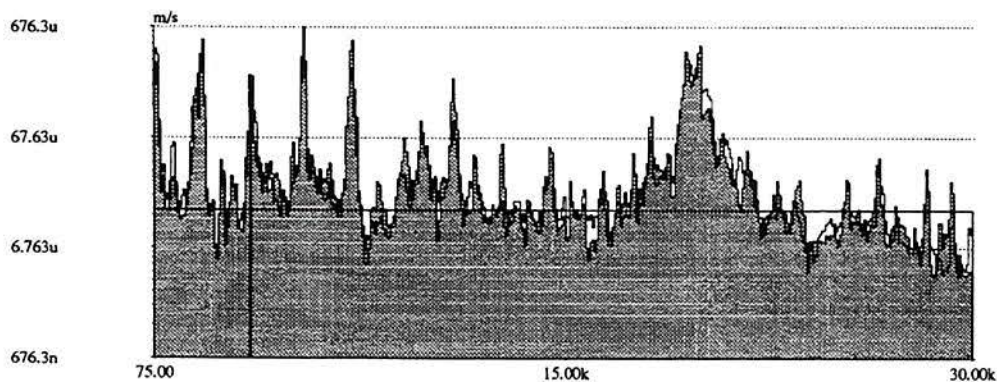


13MB04 – pista externa LA – detalhe de falha.

48MVT01D – Espectros com a evolução do dano e após reparo do mancal do motor.

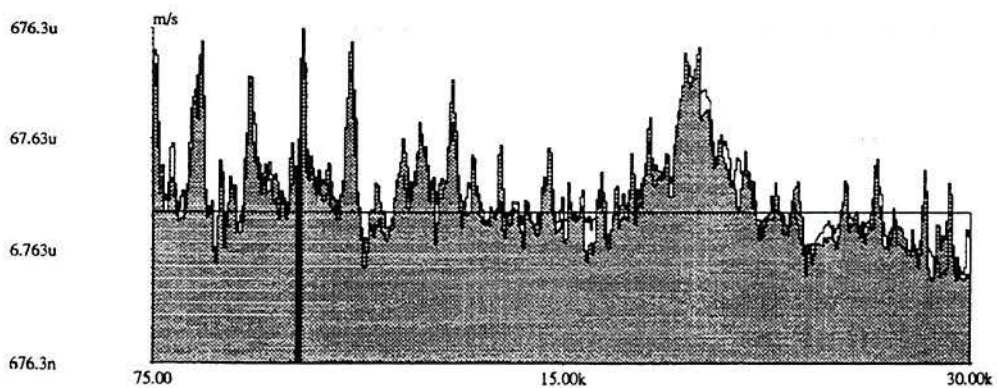


COPEsul
Engenharia de Manutencao e Avaliacao - Preditiva de Rotativos
ADVISOR v.1.10 - Diagnosis Report



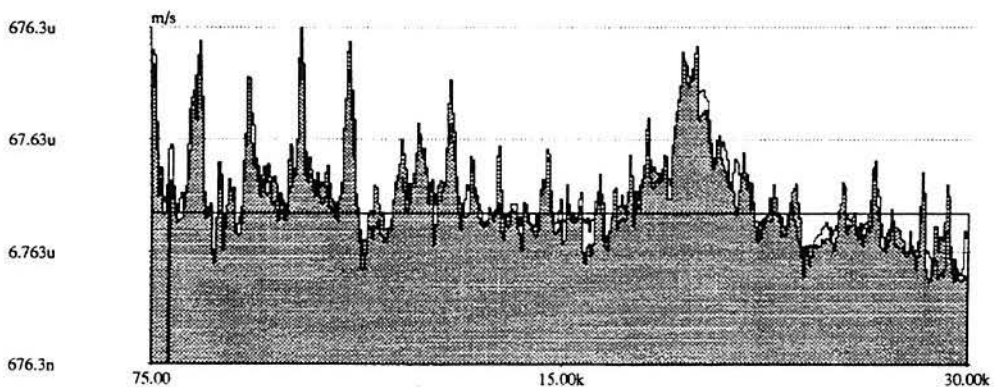
Component : R.E.B. Radial1
 Symptom : BSF-rel
 Value : 1.134dB

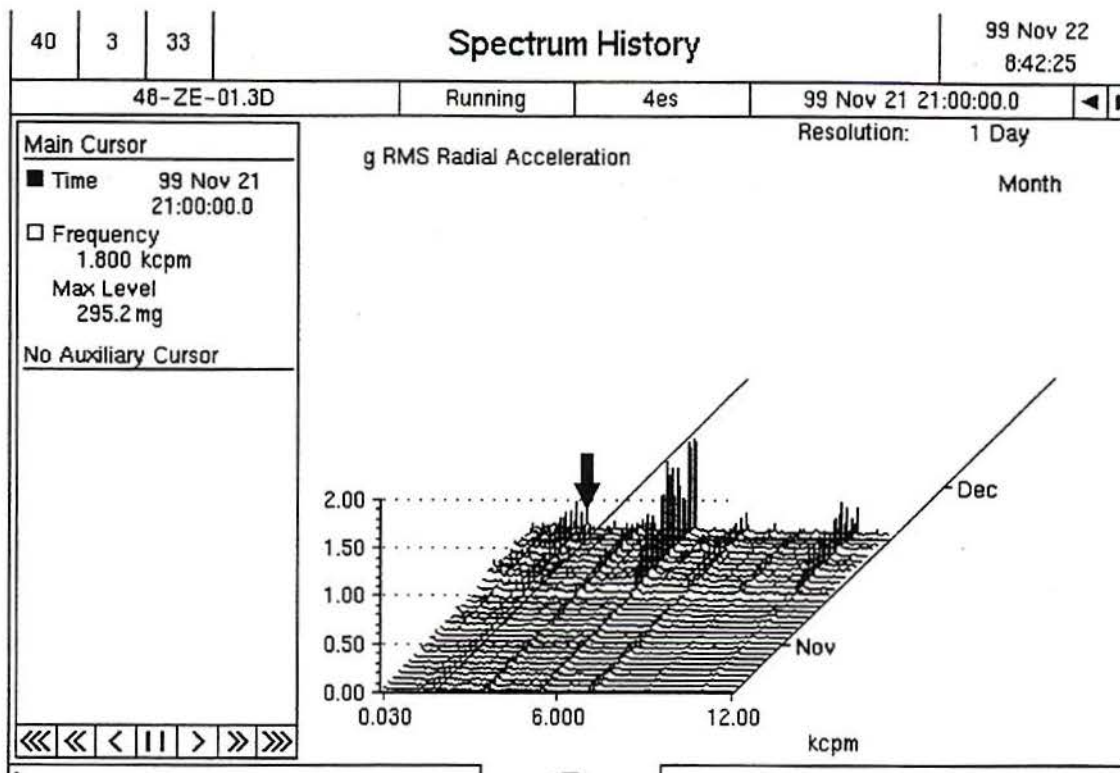
Transducer : 48-ZE-01.3D
 Measurement Name : 2as
 Date : 22 Nov 1999 - 09:12:11



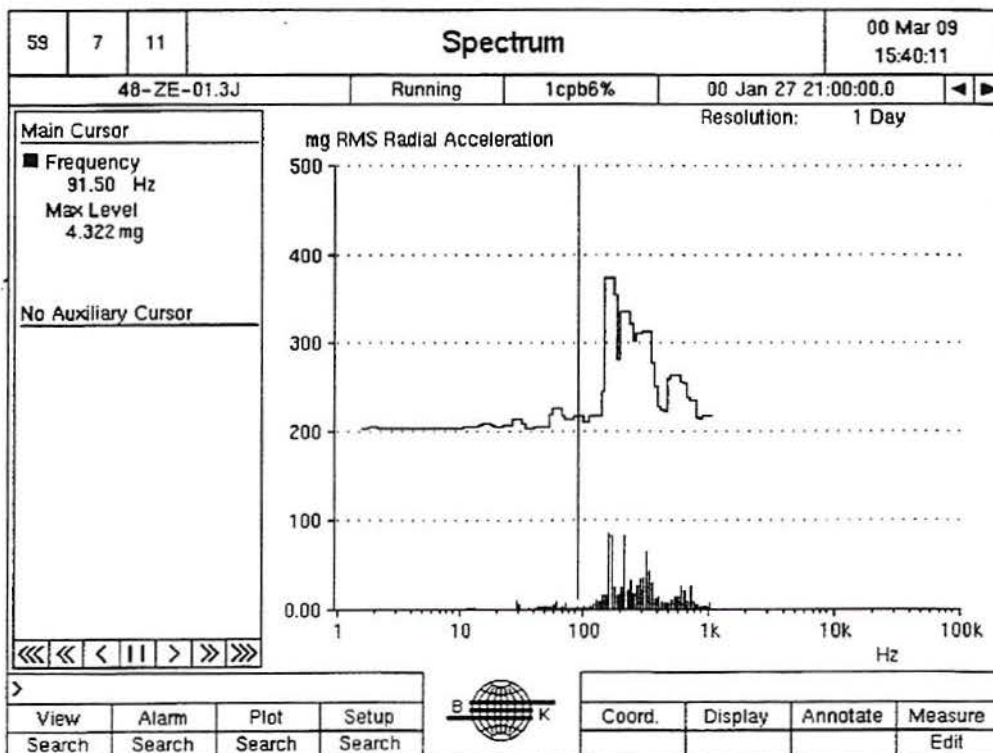
Component : R.E.B. Radial1
 Symptom : Band[BPFO-Slip, BPFO]-rel
 Value : -2.432dB

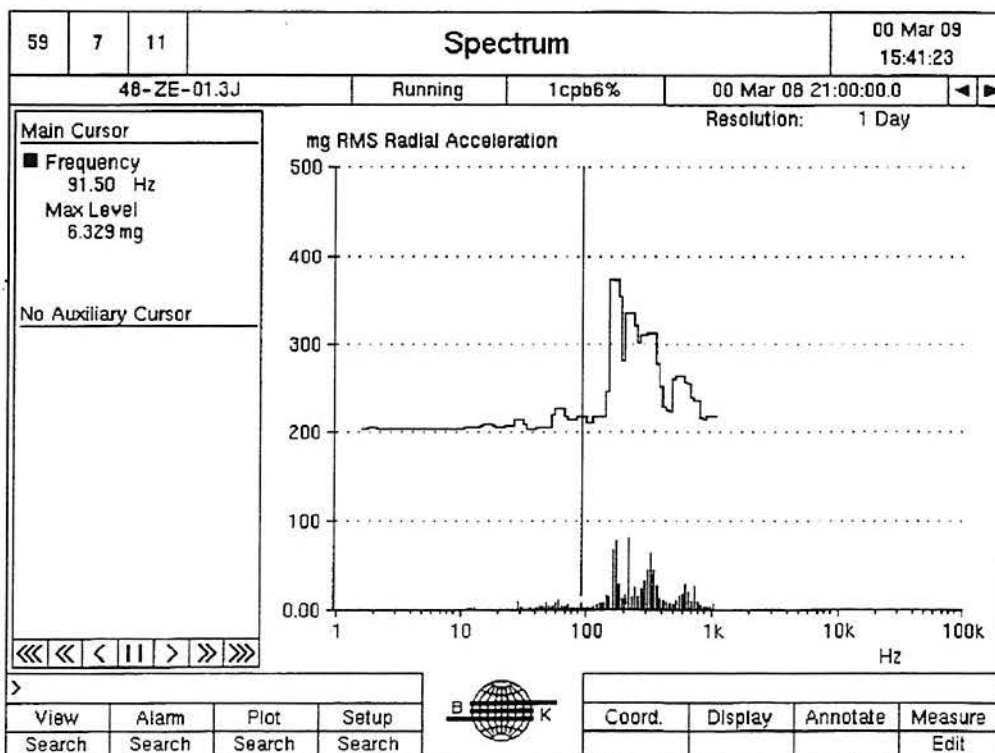
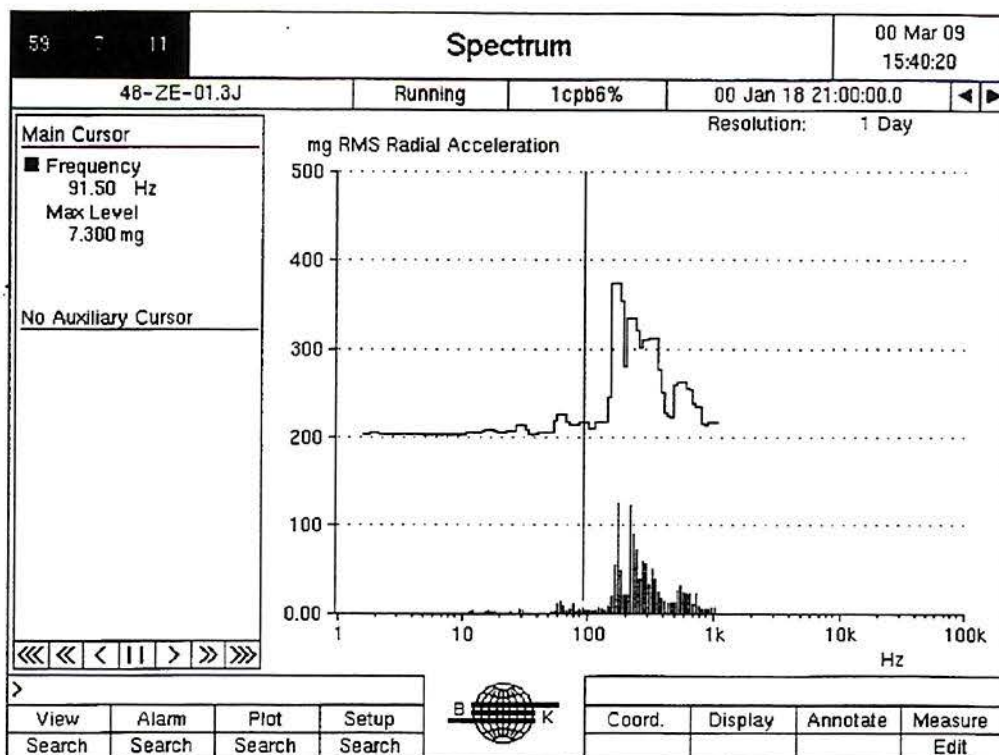
Transducer : 48-ZE-01.3D
 Measurement Name : 2as
 Date : 22 Nov 1999 - 09:12:11

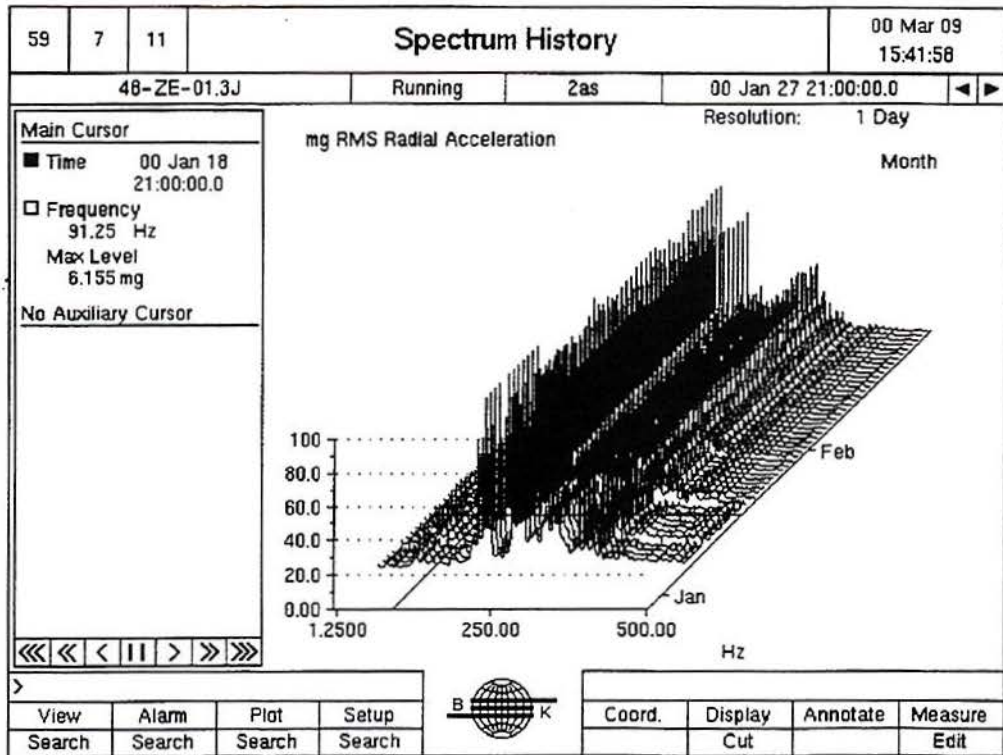




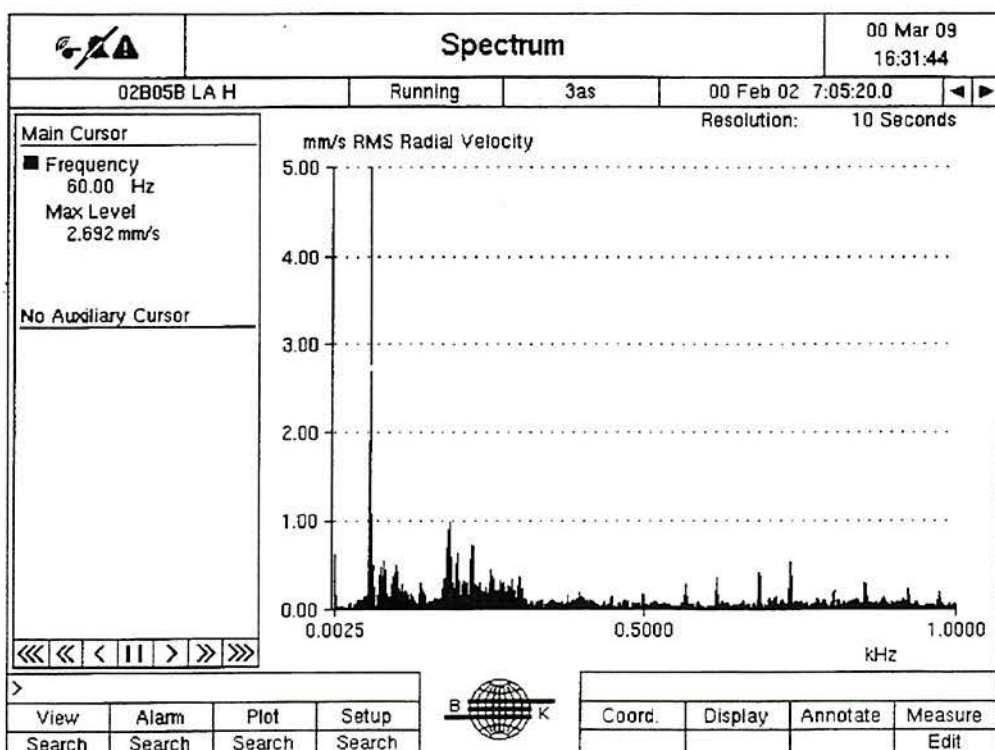
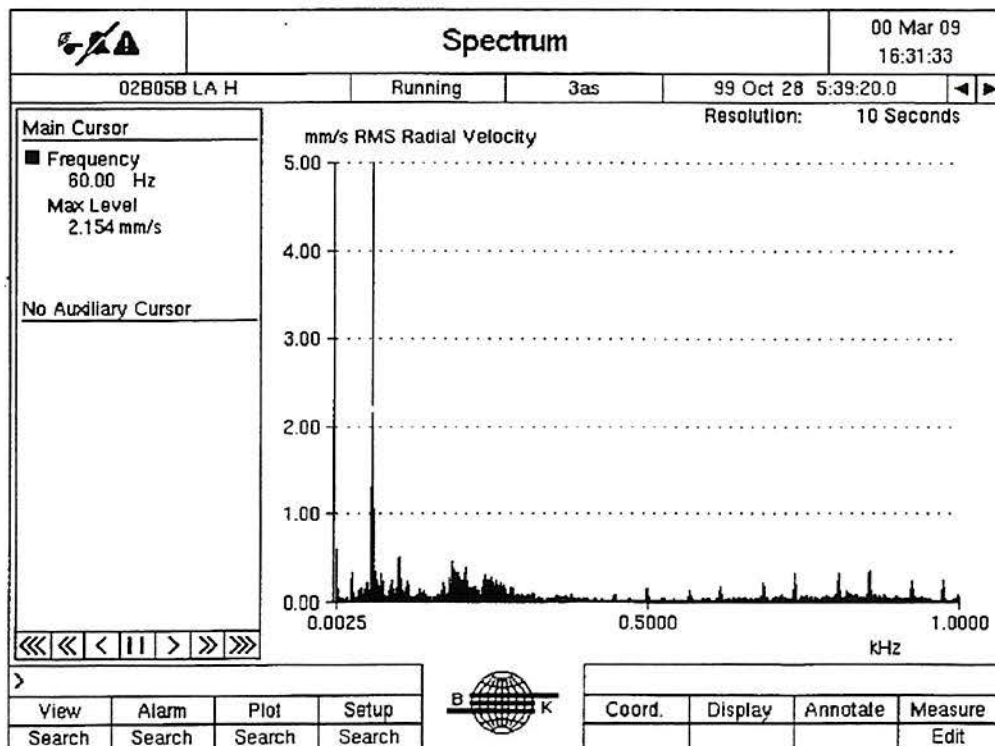
48MVT01J – Motor elétrico similar os 48MVT01 D – espectros antes e após a intervenção.

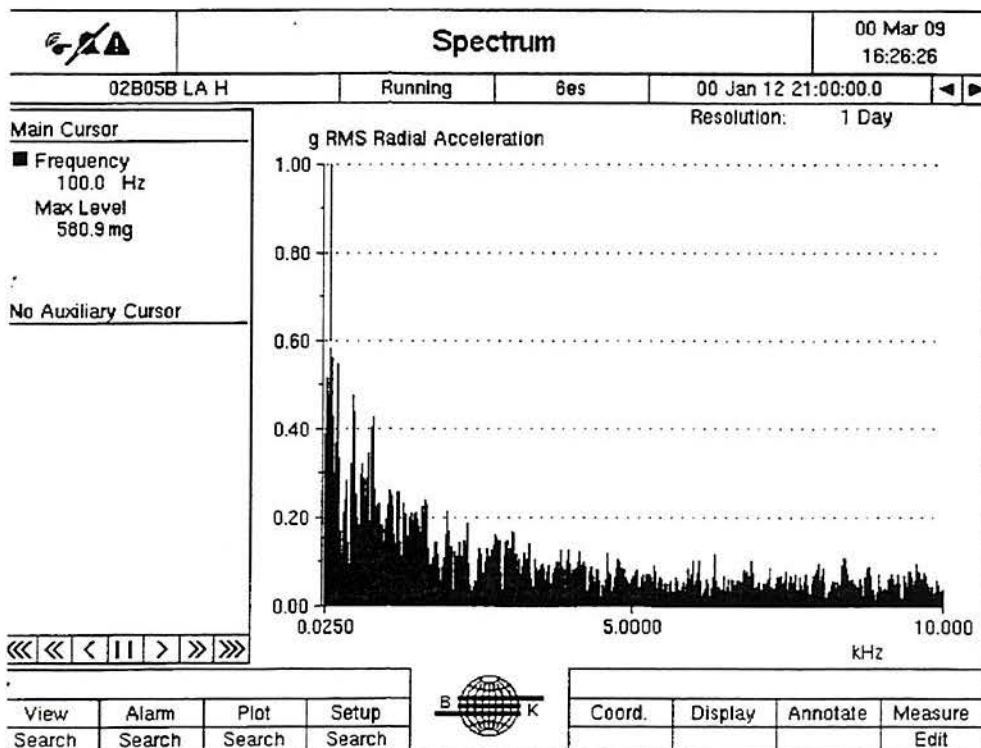
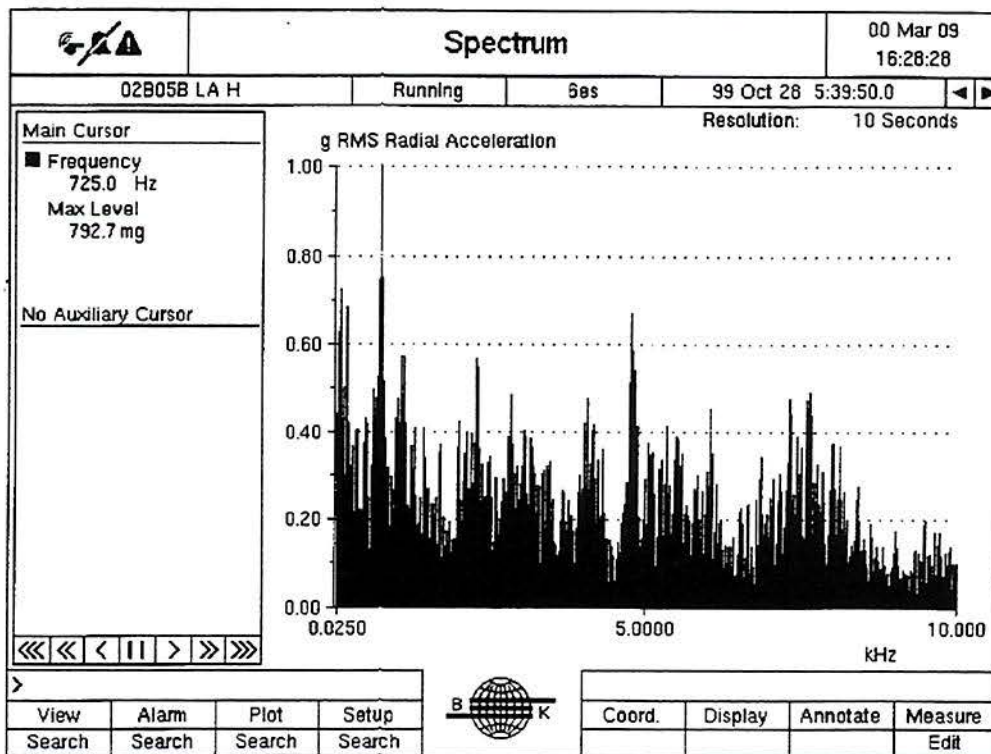


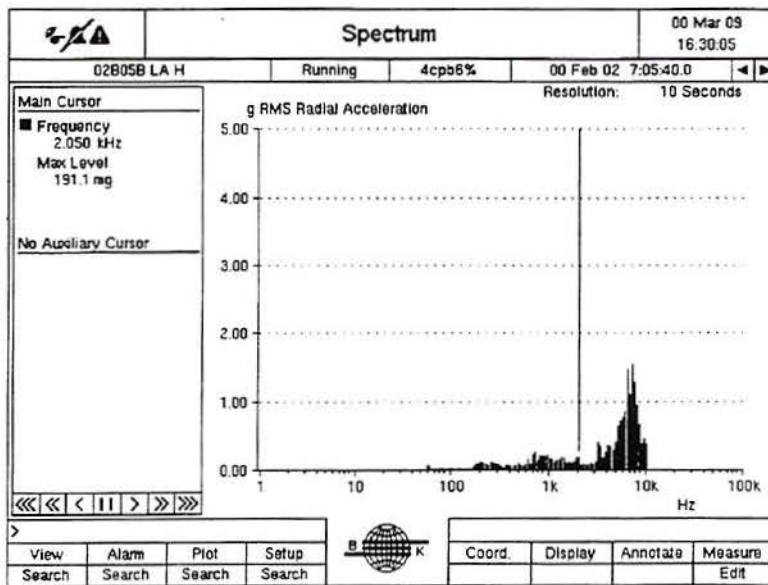
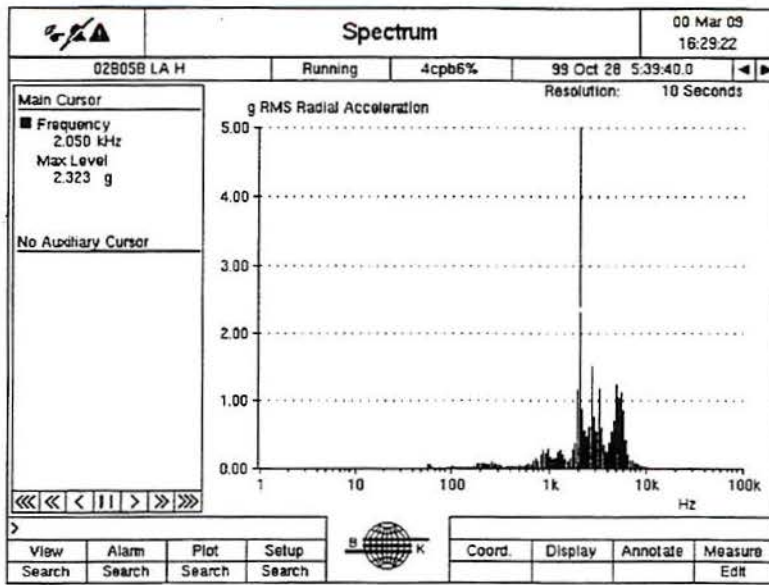




02B05B – Espectros da bomba que foram tomados quando da análise do motor que a acina 02MB05B e que entrou em colapso 3 meses após o diagnóstico. A bomba não sofreu intervenção e os espectros foram tomados para verificar a transmissão dos sintomas do motor para a bomba.







7.3. APÊNDICE III - CONFIGURAÇÕES E HISTÓRICO


Abaixo estão os dados e configurações dos aparelhos de coleta utilizadas na aquisição e plotagem dos gráficos utilizados nas análises de vibração.


Specifications 2526 Series

<p>Unless otherwise stated, all specifications refer to both 2526 MK2 and 2526E Data Collectors</p> <p>GENERAL: Display: 128 x 128 dots Super Twist LCD. Manual and temperature compensated contrast regulation. Backlight Display (2526 MK2 only) Number of Display Lines..... 16 Number of Characters per Line..... 21</p> <p>Power Supply: Charger..... ZG0341 (charge time 4hrs) 2526 MK2 Only: Battery Pack..... ZG0340 (7.2V @ 1.8Ah) Operation Time..... 8hrs (normal usage) (can be reduced by 1 hour with extensive use of backlight) 2526E Only: Battery Pack..... ZG0349 (7.2V @ 1.8Ah) Operation Time..... 7hrs under normal usage</p> <p>Measurement Storage: Memory 2526E/2526 MK2..... 2/3 Mbyte (- 1.5 Mbyte program, route data 500kbyte [2526E + 7111, 7112] or 1760kbyte (2526 MK2 + standard program)</p> <p>The number of measurements stored depends on measurement type and package installed i.e.</p>			<p>Output/Supply..... 6.2V/100mA Note that this input can be used with the MM0024, or other digital input sources</p> <p>High Pass Filter: Lower Limiting Freq. (-0.1dB)..... 1, 3, or 10Hz Filter Slope..... 60dB/decade</p> <p>Integrators: One or two Integrations (Velocity and Displ.) Lower Limiting Freq..... 1Hz Upper Limiting Freq..... Vol. 20kHz/Displ. 1kHz</p> <p>Amplifiers: Settings..... 0 to 40dB in 10dB steps</p> <p>Dynamic Range (BW = 1Hz): Digital (when Analog >80dB)..... >84dB Analog.....</p>			<p>TRIGGER FUNCTION: On Signal..... Free run, Positive or Negative Slope On Tacho..... Positive Slope only Gear Multiplication Factor for FFT Spectra..... N1/D1 x N2/D2 (N, D= 1 to 999)</p> <p>AC/DC OUTPUT: BNC connector to tape recorder, headphone preamp, etc</p> <p>Output Level: Charge Input..... 1mVxAmp (Setting=pC) Current-Drive Input (2526 MK2) .. 3.15mVxAmp (Setting=mV) Current-Drive Input (2526E)..... 1mVxAmp (Setting=mV) AC/DC Input..... 0.141mVxAmp (Setting=mV) AC/DC Output (max.)..... 1V_{RMS}</p> <p>SERIAL INTERFACE: 9-pin male D-range connector. Complies with EIA 574 [compatible with EIA 232 (RS 232)]. Coupled as DTE (Data Terminal Equipment)</p> <p>Modem: Please see your local Sales Representative for up-to-date information on modem requirements</p> <p>Body Dimensions: Length..... 304mm Width..... 108mm Height..... 55mm Weight..... 1.2kg (including battery)</p>																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Measurement Type</th> <th>Standard Program</th> <th>Balancing/FAB Program</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Scalar - 2526E</td> <td>- 1720</td> <td>- 1240</td> </tr> <tr> <td>2526 MK2</td> <td>- 3960</td> <td>- 3450</td> </tr> <tr> <td>Spectra, no Ref. - 2526E</td> <td>- 690</td> <td>- 500</td> </tr> <tr> <td>2526 MK2</td> <td>- 1600</td> <td>- 1410</td> </tr> <tr> <td>Spectra with Ref. - 2526E</td> <td>- 430</td> <td>- 314</td> </tr> <tr> <td>2526 MK2</td> <td>- 990</td> <td>- 875</td> </tr> </tbody> </table>			Measurement Type	Standard Program	Balancing/FAB Program	Scalar - 2526E	- 1720	- 1240	2526 MK2	- 3960	- 3450	Spectra, no Ref. - 2526E	- 690	- 500	2526 MK2	- 1600	- 1410	Spectra with Ref. - 2526E	- 430	- 314	2526 MK2	- 990	- 875	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Amp. Setting</th> <th>Range from Max. Level</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>100dB</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>90dB</td> </tr> <tr> <td>20</td> <td>80dB</td> </tr> <tr> <td>30</td> <td>70dB</td> </tr> <tr> <td>40</td> <td>60dB</td> </tr> </tbody> </table>			Amp. Setting	Range from Max. Level	0	100dB	10	90dB	20	80dB	30	70dB	40	60dB
Measurement Type	Standard Program	Balancing/FAB Program																																				
Scalar - 2526E	- 1720	- 1240																																				
2526 MK2	- 3960	- 3450																																				
Spectra, no Ref. - 2526E	- 690	- 500																																				
2526 MK2	- 1600	- 1410																																				
Spectra with Ref. - 2526E	- 430	- 314																																				
2526 MK2	- 990	- 875																																				
Amp. Setting	Range from Max. Level																																					
0	100dB																																					
10	90dB																																					
20	80dB																																					
30	70dB																																					
40	60dB																																					
<p>Charge Input (TMC): Lower Freq. Limit (-1dB)..... 0.16Hz (no gain) (0.30Hz with gain) Upper Freq. Limit..... 44.7kHz (40kHz in FFT) Max. Input (Peak)..... 1420ms⁻² (0dB gain, B&K Accelerometer Type 4391)</p> <p>AC/DC Input (BNC): Lower Freq. Limit (-1dB)..... DC (no gain) (0.30Hz with gain) Upper Freq. Limit..... 44.7kHz (40kHz in FFT) Max. Input (Peak)..... ±10V DC Offset..... 0V or -10V DC Offset Error (0V) <±3mV/(-10V) <±150mV DC Calibrated Accuracy..... <±0.15dB Input Impedance..... >0.5MΩ</p> <p>Current-drive Input (BNC): Lower Freq. Limit (-1dB)..... 0.30Hz (no gain) (0.45Hz with gain) Upper Freq. Limit..... 44.7kHz (40kHz in FFT) Max. Input (Peak) (2526 MK2)..... 5000ms⁻² Max. Input (Peak) (2526E)..... 1420ms⁻² (0dB gain, B&K Accelerometer Type 8327)</p> <p>Tacho (AC Coupled, BNT): Hysteresis..... 50mV Trip Level..... Typically 300mV digital (pk-pk) (Maximum 42V RMS)</p>			<p>Overall Accuracy: ±0.5dB (±1.0dB for displacement 500Hz to 1kHz)</p> <p>COMPLIANCE WITH STANDARDS</p> <table border="1"> <tr> <td></td> <td>CE-mark indicates compliance with EMC directive 89/336/EEC and Low Voltage Directive 73/23/EEC.</td> </tr> <tr> <td>Safety</td> <td>EN 61010-1 (1993) and IEC 1010-1 (1990): Safety requirements for electrical equipment for measurement, control and laboratory use</td> </tr> <tr> <td>EMC Emission</td> <td>EN 50081-1 (1992): Generic emission standard, Residential, commercial and light industry. EN 50081-2 (1993): Generic emission standard, Industrial environment. CISPR 22 (1993): Radio disturbance characteristics of information technology equipment, Class B Limits. FCC Rules, Part 15: Complies with the limits for a Class B digital device.</td> </tr> <tr> <td>EMC Immunity</td> <td>EN 50082-1 (1992): Generic immunity standard, Residential, commercial and light industry. EN 50082-2 (1995): Generic immunity standard, Industrial environment. Note: The above is guaranteed using accessories listed in this Product Data sheet only.</td> </tr> <tr> <td></td> <td>2526E Only EN 50014 (1992): Electrical apparatus for potentially explosive atmospheres. General requirements. EN 50020 (1977): Electrical apparatus for potentially explosive atmospheres. Intrinsic safety "i", including amendments up to No.5 (1990). Refer to the Ex-certificate for further details</td> </tr> <tr> <td>Temperature</td> <td>IEC 68-2-1, IEC 68-2-2 & IEC 68-2-14 Environmental testing, Cold, Dry Heat, Change of Temperature Storage temperature: -25 °C to +70 °C 2526 MK2/2526E: Operating Temperature: -10 °C to +55 °C Change of Temperature: -10 °C to +55 °C (2 cycles, 1°C/min.) ZG 0341: Operating Temperature: 0 °C to +40 °C</td> </tr> <tr> <td>Humidity</td> <td>IEC 68-2-3: Damp heat, 90% RH non-condensing at 40 °C</td> </tr> <tr> <td>Mechanical</td> <td>Non-operating: IEC 68-2-6: Vibration, 0.3mm, 20 m/s², 10-500 Hz IEC 68-2-27: Bump: 3000 bumps at 400 m/s² IEC 68-2-29: Shock: 1000 m/s²</td> </tr> <tr> <td>Enclosure</td> <td>IEC 529 (1989): Protection provided by enclosure (IP code): IP54</td> </tr> </table>				CE-mark indicates compliance with EMC directive 89/336/EEC and Low Voltage Directive 73/23/EEC.	Safety	EN 61010-1 (1993) and IEC 1010-1 (1990): Safety requirements for electrical equipment for measurement, control and laboratory use	EMC Emission	EN 50081-1 (1992): Generic emission standard, Residential, commercial and light industry. EN 50081-2 (1993): Generic emission standard, Industrial environment. CISPR 22 (1993): Radio disturbance characteristics of information technology equipment, Class B Limits. FCC Rules, Part 15: Complies with the limits for a Class B digital device.	EMC Immunity	EN 50082-1 (1992): Generic immunity standard, Residential, commercial and light industry. EN 50082-2 (1995): Generic immunity standard, Industrial environment. Note: The above is guaranteed using accessories listed in this Product Data sheet only.		2526E Only EN 50014 (1992): Electrical apparatus for potentially explosive atmospheres. General requirements. EN 50020 (1977): Electrical apparatus for potentially explosive atmospheres. Intrinsic safety "i", including amendments up to No.5 (1990). Refer to the Ex-certificate for further details	Temperature	IEC 68-2-1, IEC 68-2-2 & IEC 68-2-14 Environmental testing, Cold, Dry Heat, Change of Temperature Storage temperature: -25 °C to +70 °C 2526 MK2/2526E: Operating Temperature: -10 °C to +55 °C Change of Temperature: -10 °C to +55 °C (2 cycles, 1°C/min.) ZG 0341: Operating Temperature: 0 °C to +40 °C	Humidity	IEC 68-2-3: Damp heat, 90% RH non-condensing at 40 °C	Mechanical	Non-operating: IEC 68-2-6: Vibration, 0.3mm, 20 m/s ² , 10-500 Hz IEC 68-2-27: Bump: 3000 bumps at 400 m/s ² IEC 68-2-29: Shock: 1000 m/s ²	Enclosure	IEC 529 (1989): Protection provided by enclosure (IP code): IP54															
	CE-mark indicates compliance with EMC directive 89/336/EEC and Low Voltage Directive 73/23/EEC.																																					
Safety	EN 61010-1 (1993) and IEC 1010-1 (1990): Safety requirements for electrical equipment for measurement, control and laboratory use																																					
EMC Emission	EN 50081-1 (1992): Generic emission standard, Residential, commercial and light industry. EN 50081-2 (1993): Generic emission standard, Industrial environment. CISPR 22 (1993): Radio disturbance characteristics of information technology equipment, Class B Limits. FCC Rules, Part 15: Complies with the limits for a Class B digital device.																																					
EMC Immunity	EN 50082-1 (1992): Generic immunity standard, Residential, commercial and light industry. EN 50082-2 (1995): Generic immunity standard, Industrial environment. Note: The above is guaranteed using accessories listed in this Product Data sheet only.																																					
	2526E Only EN 50014 (1992): Electrical apparatus for potentially explosive atmospheres. General requirements. EN 50020 (1977): Electrical apparatus for potentially explosive atmospheres. Intrinsic safety "i", including amendments up to No.5 (1990). Refer to the Ex-certificate for further details																																					
Temperature	IEC 68-2-1, IEC 68-2-2 & IEC 68-2-14 Environmental testing, Cold, Dry Heat, Change of Temperature Storage temperature: -25 °C to +70 °C 2526 MK2/2526E: Operating Temperature: -10 °C to +55 °C Change of Temperature: -10 °C to +55 °C (2 cycles, 1°C/min.) ZG 0341: Operating Temperature: 0 °C to +40 °C																																					
Humidity	IEC 68-2-3: Damp heat, 90% RH non-condensing at 40 °C																																					
Mechanical	Non-operating: IEC 68-2-6: Vibration, 0.3mm, 20 m/s ² , 10-500 Hz IEC 68-2-27: Bump: 3000 bumps at 400 m/s ² IEC 68-2-29: Shock: 1000 m/s ²																																					
Enclosure	IEC 529 (1989): Protection provided by enclosure (IP code): IP54																																					

Monitoring Setup				00 Mar 09 16:02:25	
13MB04A LOA H		Running	6es	00 Mar 09 16:02:08.0	
Measurement Setup					
Measurement	6es		(Envelope Spectrum)		
Used Tacho	-				
Tacho Multiplier	$(1 \times 1) / (1 \times 1) = 1.0000$				
High Pass	10 Hz	AC Gain	10 dB	Auto	
Vibration Measurement	Acceleration				
Spectrum Mode	Baseband				
Frequency Mode	Absolute				
Upper Envelope Frequency	11.2 kHz				
Lower Envelope Frequency	1.12 kHz				
Display Span	10 kHz				
Detector Type	RMS	Hanning			
Averaging Mode	Spectrum Averaging				
Number of Averages	2	Timeout	30 Minutes		
Trigger	Free Run				
Make Reference	No				
OK		Cancel		Set Default	
Reset Default					
View Alarm Plot Setup				Save Cancel	
Search Search Search Search				Symbols	

Monitoring Setup				00 Mar 09 15:26:58	
48-ZE-01.3D		Running	4es	00 Mar 09 15:26:48.0	
Measurement Setup					
Measurement	4es		(Envelope Spectrum)		
Used Tacho	-				
High Pass	10 Hz	AC Gain	30 dB	Auto	
Vibration Measurement	Acceleration				
Spectrum Mode	Baseband				
Frequency Mode	Absolute				
Upper Envelope Frequency	11.2 kHz				
Lower Envelope Frequency	1.12 kHz				
Display Span	200 Hz				
Detector Type	RMS	Hanning			
Averaging Mode	Spectrum Averaging				
Number of Averages	10	Timeout	30 Minutes		
Trigger	Free Run				
Logging Mode	Learn	-	dB		
OK		Cancel		Set Default	
Reset Default					
View Alarm Plot Setup				Meas. started	
Search Search Search Search				Save Cancel	
				Symbols	

59	7	11	Monitoring Setup			00 Mar 09 15:27:22																	
48-ZE-01.3D		Running	5es	00 Mar 09 15:26:48.0																			
Measurement Setup																							
Measurement	5es	(Envelope Spectrum)																					
Used Tacho	-																						
High Pass	10 Hz	AC Gain	30 dB	Auto																			
Vibration Measurement	Acceleration																						
Spectrum Mode	Baseband																						
Frequency Mode	Absolute																						
Upper Envelope Frequency	11.2 kHz																						
Lower Envelope Frequency	708 Hz																						
Display Span	2 kHz																						
Detector Type	RMS	Hanning																					
Averaging Mode	Spectrum Averaging																						
Number of Averages	10	Timeout	30	Minutes																			
Trigger	Free Run																						
Logging Mode	Learn	-	dB																				
OK		Cancel		Set Default		Reset Default																	
<table border="1"> <tr> <td>View</td> <td>Alarm</td> <td>Plot</td> <td>Setup</td> </tr> <tr> <td>Search</td> <td>Search</td> <td>Search</td> <td>Search</td> </tr> </table>				View	Alarm	Plot	Setup	Search	Search	Search	Search			<table border="1"> <tr> <td>Save</td> <td>Cancel</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Symbols</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>		Save	Cancel			Symbols			
View	Alarm	Plot	Setup																				
Search	Search	Search	Search																				
Save	Cancel																						
Symbols																							

59	7	11	Monitoring Setup			00 Mar 09 15:38:22																	
48-ZE-01.3J		Running	5es	00 Mar 09 15:38:12.0																			
Measurement Setup																							
Measurement	5es	(Envelope Spectrum)																					
Used Tacho	-																						
High Pass	10 Hz	AC Gain	30 dB	Auto																			
Vibration Measurement	Acceleration																						
Spectrum Mode	Baseband																						
Frequency Mode	Absolute																						
Upper Envelope Frequency	11.2 kHz																						
Lower Envelope Frequency	708 Hz																						
Display Span	2 kHz																						
Detector Type	RMS	Hanning																					
Averaging Mode	Spectrum Averaging																						
Number of Averages	10	Timeout	30	Minutes																			
Trigger	Free Run																						
Logging Mode	Event	4.000	dB																				
OK		Cancel		Set Default		Reset Default																	
<table border="1"> <tr> <td>View</td> <td>Alarm</td> <td>Plot</td> <td>Setup</td> </tr> <tr> <td>Search</td> <td>Search</td> <td>Search</td> <td>Search</td> </tr> </table>				View	Alarm	Plot	Setup	Search	Search	Search	Search			<table border="1"> <tr> <td>Save</td> <td>Cancel</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Symbols</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>		Save	Cancel			Symbols			
View	Alarm	Plot	Setup																				
Search	Search	Search	Search																				
Save	Cancel																						
Symbols																							

Monitoring Setup				00 Mar 09 15:38:34	
48-ZE-01.3J		Running	4es	00 Mar 09 15:38:12.0	
Measurement Setup					
Measurement	4es		(Envelope Spectrum)		
Used Tacho	-				
High Pass	10 Hz	AC Gain	30 dB	Auto	
Vibration Measurement	Acceleration				
Spectrum Mode	Baseband				
Frequency Mode	Absolute				
Upper Envelope Frequency	11.2 kHz				
Lower Envelope Frequency	1.12 kHz				
Display Span	200 Hz				
Detector Type	RMS	Hanning			
Averaging Mode	Spectrum Averaging				
Number of Averages	10	Timeout	30 Minutes		
Trigger	Free Run				
Logging Mode	Event	4.000	dB		
OK		Cancel		Set Default	
Reset Default					
View Alarm Plot Setup				Save Cancel	
Search Search Search Search				Symbols	

Monitoring Setup				00 Mar 09 15:27:41	
48-ZE-01.3D		Running	2as	00 Mar 09 15:26:48.0	
Measurement Setup					
Measurement	2as		(Autospectrum)		
Used Tacho	-				
High Pass	1 Hz	AC Gain	30 dB	Auto	
Vibration Measurement	Velocity				
Spectrum Mode	Baseband				
Frequency Mode	Absolute				
Frequency Span	500 Hz				
Detector Type	RMS	Hanning			
Averaging Mode	Spectrum Averaging				
Number of Averages	10	Timeout	30 Minutes		
Trigger	Free Run				
Logging Mode	Event	1.000	dB		
OK		Cancel		Set Default	
Reset Default					
View Alarm Plot Setup				Save Cancel	
Search Search Search Search				Symbols	

		Monitoring Setup			00 Mar 09 16:39:05	
02MB05B LA H		Running	3as	00 Mar 09 16:38:13.0		
Measurement Setup						
Measurement	3as	(Autospectrum)				
Used Tacho	-					
Tacho Multiplier	(1 x 1) / (1 x 1) = 1.0000					
High Pass	10 Hz	AC Gain	20 dB	Auto		
Vibration Measurement	Velocity					
Spectrum Mode	Baseband					
Frequency Mode	Absolute					
Frequency Span	1 kHz					
Detector Type	RMS	Hanning				
Averaging Mode	Spectrum Averaging					
Number of Averages	2	Timeout	30	Minutes		
Trigger	Free Run					
Make Reference	No					
OK		Cancel		Set Default		Reset Default
>						
View	Alarm	Plot	Setup	Save	Cancel	
Search	Search	Search	Search	Symbols		

		Monitoring Setup			00 Mar 09 16:38:42	
02MB05B LA H		Running	4cpb6%	00 Mar 09 16:38:13.0		
Measurement Setup						
Measurement	4cpb6%	(6% Constant Percentage Bandwidth)				
Used Tacho	-					
High Pass	10 Hz	AC Gain	10 dB	Auto		
Vibration Measurement	Acceleration					
Upper Band	10.3 kHz					
Lower Band	10.3 Hz					
Detector Type	RMS					
Averaging Time	2.0 s	Timeout	30	Minutes		
Speed Compensation	None					
Make Reference	No					
OK		Cancel		Set Default		Reset Default
>						
View	Alarm	Plot	Setup	Save	Cancel	
Search	Search	Search	Search	Symbols		

Monitoring Setup		00 Mar 09 16:38:30																
02MB05B LA H	Running	6es																
00 Mar 09 16:38:13.0																		
Measurement Setup																		
Measurement	6es	(Envelope Spectrum)																
Used Tacho	-																	
Tacho Multiplier	(1 x 1) / (1 x 1) = 1.0000																	
High Pass	10 Hz	AC Gain 10 dB Auto																
Vibration Measurement	Acceleration																	
Spectrum Mode	Baseband																	
Frequency Mode	Absolute																	
Upper Envelope Frequency	11.2 kHz																	
Lower Envelope Frequency	1.12 kHz																	
Display Span	10 kHz																	
Detector Type	RMS	Hanning																
Averaging Mode	Spectrum Averaging																	
Number of Averages	2	Timeout 30 Minutes																
Trigger	Free Run																	
Make Reference	No																	
OK	Cancel	Set Default																
Reset Default																		
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 25%; text-align: center;">View</td> <td style="width: 25%; text-align: center;">Alarm</td> <td style="width: 25%; text-align: center;">Plot</td> <td style="width: 25%; text-align: center;">Setup</td> <td style="width: 25%; text-align: center;"></td> <td style="width: 25%; text-align: center;">Save</td> <td style="width: 25%; text-align: center;">Cancel</td> <td style="width: 25%;"></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Search</td> <td style="text-align: center;">Search</td> <td style="text-align: center;">Search</td> <td style="text-align: center;">Search</td> <td></td> <td style="text-align: center;">Symbols</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>			View	Alarm	Plot	Setup		Save	Cancel		Search	Search	Search	Search		Symbols		
View	Alarm	Plot	Setup		Save	Cancel												
Search	Search	Search	Search		Symbols													

2000-03-03 12:53 SYSTEM : EQUIPAMENTO PARADO 2000-02-02 07:02 JOAO : PREDITVA 2000-01-13 08:03 JOAO : PREDITVA 1999-11-11 14:17 OTAVIO : 02MB05B - Provavel dano significativo nos mancais do motor. Dano incipiente nos mancais da bomba. Revisar mancais da bomba e do motor. 1999-11-11 05:29 JOAO : ALARME DE VIBRACAO 1999-10-28 05:35 JOAO : PREDITVA 1999-07-29 12:14 JOAO : PREDITVA	
02B05B	Cancel

1999-11-17 11:25 JOAO : PREDITIVA	
1999-10-19 07:44 MAURO : Apos manutencao as frequencias de rocamento desaparecerao. Equipamento sera acompanhado conforme plano de vibracao.	
1999-10-18 05:21 JOAO : APOS UMA PARADA	
1999-10-14 15:11 OTAVIO : 13B06A - Alta vibracao (7mm/s) e espectro atipico com frequencias assincronas acima da primeira harmonica. Possivel rocamento na bomba e dano incipiente no mancal LOA da bomba. Recomendavel revisar a bomba.	
1999-10-13 11:05 JOAO : RUIDO ACIONADO	
1999-09-15 09:28 JOAO : Alterada a configuracao cfe combinado.	
13B06A	Cancel

1999-11-17 11:25 JOAO : PREDITIVA	
1999-10-19 07:44 MAURO : Apos manutencao as frequencias de rocamento desaparecerao. Equipamento sera acompanhado conforme plano de vibracao.	
1999-10-18 05:21 JOAO : APOS UMA PARADA	
1999-10-14 15:11 OTAVIO : 13B06A - Alta vibracao (7mm/s) e espectro atipico com frequencias assincronas acima da primeira harmonica. Possivel rocamento na bomba e dano incipiente no mancal LOA da bomba. Recomendavel revisar a bomba.	
1999-10-13 11:05 JOAO : RUIDO ACIONADO	
1999-09-15 09:28 JOAO : Alterada a configuracao cfe combinado.	
13B06A	Cancel

2000-02-15 10:04 JOAO : EEquip. em Manutencao
2000-01-20 12:54 JOAO : EQUIPAMENTO PARADO
1999-11-08 05:14 JOAO : APOS UMA PARADA
1999-07-20 09:42 OTAVIO : 13B04A - Substituidos mancais do motor em 19/07/99 e feita nova leitura. Revisada selagem da bomba e trocados mancais. Considerado aceitavel. Os rolamentos estao no laboratorio para inspecionar as pistas e confirmar o diagnostico.
1999-07-19 11:21 JOAO : PREDITIVA
1999-07-15 15:15 OTAVIO : 13B04A - Aparente dano em progressao no rolamento do motor 13MB04A LOA. Revisar rolamentos do motor.
1999-07-15 15:14 OTAVIO :

13B04A Cancel

Monitoring Setup				00 Mar 09 15:42:10	
48-ZE-013J	Running	2as	00 Mar 09 15:42:06.0		
Measurement Setup					
Measurement	2as	(Autospectrum)			
Used Tacho	-				
High Pass	1 Hz	AC Gain	30 dB	Auto	
Vibration Measurement	Acceleration				
Spectrum Mode	Baseband				
Frequency Mode	Absolute				
Frequency Span	500 Hz				
Detector Type	RMS	Hanning			
Averaging Mode	Spectrum Averaging				
Number of Averages	10	Timeout	30 Minutes		
Trigger	Free Run				
Logging Mode	Event	4.000	dB		
OK	Cancel	Set Default	Reset Default		
View		Alarm		Plot	
Search		Search		Search	
Save		Cancel			
Symbols					

2000-03-02 07:59 OTAVIO : Confirmado danos nos rolamentos do motor - inicio de deterioracao.		

1999-11-25 09:51 OTAVIO : 48MVT01D - 48ZE01.3D - Trocado motor do ventilador D na noite de 24 para 25/11/99 devido a possivel dano incipiente no rolamento. Feita desmontar o motor retirado para verificar os rolamentos. Colocado o motor reserva. Vibrometro manual indicou no maximo 2 mm/s na medida local apos manutencao.		

1999-09-22 09:25 OTAVIO : Engrenamento - coroa de babca - 120 RPM 82 dentes - 9840 CPM pinhao intermediario - 859 RPM - 15 dentes - 9885 CPM coroa de alta - 659 RPM - 52 dentes - 34268 CPM pinhao de alta - 1780 RPM - 19 dentes - 33280 CPM		

1999-08-26 09:29 JOAO :		

48TM01 (ABCDEF)	Save	Cancel