

ANDRÉ LUIZ BRAUCKS VIANNA

**MANUTENÇÃO PREDITIVA DE ROLAMENTOS
ATRAVÉS DA TÉCNICA DO ENVELOPE**

Projeto apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção de Graduação em Engenharia Mecânica com Habilitação em Automação
e Sistemas.

**São Paulo
1994**

ANDRÉ LUIZ BRAUCKS VIANNA

**MANUTENÇÃO PREDITIVA DE ROLAMENTOS
ATRAVÉS DA TÉCNICA DO ENVELOPE**

**Projeto apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção de Graduação em Engenharia Mecânica com Habilitação em Automação
e Sistemas.**

Área de Concentração : Engenharia Mecatrônica.

Orientador : Oswaldo Horikawa.

**São Paulo
1994**

"Tudo deve ser feito da maneira
mais simples possível,
mas não mais simples que isso."

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Oswaldo Horikawa, orientador deste Projeto.

Ao Professor José Sotelo Junior, pelos conhecimentos transmitidos ao longo de mais de um ano.

Ao Professor José Luiz Marra, pelas importantes sugestões e colaborações para este trabalho.

Ao Professor Valter Ferreira Alves, pelo auxílio prestado nas atividades experimentais.

SUMÁRIO

Resumo

1) - INTRODUÇÃO.....	1
2) - REVISÃO DA LITERATURA.....	8
2.1) - OUTRAS TÉCNICAS.....	9
2.1.1) - Medição do Nível Global de Vibrações.....	9
2.1.2) - Método de Kurtose	10
2.1.3) - Fator de Crista	11
2.1.4) - Método do Pulso de Choque	12
2.1.5) - Método 'Spike Energy'.....	12
2.2) - A TÉCNICA DO ENVELOPE.....	16
2.2.1) - Assinaturas de defeitos	17
2.2.2) - Explicação da Técnica do Envelope	19
2.2.3) - A Transformada de Hilbert.....	24
2.2.4) - A Técnica do Envelope em Laboratório	27
2.2.5) - Outras considerações sobre a Técnica do Envelope	28
3) - MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
3.1) - MATERIAIS	30
3.1.1) - Componentes Mecânicos.....	30
3.1.2) - Componentes Eletrônicos	33
3.2) - MÉTODOS	40
3.2.1) - Remontagem dos rolamentos no eixo.....	41
3.2.2.) - Análise de Envelope em Laboratório	42
3.2.3) - Utilização do Método 'Spike Energy'.....	45
4) - RESULTADOS OBTIDOS	47
4.1) - FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA DA ESTRUTURA	47

4.2) - SINAL VIBRATÓRIO DO ROLAMENTO ANALISADO.....	50
4.3) - SINAL FILTRADO EM TORNO DA RESSONÂNCIA ESTRUTURAL	50
4.4) - TRANSFORMADA DE HILBERT DO SINAL FILTRADO	50
4.5) - ESPECTRO DE ENVELOPE.....	51
4.6) - UTILIZAÇÃO DO MÉTODO 'SPIKE ENERGY'.....	52
5) - DISCUSSÃO.....	54
5.1) - TÉCNICA DO ENVELOPE E MANUTENÇÃO PREDITIVA	54
5.2) - DISCUSSÃO DOS PRINCIPAIS RESULTADOS OBTIDOS.....	55
5.2.1) - <i>Freqüência de Ressonância da Estrutura</i>	55
5.2.2) - <i>Sinal vibratório do rolamento analisado</i>	56
5.2.3) - <i>Espectro de Envelope</i>	57
5.2.4) - <i>Método 'Spike Energy'</i>	58
6) - CONCLUSÃO.....	58
BIBLIOGRAFIA.....	61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61
OUTRAS REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DE LEITURA RECOMENDADA.....	63

RESUMO

O objetivo deste Projeto foi aplicar na prática a Técnica do Envelope à Manutenção Preditiva de Rolamentos.

A principal atividade do primeiro semestre foi a pesquisa bibliográfica.

Na parte mecânica, era necessária uma bancada para ensaio. Foi obtido um ventilador. E o objeto de estudo passou a ser um dos dois mancais de rolamento que sustentam seu eixo.

Para se testar a Técnica do Envelope, o estado dos rolamentos tinha que ser um parâmetro controlado. Por isso, os rolamentos do ventilador foram substituídos por outros, novos. Em seguida, foram elaborados, através de um lápis elétrico, defeitos na pista externa de um dos rolamentos.

Já na área eletrônica, a atividade mais importante foi o treinamento no uso do Analisador de Fourier, através do Tutorial da Tektronix.

A atividade capital do segundo semestre foi a execução efetiva da Análise de Envelope em Laboratório.

O principal resultado obtido foi o Espectro de Envelope, janela D da Figura 1.

O pico mostrado na Figura 1 - 75,073 Hz - foi diagnosticado como correspondente à freqüência de defeito na pista externa, tal como já era esperado.

Mas o resultado realmente interessante, porque inesperado, foi o surgimento de uma nova freqüência, também acompanhada dos respectivos harmônicos: 100,1 Hz. Trata-se da freqüência de defeito na pista interna.

Ela surgiu porque trabalhou-se com a calxa do rolamento aberta, sem a parte superior, praticamente eliminando a lubrificação. Isso para permitir o acoplamento direto da base magnética do acelerômetro no anel externo do rolamento.

Tal providência objetivou otimizar a detecção do sinal vibratório oriundo do defeito no rolamento, de baixa intensidade. A nível industrial, isso também é feito, só que de maneira aperfeiçoada : a caixa do mancal é usinada para permitir a entrada do transdutor sem prejuízo da lubrificação.

Em resumo, foram realmente detectados e diagnosticados defeitos incipientes em rolamentos através da Técnica do Envelope, em um experimento prático.

Mas este Projeto só ficou completo com a inclusão das idéias a seguir.

O que acontece é que não existe uma regra geral que indique o momento ideal para a substituição do rolamento defeso para cada usuário.

Assim, recomenda-se no meio industrial a formação de um banco de

dados por parte de cada usuário, contendo a sua experiência no uso da Técnica do Envelope.

Ou seja, depois de trocado o rolamento, deve-se prosseguir ensaiando o mesmo, até sua falha, inserindo-se o tempo da quebra na base de dados.

Repete-se este procedimento até se dispor de informações confiáveis. Deste momento em diante, a Empresa terá um aliado importante na luta por uma Qualidade superior de seus Equipamentos : *A Manutenção Preditiva de Rolamentos através da Técnica do Envelope.*

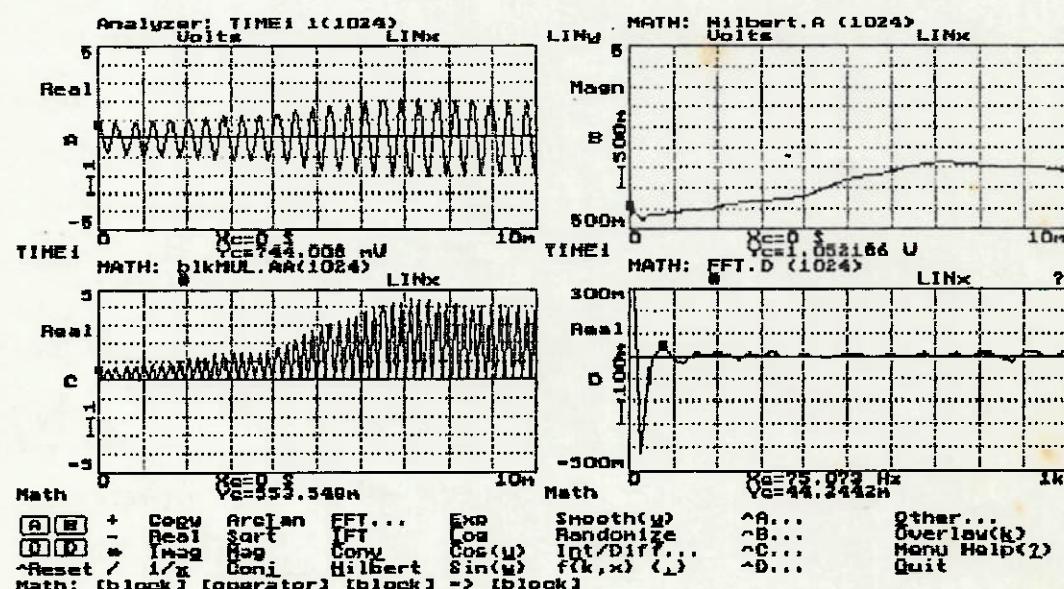
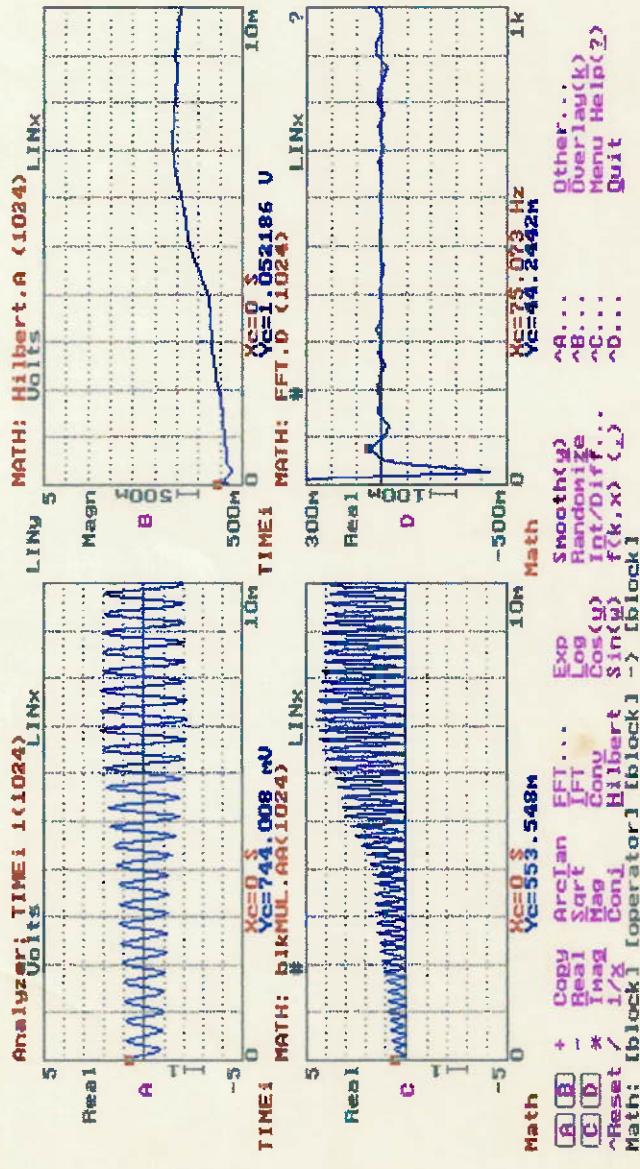


Figura 1 : Análise de Envelope no rolamento estudado.



1) - INTRODUÇÃO

O objetivo deste Projeto é aplicar na prática a Técnica do Envelope à Manutenção Preditiva de Rolamentos.

E a Manutenção Preditiva de Rolamentos através da Técnica do Envelope nada mais é do que a análise dos sinais de vibração oriundos dos rolamentos de uma máquina, com o objetivo de determinar se tais rolamentos estão em boas condições ou se precisam ser substituídos.

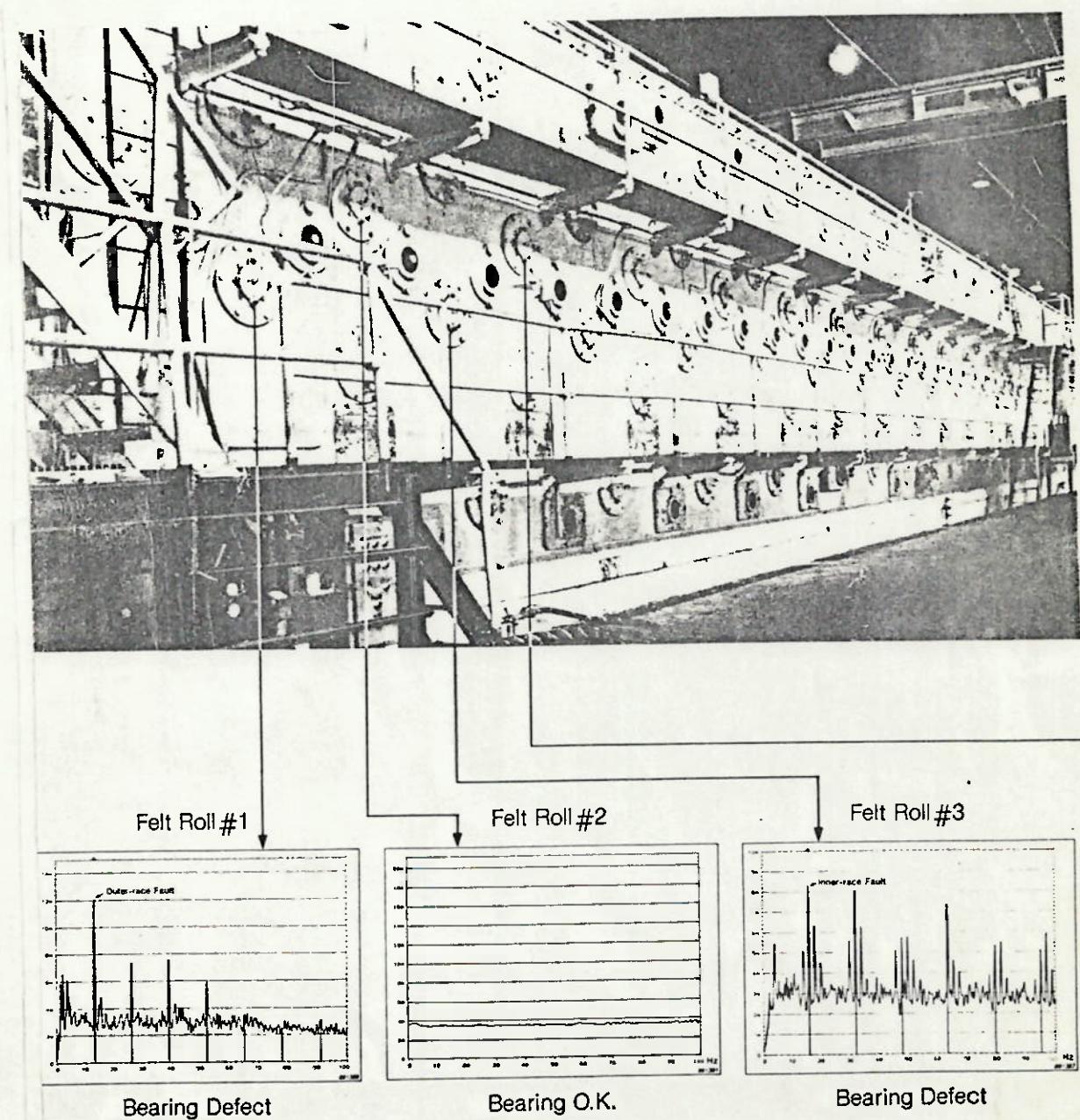
Vibração aqui é entendida simplesmente, de acordo com [1] e [2], como o movimento periódico de uma máquina, ou de uma parte de uma máquina, em torno de uma posição de equilíbrio.

A Técnica do Envelope, que será explicada adiante, não é apenas uma idéia teórica ou um assunto de interesse meramente acadêmico. Ao contrário, ela já é plenamente utilizada na Indústria, e os resultados de sua implementação mostram-se altamente compensadores [3]. Veja a Técnica do Envelope sendo utilizada na prática, nas Figuras 1 e 2, nas próximas páginas.

Não é difícil compreender as causas de grandes interesses e investimentos em pesquisas nessa área, que levam a métodos bastante sofisticados como o do Envelope: é que os rolamentos são os componentes singulares que causam mais preocupações aos Setores de Manutenção, sendo comuns as unidades industriais que apresentam milhares de rolamentos instalados.

Ou seja, um dos principais objetivos de um Sistema Industrial de Manutenção é conhecer o estado dos rolamentos. Na próxima seção, várias técnicas serão apresentadas - entre elas a do Envelope - que possibilitem esse conhecimento. Será então fácil compreender, num processo comparativo, por que a técnica do Envelope foi a escolhida para ser implementada neste Projeto.

Uma observação: as divisões principais deste trabalho são as seções, que se dividem em subseções. Estas, por sua vez, se dividem em itens.



**Figura 1: Utilização prática da Técnica do Envelope
numa fábrica de papel norte-americana.**

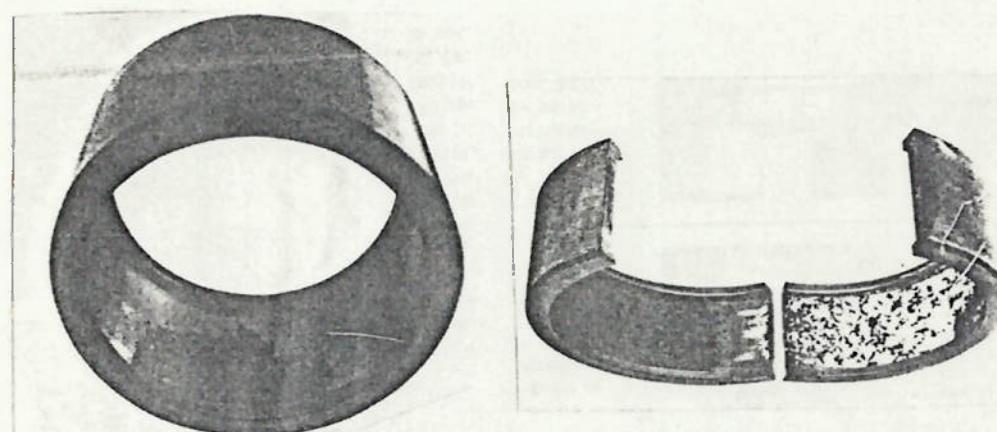


Figura 2: Na fábrica, as falhas dos rolamentos acima foram detectadas oito meses antes do reparo ser efetuado [3].

Mas como já se falou aqui em Manutenção por diversas vezes, torna-se necessário explicar agora a inclusão da Técnica do Envelope no contexto da Manutenção Preditiva.

Os Sistemas de Manutenção podem ser classificados em três tipos básicos [4]: Manutenção Corretiva, Manutenção Preventiva e Manutenção Preditiva.

Na Corretiva, a máquina é posta a funcionar até que ocorra uma falha que interrompa seu funcionamento. Aplica-se para Indústrias que possuem máquinas duplicadas para um mesmo processo. Nesta situação, a perda de produção durante uma parada para manutenção não é significativa, podendo-se utilizar máquinas sobressalentes em substituição às defeituosas.

A Manutenção Preventiva é realizada a intervalos fixos, que devem ser menores que o tempo entre falhas. É aplicada a Indústrias onde a interrupção da produção para uma manutenção não prevista (corretiva) implica em grandes prejuízos.

Finalmente, a Manutenção Preditiva é mais sofisticada do que as anteriores, no sentido de que é realizada exatamente quando e somente quando necessária, nem antes nem depois [5].

Para que isto seja possível, pressupõe-se o acompanhamento constante das condições dos equipamentos, que é efetivado através de sensores modernos, miniaturizados e altamente confiáveis - no presente caso, é utilizado um Acelerômetro - associados a complexos sistemas eletrônicos de processamento de sinais - aqui representados por Microcomputador e Analisador de Fourier.

Note-se que os tipos de Sistemas de Manutenção apresentados não são totalmente estanques: um bom Banco de Dados formado com um certo tempo de aplicação da Manutenção Preventiva é muito útil à Preditiva [1].

A filosofia da Preditiva, que é o próprio equipamento definir a época em que será efetuada sua manutenção, a partir da observação de certas variáveis que indicam seu estado, reduz os custos de manutenção e aumenta a confiabilidade do equipamento. As Figuras 3 e 4, a seguir, ilustram o que foi dito até agora.

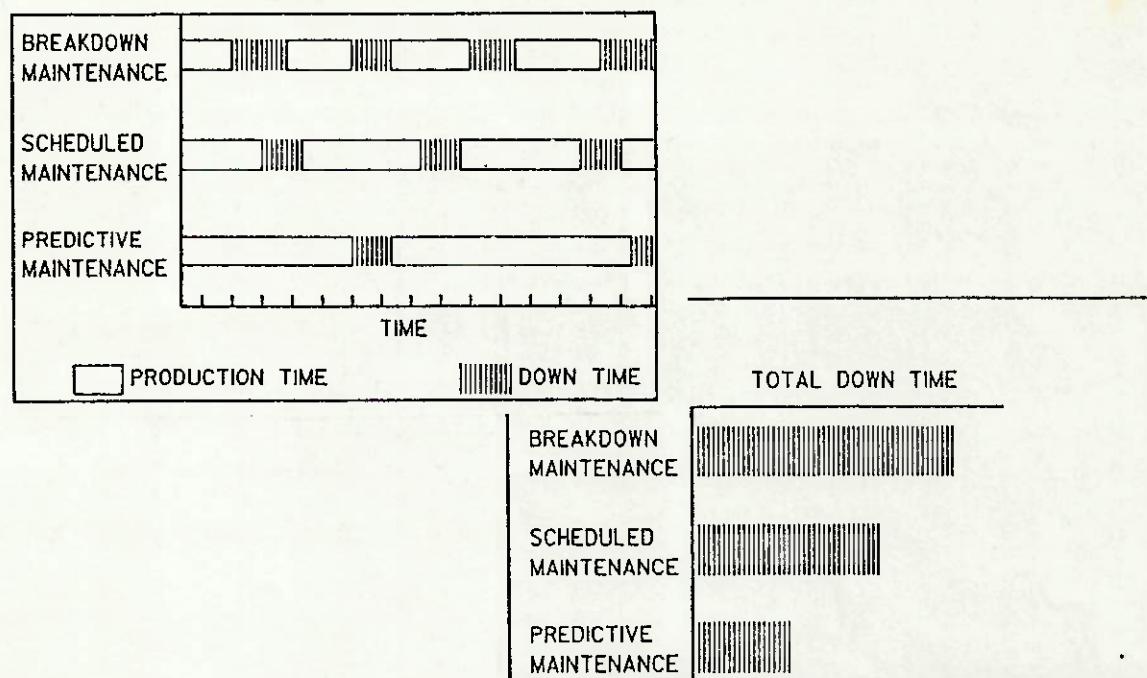


Figura 3: Comparação entre os três tipos de Manutenção.

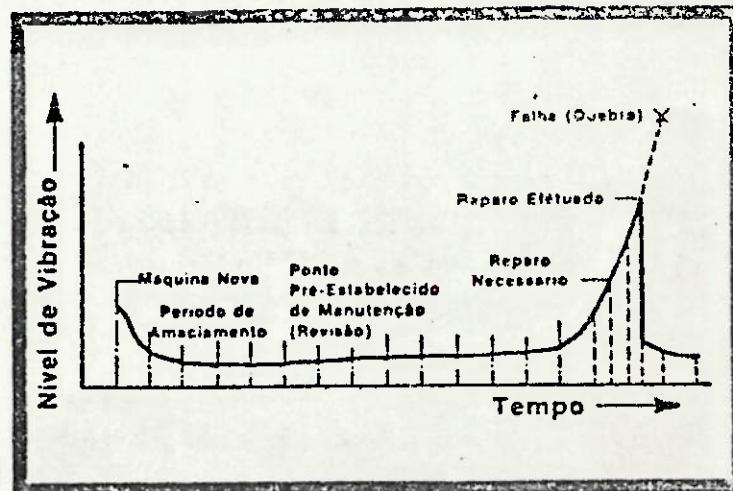


Figura 4: Programação de reparos na Manutenção Preditiva.

Assim, algumas das principais vantagens de um Sistema de Manutenção Preditiva podem ser resumidas em [4]:

- Redução do número de peças para reposição em estoque;
- Melhor preparo do pessoal de manutenção;
- Aumento do tempo médio entre reparos, acompanhado da diminuição do número de substituições desnecessárias de componentes em perfeitas condições de trabalho; e
- Aumento da confiabilidade dos equipamentos, via redução da probabilidade de quebras inesperadas.

Por razões que serão compreendidas com o desenrolar deste Relatório, a Técnica do Envelope está em perfeita sintonia com a filosofia da Manutenção Preditiva, pois:

- Provê, através de acompanhamento e monitoração constantes, o conhecimento das condições reais dos rolamentos a qualquer hora;
- Possibilita a detecção de defeitos incipientes, anteriores [3] em meses à quebra do rolamento, o que permite [4] uma adequada programação para a parada de máquinas e evita grandes perdas na produção; e
- Reduz os custos operacionais e de manutenção [3 e 4] a ponto de cobrir em curto prazo as despesas com sua implantação.

2) - REVISÃO DA LITERATURA

2.1) - Outras Técnicas

A Técnica do Envelope não é a única que permite conhecer o estado de um rolamento - mas é certamente a mais poderosa. Será visto por quê, através de comparação com outras técnicas [6], que aqui serão apenas rapidamente descritas.

2.1.1) - Medição do Nível Global de Vibrações

O método mais simples de detecção de defeitos em rolamentos é o da Medição do Nível Global de Vibrações, através da determinação de seu valor RMS.

RMS - do inglês *root-mean-square* - é a raiz quadrada da média quadrática de um sinal, e é um bom indicador na medida em que mede a energia contida em um sinal [4]. Para um sinal de período T e valor instantâneo $x(t)$, tem-se:

$$\text{RMS} = [1/T \cdot \int_{x=0, \dots, T} (x(t))^2 dt]^{1/2} \quad (1)$$

A essência deste método é o fato de que, num rolamento bom, o nível de vibrações é muito baixo. Porém, quando aparece alguma falha, o choque dos elementos rolantes com as pistas interna e/ou externa, nas áreas de defeito, faz surgirem trepidações, as vibrações tornam-se mais intensas e de maior amplitude, e desta maneira o valor de RMS do sinal aumenta.

Os melhores resultados deste método são obtidos quando se faz a medida do valor de RMS para altas freqüências, tipicamente entre 1 e 10 KHz.

A grande vantagem deste método é sua simplicidade. Porém, apresenta a grande desvantagem de dar um aviso muito tardio da presença de falhas em um rolamento.

Além disso, a detecção das falhas não é acompanhada do respectivo diagnóstico - defeito nos elementos rolantes (esferas ou rolos), na gaiola, na pista externa ou na pista interna.

2.1.2) - Método de Kurtose

O Método de Kurtose detecta falhas em rolamentos através de análises estatísticas, condensadas em um fator designado pela letra K.

A base teórica deste método é o fato de que as vibrações geradas por um rolamento sem defeito são semelhantes a um ruído aleatório [7]. Esta situação altera-se quando surge algum defeito no rolamento. No Método de Kurtose, é utilizado o fato de que a distribuição de probabilidades de um sinal aleatório tende à gaussiana quando sua duração é suficientemente grande. Neste caso, o fator K vale 3,0. Para uma onda quadrada tem-se K = 1,0 e para a senóide K = 1,5.

Quando o rolamento está defeituoso, há impactos entre os elementos rolantes (esferas ou rolos) e a pista interna e/ou externa. Com isso, surgem impulsos que se somam à onda aleatória característica do rolamento bom. Assim, o fator K torna-se maior do que 3,0.

A grande desvantagem deste método, tal como no anterior, é permitir apenas a detecção do defeito, sem o respectivo diagnóstico. A explicação ficará mais clara pela observação da Tabela a seguir.

FORMA DA ONDA	VALOR DE KURTOSIS
ONDA QUADRATA	1.0
ONDA SENO	1.5
ROLAMENTO SEM DEFEITO ONDA ALEATÓRIA	3.0
ROLAMENTO COM DEFEITO ONDA ALEATÓRIA + IMPULSOS	> 3.0

Tabela 1: Fatores de Kurtose para várias ondas.

2.1.3) - Fator de Crista

O terceiro método aqui estudado é o do Fator de Crista, que permite a detecção de falhas em rolamentos através de relações entre as amplitudes dos sinais de vibração.

O Fator de Crista (FC) é definido [7] como a razão entre o valor de pico e o valor RMS de um sinal. Assim, para uma senóide tem-se $FC = 1,414$. Quando aparece uma falha num rolamento, conforme já foi dito acima, é adicionado um impulso ao seu sinal vibratório característico (sua assinatura) e com isso o valor de pico cresce.

Conseqüentemente, o FC também cresce, pois para uma falha incipiente a contribuição para o valor RMS é muito pequena. O valor típico de FC para um rolamento em boas condições é 5,0. Rolamentos defeituosos apresentam FC maior que 10,0.

Com o desenvolvimento das falhas, o valor RMS também cresce, e com isso o fator FC começa a diminuir. Próximo à quebra do rolamento, o FC às vezes chega a voltar a seu valor original.

Quando estão presentes outras fontes importantes de vibração que não os rolamentos defeituosos, tais como bombas cavitando e engrenagens com os dentes danificados, a análise pelo Fator de Crista torna-se defeituosa. Outra limitação deste método é a mesma dos anteriores: as falhas são apenas detectadas, mas não diagnosticadas. A Figura 5 é uma ilustração deste método.

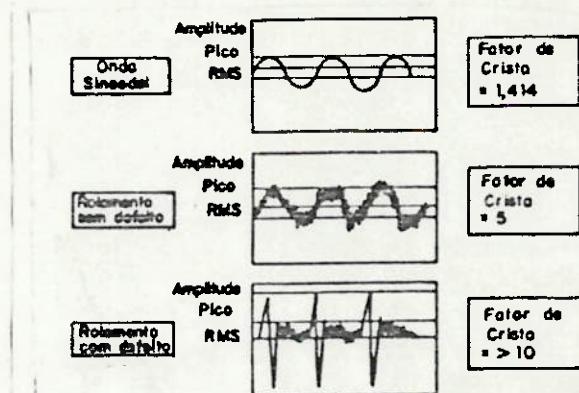


Figura 5: Fatores de Crista para diversas ondas.

2.1.4) - Método do Pulso de Choque

O penúltimo método apresentado neste item é o do Pulso de Choque [4], conhecido como MPC, que está baseado na amplificação do nível de vibrações na freqüência de ressonância do transdutor (acelerômetro) em torno de 32 KHz.

Os pulsos de falhas são transmitidos nas altas freqüências e amplificados apenas nas freqüências de ressonância do transdutor. Ou seja, o êxito desta técnica depende de um dado essencial: o de que um bom rolamento não vibra em nenhuma freqüência acima de 20 KHz, o que é garantido pelos seus principais teóricos [1' e 2'].

Na prática, o MPC apresentou deficiências na detecção de defeitos na presença de bombas cavitando. Além disso, tal como todos os outros, é incapaz de fornecer o correto diagnóstico da falha detectada no rolamento.

2.1.5) - Método 'Spike Energy'

É conveniente a apresentação deste método como último antes do Método do Envelope porque, como será explicado, ambos apresentam essencialmente o mesmo fundamento teórico.

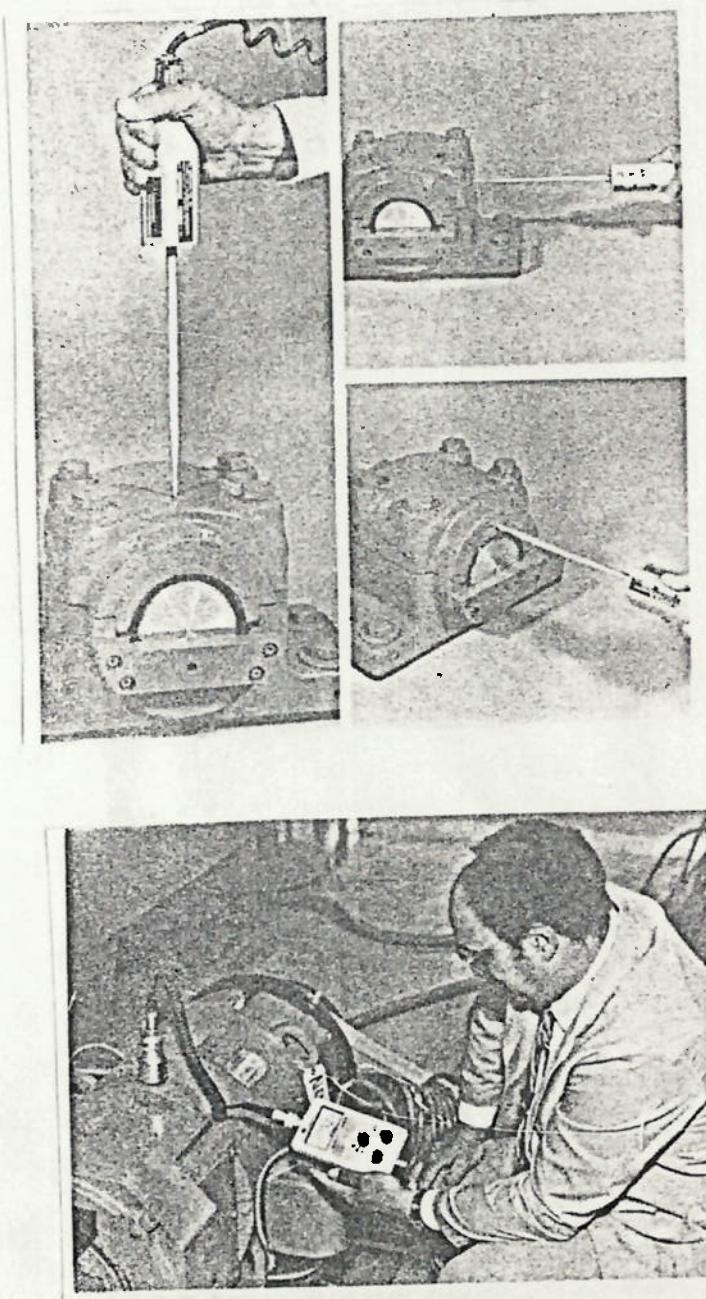
Trata-se do fato de que, na grande maioria das aplicações, não há fontes de vibrações em altas freqüências, a não ser a presença de rolamentos defeituosos. Estes, por sua vez, são fontes de tais vibrações porque os impactos das esferas ou rolos com os defeitos, por menores que estes sejam, são na verdade impulsos, que excitam as altas freqüências de ressonância da estrutura.

Então, o que se faz no Método 'Spike Energy' é simplesmente uma medida do valor RMS das vibrações de alta freqüência [1]. Se este valor for alto, o rolamento está defeituoso; caso contrário, ele está bom.

O que se tem na prática, nos aparelhos que utilizam esta técnica, é um filtro passa-altas e um medidor RMS. Em [1], a vibração é quantificada em múltiplos de g , aceleração da gravidade, e mostrada num visor ao usuário.

Este fica sabendo do estado do rolamento analisado através de tabelas onde se entra com a rotação do eixo e a aceleração de vibração obtida. A Figura 6 mostra o Método 'Spike Energy' sendo usado na prática. E a Tabela 2 é um exemplo do que foi explicado acima.

A vantagem é o conhecimento imediato do estado do rolamento, através do uso das tabelas apropriadas. A desvantagem é a impossibilidade de diagnosticar o defeito detectado.



Figuras 6a e 6b: Utilização prática do Método 'Spike Energy'.

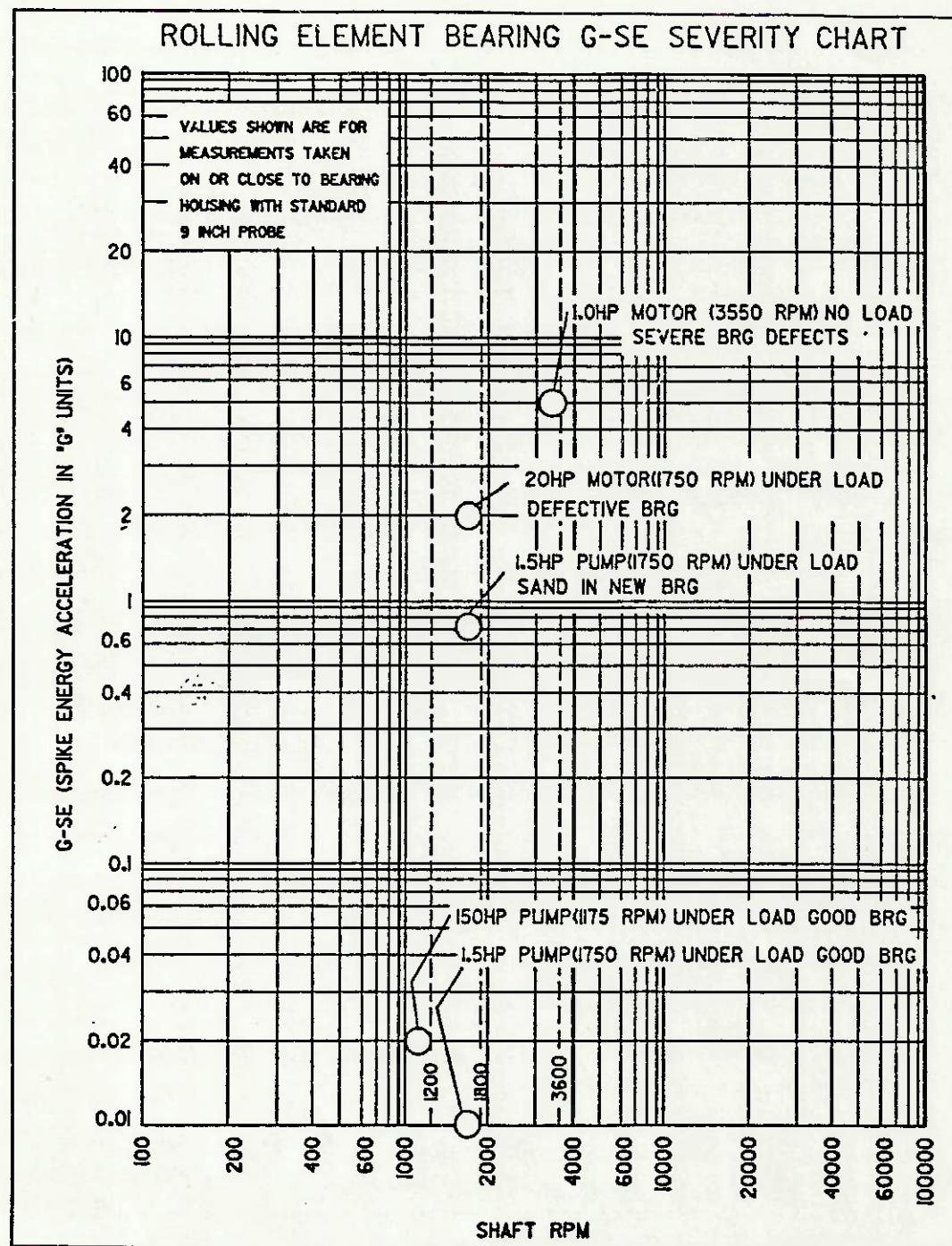


Tabela 2: Avaliação do estado de um rolamento por 'Spike Energy'.

Esta Tabela 2 Ilustra, juntamente com a Figura 4, um conceito importante a respeito da Manutenção Preditiva. É que esta envolve necessariamente uma avaliação a respeito do equipamento analisado, para se decidir quando executar nele, efetivamente, o reparo ou substituição.

Tal avaliação pode ser feita de duas maneiras: uma é absoluta e instantânea, como é o caso da Tabela 2. A outra é relativa e feita ao longo do tempo, como é o caso da Figura 4.

Se o usuário conhece o nível de vibração da máquina quando nova, deve usar o método relativo de avaliação, na Figura 4. Caso contrário, deve usar o método absoluto, ilustrado na Tabela 2.

Observe-se que o ideal é utilizar o método relativo. Só em caso de não se dispor das informações passadas a ele necessárias é que o outro método, absoluto, deve ser adotado.

Isso porque o método relativo dispõe de informações mais completas, confiáveis, sobre o estado da máquina, já que o estado desta é continuamente acompanhado através de várias medidas de nível de vibração feitas ao longo do tempo - e não através de uma medida única, num instante isolado de tempo.

A vantagem é que uma curva, como a da Figura 4, permite ao bom-senso desprezar medidas isoladas que se afastem muito dela. Já uma medida absoluta - mesmo que repetida por mais de uma vez em um dia isolado, sem um padrão de comparação com resultados passados que permitam estabelecer uma expectativa razoável - não dispõe de tal facilidade.

Todas as medidas feitas em um dia podem apresentar um erro de calibração de instrumento, por exemplo.

2.2) - A Técnica do Envelope

A Técnica do Envelope foi a escolhida para ser detalhadamente estudada e implementada na prática, ao longo deste Projeto, por apresentar em relação a todas as demais duas vantagens capitais: a capacidade de detecção de falhas incipientes no rolamento; e a possibilidade de obtenção do respectivo diagnóstico.

Mas, afinal, como explicar o que é a Técnica do Envelope ?

Já foi dito aqui que quando um rolamento apresenta um defeito, por mínimo que ele seja - uma pequena trinca na pista externa, por exemplo - a cada vez que uma esfera ou rolo passa pelo defeito, há um impacto. Mas até aí não há nenhuma novidade, pois outros métodos também utilizavam este fato.

O que diferencia a Técnica do Envelope, conferindo-lhe as duas vantagens explicadas acima, é a importante observação de que os impactos ora citados repetem-se com uma certa frequência , que é função da geometria do rolamento e da velocidade de rotação imposta [7].

Surgem assim as assinaturas - freqüências características de defeitos - de pista externa, pista interna, galocha e elemento rolante, conforme será detalhado no próximo item.

2.2.1) - Assinaturas de defeitos

As assinaturas dos defeitos podem ser obtidas com auxílio das fórmulas a seguir, tomando-se o cuidado de observar que as expressões foram deduzidas a partir de um modelamento matemático.

Neste modelamento matemático foram assumidas duas suposições básicas [6], não necessariamente verificadas na prática: os elementos rolantes apresentam

movimento de rolamento puro sobre as pistas, sem nenhum deslizamento; e as cargas aplicadas são suficientemente grandes e/ou as velocidades suficientemente pequenas, de modo que os efeitos dinâmicos podem ser desprezados.

Ou seja, as fórmulas a seguir devem ser tomadas apenas como boas aproximações.

Dados:

- n - número de esferas ou rolos do rolamento;
- f_r - freqüência relativa de rotação entre as pistas interna e externa do rolamento;
- β - ângulo de contato do rolamento;
- d - diâmetro da esfera ou rolo; e
- p - diâmetro do passo.

Têm-se:

- Freqüência de defeito no anel interno, em Hz:

$$\text{f}_i = n / 2 \cdot f_r \cdot (1 + (d/p) \cdot \cos \beta) \quad (2)$$

- Freqüência de defeito no anel externo, em Hz:

$$f_e = n / 2 \cdot f_r \cdot (1 - (d/p) \cdot \cos \beta) \quad (3)$$

- Freqüência de defeito no elemento rolante, em Hz:

$$f_l = p/d \cdot f_r \cdot [1 - ((d/p) \cdot \cos \beta)^2] \quad (4)$$

- Freqüência de defeito na gaiola, em Hz:

$$f_g = 1/2 \cdot f_r \cdot (1 - (d/p) \cdot \cos \beta) \quad (5)$$

O formulário da Figura 7 permite melhor visualização da geometria envolvida.

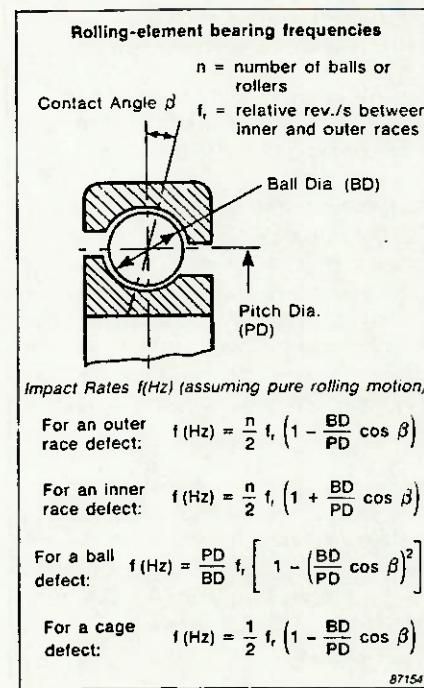


Figura 7: Assinaturas de defeitos de rolamentos.

2.2.2) - Explicação da Técnica do Envelope

O que ocorre na prática é que as freqüências determinadas acima são de difícil detecção direta por análise espectral [8]. Isso por uma razão básica, exposta a seguir.

É que os sinais de vibração oriundos dos rolamentos defeituosos são de baixa energia frente a outras fontes de vibrações de freqüências semelhantes às de defeito, presentes na maioria das máquinas [9], tais como motores desbalanceados, eixos desalinhados, a própria rotação dos motores, engrenagens defeituosas e outras.

A consequência é o mascaramento das freqüências de defeito por essas outras fontes de vibração. Com isso, mesmo utilizando a função *zoom* dos Analisadores de Fourier em torno das freqüências de defeito - tipicamente menores que 200 Hz - é, na prática, impossível a obtenção direta das assinaturas de defeito dos rolamentos num Espectro de freqüências de uma máquina.

A Tabela 3, a seguir, mostra como calcular freqüências de vibrações devidas a problemas presentes na maioria das máquinas.

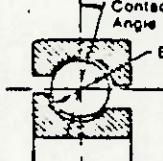
Nature of Fault	Frequency of Dominant Vibration (Hz = rpm/60)	Direction	Remarks
Rotating Members out of Balance	1 x rpm	Radial	A common cause of excess vibration in machinery
Misalignment & Bent Shaft	Usually 1 x rpm Often 2 x rpm Sometimes 3&4 x rpm	Radial & Axial	A common fault
Damaged Rolling Element Bearings (Ball, Roller, etc.)	Impact rates for the individual bearing component* Also vibrations at high frequencies (2 to 60 kHz) often related to radial resonances in bearings	Radial & Axial	Uneven vibration levels, often with shocks. • Impact-Rates:  <p>Impact Rates f (Hz)</p> <p>For Outer Race Defect (Hz) = $\frac{n}{2} l_i \left(1 - \frac{BD}{PD} \cos \delta\right)$</p> <p>For Inner Race Defect (Hz) = $\frac{n}{2} l_i \left(1 + \frac{BD}{PD} \cos \delta\right)$</p> <p>For Ball Defect f (Hz) = $\frac{PD}{BD} l_i \left[1 - \left(\frac{BD}{PD} \cos \delta\right)^2\right]$</p> <p>n = number of balls or rollers l_i = relative rev./s between inner & outer races</p>
Journal Bearings Loose in Housing	Sub-harmonics of shaft rpm, exactly 1/2 or 1/3 x rpm	Primarily Radial	Looseness may only develop at operating speed and temperature (e.g. turbomachines).
Oil Film Whirl or Whip in Journal Bearings	Slightly less than half shaft speed (42% to 48%)	Primarily Radial	Applicable to high-speed (e.g. turbo) machines.
Hysteresis Whirl	Shaft critical speed	Primarily Radial	Vibrations excited when passing through critical shaft speed are maintained at higher shaft speeds. Can sometimes be cured by checking tightness of rotor components.
Damaged or Worn gears	Tooth meshing frequencies (shaft rpm x number of teeth) and harmonics	Radial & Axial	Sidebands around tooth meshing frequencies indicate modulation (e.g. eccentricity) at frequency corresponding to sideband spacings. Normally only detectable with very narrow-band analysis and cepstrum
Mechanical Looseness	2 x rpm		Also sub- and interharmonics, as for loose Journal bearings
Faulty Belt Drive	1, 2, 3 & 4 x rpm of belt	Radial	The precise problem can usually be identified visually with the help of a stroboscope

Tabela 3: Freqüências de vibrações ocasionadas por problemas comuns em Máquinas.

Para se driblar o problema do mascaramento, é necessária a seguinte observação, essencial para a Análise de Envelope.

Trata-se do fato de que os impactos devidos ao defeito no rolamento são na verdade impulsos, teoricamente capazes de excitar todas as ressonâncias presentes na estrutura. Então as freqüências de ressonância da estrutura são geradas com a freqüência de defeito do rolamento.

A estrutura citada acima é o sistema vibratório composto pelo rolamento e por sua caixa, conforme [25]. Neste sistema, o componente de maior importância é o anel externo do rolamento [25]. Esta observação será muito importante para a compreensão de um procedimento experimental adotado neste Projeto, ilustrado na Figura 14 (encostar o acelerômetro no anel externo do rolamento, para a aquisição do sinal vibratório).

Daqui por diante, fica subentendido que os termos ressonâncias da estrutura e ressonâncias da máquina referem-se, como foi explicado, às ressonâncias do sistema rolamento mais caixa do mancal.

Note-se que não é por acaso que se fala em ressonâncias da estrutura, no plural. Observa-se experimentalmente [10] que ao contrário de um sino, por exemplo, que ressoa com uma freqüência bem definida, nas estruturas mais utilizadas na Indústria é observada uma faixa de freqüências de ressonância, geralmente entre 5 e 20 KHz [6], faixas estas que se apresentam como pequenas elevações a caracterizar o Espectro de freqüências oriundo de rolamentos defeituosos.

Nas máquinas que apresentam rolamentos defeituosos, os impulsos resultantes dos choques nas áreas de defeito geram as freqüências de ressonância da estrutura com a freqüência de defeito.

Tecnicamente traduzido, o parágrafo anterior quer dizer que o sinal de alta freqüência de ressonância estrutural - que em diversos Estudos de Caso apresentou-se entre 5 e 20 KHz [10] - torna-se portador do sinal de baixa freqüência de defeito - geralmente menor que 200 Hz - num processo de Modulação em Amplitude [3']. Vide a Figura 8.

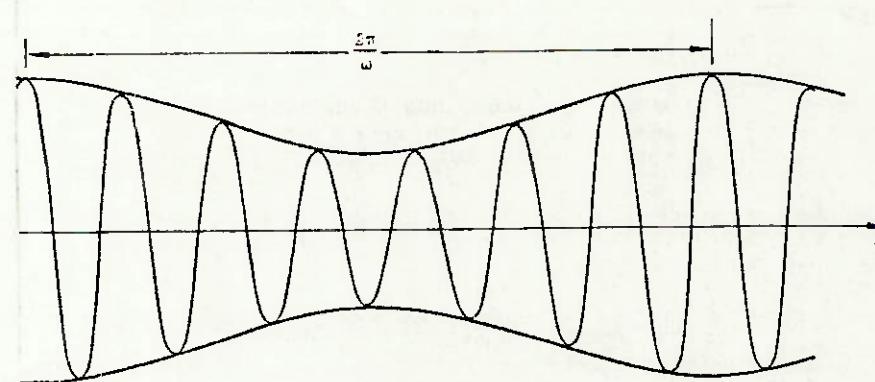


Figura 8: Processo de Modulação em Amplitude.

O que se faz na Técnica do Envelope é recuperar a freqüência de defeito através da demodulação do sinal de ressonância estrutural, via Transformada de Hilbert.

Reencontram-se, neste ponto, as duas grandes vantagens da Análise de Envelope:

- A detecção é otimizada, captando defeitos ainda incipientes, anteriores em meses à quebra do rolamento, possibilitando planos racionais de manutenção preditiva, porque essa detecção é realizada na região de alta freqüência, onde ao contrário da região de baixa não há praticamente fontes de mascaramento do sinal de defeito - a única exceção fica por conta de excitações hidrodinâmicas, como é o caso da passagem de fluido pelas pás de uma turbina;

- O diagnóstico do defeito é assegurado, pela recuperação de sua assinatura no sinal demodulado. As idéias ficarão mais claras com a apresentação ilustrada dos passos necessários em Laboratório para a Análise de Envelope. Isto será feito no item (2.2.4). Mas antes cabe explicar a Transformada de Hilbert, sem a qual seria impossível a implementação da Técnica do Envelope.

2.2.3) - A Transformada de Hilbert

É fácil compreender a importância da Transformada de Hilbert para a Análise de Envelope quando se percebe que ela é responsável pelo próprio nome desta técnica, na medida em que, conforme ficará claro ao fim deste item, a Transformada é capaz de obter a envoltória, a parte mais externa de um sinal - seu Envelope, enfim.

Obviamente, este não é um tratado de Matemática. Um estudo mais formal da Transformada de Hilbert encontra-se em [4].

A Transformada de Hilbert é obtida neste Projeto através de um Analisador de Fourier. Ao contrário da Transformada de Fourier, que leva um sinal do domínio do tempo para o da freqüência e vice-versa, a Transformada de Hilbert de um sinal no domínio do tempo permanece no tempo. O mesmo é válido para sinais em freqüência.

A definição matemática [11] da Transformada de Hilbert (H) é:

$$\hat{a}(t) = H(a(t)) = 1 / \pi \cdot a(t) * 1 / t \quad (6)$$

Onde $a(t)$ é o sinal que se quer transformar, t é o tempo e $*$ representa o operador de convolução.

A Transformada de Hilbert produz uma mudança de fase de 90° nos sinais, e permite que funções no tempo sejam representadas como funções complexas, com parte real e parte imaginária, ambas ligadas pela Transformada de Hilbert. Observe a Figura 9.

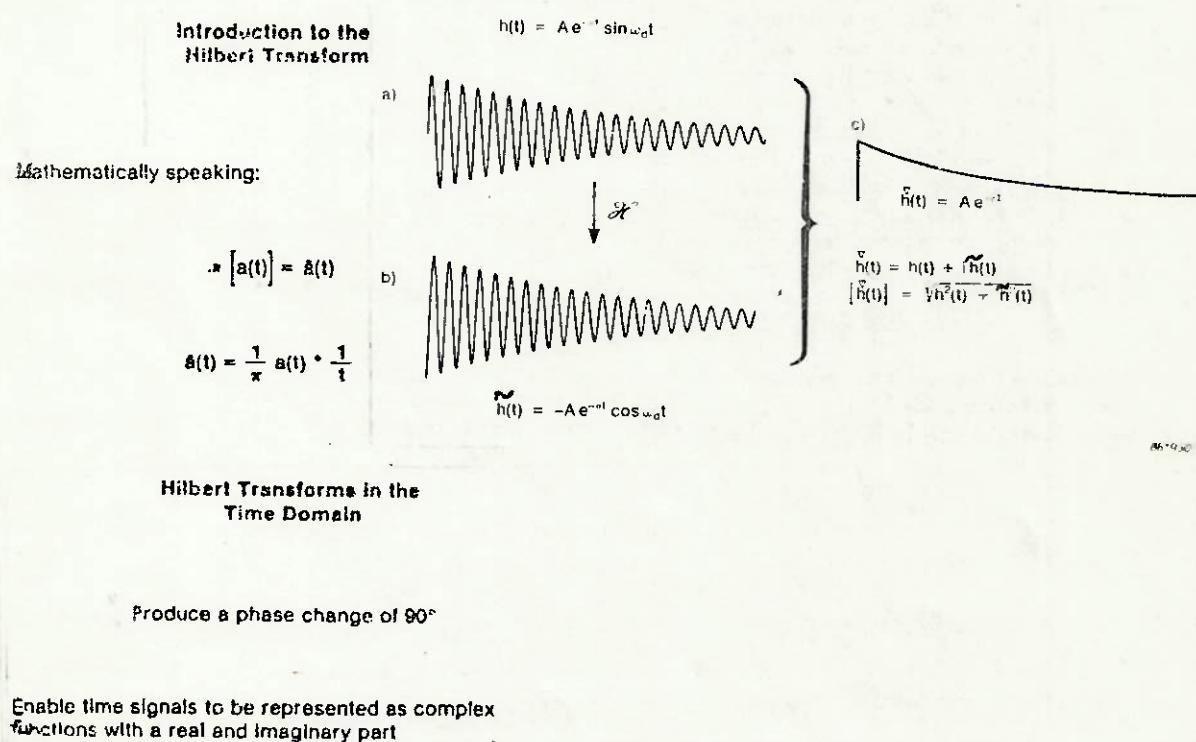


Figura 9: Definição Matemática da Transformada de Hilbert.

Qualquer sinal no tempo pode ser visto como um vetor de amplitude e freqüência variáveis. A representação no osciloscópio é a projeção do vetor em um único plano.

Se for feita a projeção do vetor em um outro plano, a 90° do primeiro, resulta que a primeira projeção pode ser vista como a parte real do sinal e a segunda projeção como sua parte imaginária. A conexão entre as duas é dada justamente pela Transformada de Hilbert.

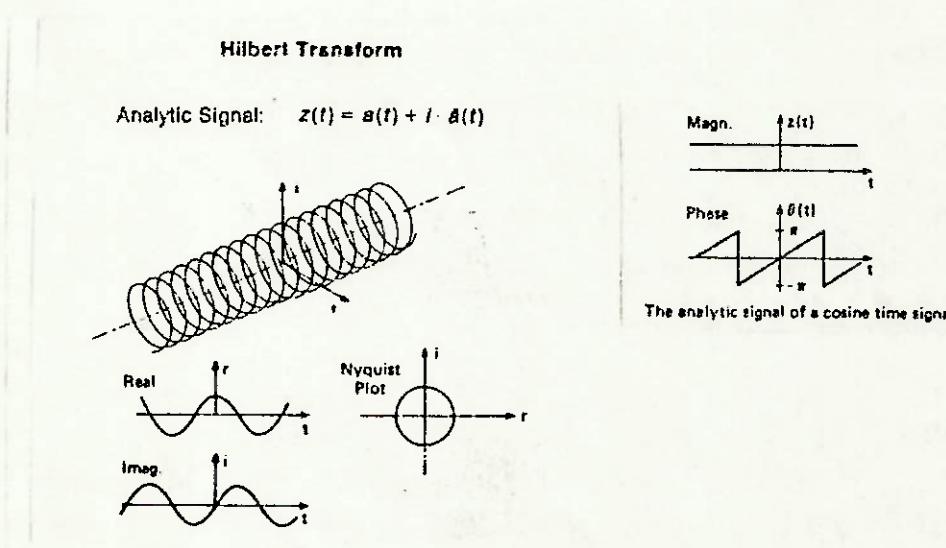


Figura 10: Ferramentas de análise no domínio da freqüência ficam disponíveis no domínio do tempo através da Transformada de Hilbert.

O Envelope nada mais é do que o módulo do sinal analítico com partes real e imaginária definidas acima.

Voltando à Figura 9 é que se comprehende o nome 'Técnica do Envelope'. Realmente, o que se quer analisar - ou seja, sinal de defeito do rolamento, demodulado - corresponde à envoltória, à parte mais externa do sinal de alta freqüência de ressonância estrutural (que funciona como onda portadora, moduladora). É, enfim, seu envelope.

Matematicamente [12], tem-se:

$$\hat{a}(t) = a(t) + i \cdot \tilde{a}(t) \quad (7)$$

$$E(a(t)) = |a(t)| = [(a(t))^2 + (\tilde{a}(t))^2]^{1/2} \quad (8)$$

Onde i é a raiz quadrada de -1; $a(t)$ é o sinal analítico cuja parte real é o sinal original no tempo $a(t)$ e cuja parte imaginária $\tilde{a}(t)$ é obtida com auxílio da Transformada de Hilbert; e, finalmente, $E(a(t))$ é o envelope do sinal $a(t)$.

Na Técnica do Envelope, a Transformada de Hilbert é utilizada para recuperar a freqüência de defeito do rolamento, demodulando-a - Isto é, separando-a - do sinal de alta freqüência característico da ressonância da estrutura, que é excitada pelos impactos (impulsos) provocados pelo choque dos elementos rolantes com as áreas de defeito na pista interna, por exemplo. Mas isto será visto no próximo item.

2.2.4) - A Técnica do Envelope em Laboratório

Este item é uma tentativa de resumir e simplificar tudo o que foi dito sobre a Técnica do Envelope. As idéias devem se tornar mais claras com a apresentação dos passos necessários em Laboratório para se implementar na prática uma Análise de Envelope:

1. Filtrar o sinal de vibração colhido pelo acelerômetro no mancal correspondente ao rolamento a analisar. Esta filtragem é feita constantemente e com o motor em funcionamento, já que trata-se de uma técnica de Manutenção Preditiva, e dentro de uma certa percentagem - é uma filtragem fina, de 3% em [6] - em torno da freqüência de ressonância da estrutura, que por sua vez geralmente está entre 5 e 20 KHz. Tal freqüência é determinada facilmente através de excitação impulsiva da estrutura, feita com auxílio de um martelo com transdutor de força;
2. Obter o Envelope do sinal filtrado, via Transformada de Hilbert processada pelo conjunto Computador / Analisador de Fourier;
3. Determinar a assinatura do defeito, diagnosticando-o, através do Espectro do sinal de Envelope, conseguido mais uma vez graças ao Computador e ao Analisador de Fourier.

Todos estes passos estão representados na Figura 11, a seguir.

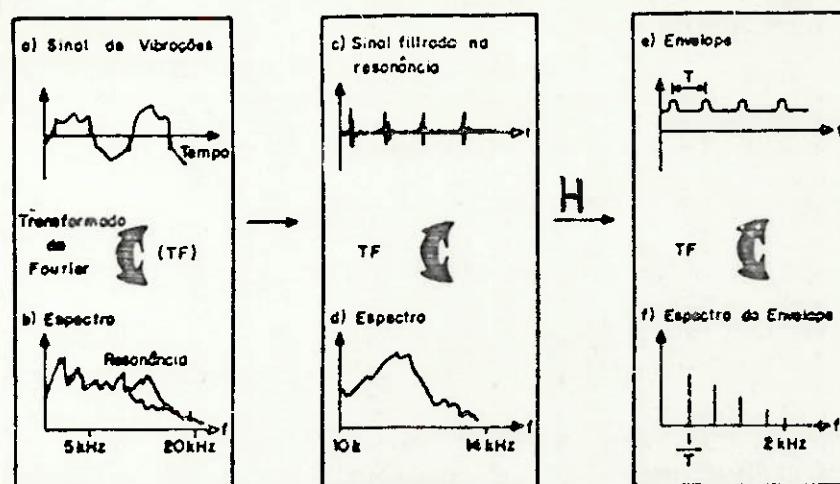


Figura 11: Análise de Envelope em Laboratório.

2.2.5) - Outras considerações sobre a Técnica do Envelope

Dois fatos tornam interessante o estudo da Técnica do Envelope: a ampla aplicação do assunto manutenção de rolamentos, que é de interesse de praticamente todo ramo de atividade Industrial; e o fato de ser ela a mais potente ferramenta para tal fim hoje disponível no mercado.

Detalhes como a insensibilidade a pequenas variações na velocidade de rotação do eixo e a capacidade de indicação do número de falhas presentes nos rolamentos mostram o quanto a Análise de Envelope é poderosa. Vide a Figura 12.

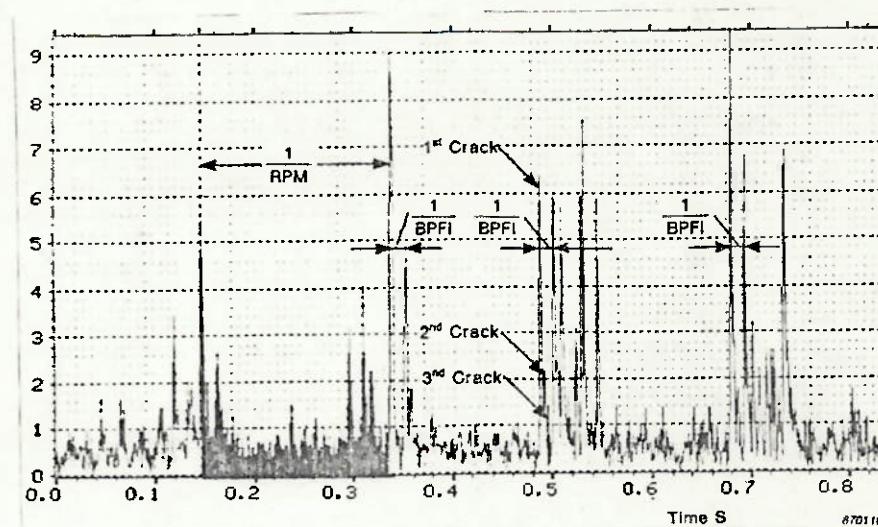


Figura 12: A observação atenta do sinal de Envelope permite até mesmo a determinação do número de falhas do rolamento.

3) - MATERIAIS E MÉTODOS

O que se pretende fazer nesta seção é uma apresentação da metodologia adotada neste Projeto, acompanhada da descrição dos equipamentos utilizados.

Como todo Projeto de Engenharia que se preza, este foi iniciado com a pesquisa bibliográfica adequada. Foi ai também que começaram as dificuldades na sua execução.

Isto porque a Técnica do Envelope ainda é relativamente recente, e desse modo a Bibliografia sobre ela é bastante escassa, consistindo essencialmente de papers em língua Inglesa inexistentes nas Bibliotecas da USP.

Então principiou o contato com outras Instituições, que dali em diante foi cada vez mais necessário e intenso, transformando-se numa tônica deste Projeto, conforme será visto adiante.

Inicialmente, o IPT. As diversas visitas ao seu Laboratório de Ensaios Dinâmicos, no prédio de Engenharia Mecânica, foram altamente produtivas, já que com elas foi obtida grande parte da Bibliografia utilizada.

Será feita agora uma divisão não rígida desta seção nas subseções de Materiais e de Métodos, apenas com o objetivo de sistematizar o estudo. A divisão é flexível porque não é conveniente falar-se dos equipamentos utilizados sem ao menos indicar sua utilização, e vice-versa.

3.1) - *Materiais*

3.1.1) - Componentes Mecânicos

Neste ponto do Projeto, já foi possível um melhor planejamento da *implementação prática da Análise de Envelope*. A idéia inicial foi a utilização de uma bancada de testes para rolamentos existente no próprio IPT. Como a bancada apresentava sérios problemas na parte de lubrificação, seu uso estava inviabilizado e esta solução foi abandonada.

Mas este fato foi até favorável, porque forçou a adoção de uma alternativa que depois se mostrou mais apropriada em relação ao plano original: aplicar a Técnica do Envelope aos rolamentos de uma máquina real, ao invés de se ensaiar em uma bancada, que teria a vantagem de se adaptar a qualquer tipo de rolamento, mas que não configuraria uma aplicação real da Técnica à Indústria.

O equipamento escolhido para teste da Técnica do Envelope foi um ventilador disponível no Laboratório de Vibrações da USP. Ele é acionado por um motor Eberle trifásico de 0,5 C.V. e 1680 R.P.M. A transmissão é feita por polias com razão de redução de 4/9, de modo que o eixo gira a 747 R.P.M. ou 12,4 Hz. Este último dado é importante na determinação da assinatura dos defeitos, de acordo com o que foi visto na seção anterior.

Os dois mancais Y do eixo de uma polegada de diâmetro foram dele retirados para permitir a montagem de outros rolamentos, cujo estado inicial pudesse ser controlado, a fim de se verificar com certeza a veracidade dos dados obtidos com a Análise de Envelope.

Isso porque os rolamentos originais eram blindados, tornando muito difícil o acesso às pistas, à galola e aos elementos rolantes.

A idéia adotada com êxito foi obter rolamentos autocompensadores de esferas. Com eles tornou-se fácil elaborar defeitos controladamente em um dos rolamentos, deixando o outro em perfeitas condições. A Técnica do Envelope deveria então fornecer saídas compatíveis com esses estados conhecidos dos rolamentos.

Este foi o planejamento básico para o teste da Técnica na prática. Nos próximos parágrafos serão detalhados alguns dos muitíssimos subproblemas, também característicos dos Projetos de Engenharia, advindos desta solução - que inclusive será mais bem detalhada.

Seguindo-se uma ordem lógica, o passo seguinte nesta fase foi obter os componentes sobre os quais todo o esforço deste Projeto está concentrado: os rolamentos.

Já se sabia que eles deveriam ser autocompensadores, para facilitar o acesso a seus componentes. A primeira tentativa para obtê-los foi junto à Schefler - fabricante de rolamentos. Lá, foram obtidas diversas informações úteis ao trabalho, inclusive alguma Bibliografia, mas não os rolamentos.

A tentativa seguinte representou um grande sucesso: em visita à fábrica da SKF do Brasil, em Guarulhos, foram obtidos, numa doação de rara gentileza de material importado da Suécia, dois rolamentos SKF-1206-EK-TN-9 [13] - autocompensadores de duas carreiras de esferas - com os quais foi implementada a bancada de testes do Projeto.

Restava ainda um problema: a SKF não trabalha, no Brasil, com as caixas adequadas a estes rolamentos - os mancais propriamente ditos.

A solução foi encomendar junto à DIN, fabricante de mancais situada na Barra Funda, a fabricação de duas caixas SNH-506-605, duas buchas HE-206, próprias para eixos em polegadas, acompanhadas das respectivas porcas de fixação, arruelas de travamento e vedadores [13]. O pagamento destes componentes foi feito pela Marinha do Brasil.

Observar a desmontagem dos rolamentos antigos e a montagem dos novos - dois procedimentos bastante diferentes - representou um importante aprendizado prático em Mecânica.

Mas até agora só se falou em componentes mecânicos, necessários à bancada de testes. E quanto à aparelhagem eletrônica, essencial na Análise de Envelope?

3.1.2) - Componentes Eletrônicos

Através de uma visita à Brüel & Kjaer do Brasil, situada em Santo Amaro, especializada na comercialização de equipamentos eletrônicos, conseguiram-se importantes informações relativas ao *hardware* e ao *software* necessários a este trabalho.

Mais do que isso. Como pode ser observado na Bibliografia deste Projeto, a Brüel & Kjaer, através de suas excelentes *Application Notes*, é sem dúvida a principal fonte de informações a respeito da Análise de Envelope.

Já conhecidas as demandas a nível eletrônico, partiu-se para a obtenção dos equipamentos.

Toda a equipagem eletrônica requerida pela Técnica do Envelope, incluindo as partes de monitoração, processamento e análise de sinal, está disponível no Laboratório de Vibrações da USP, consistindo essencialmente de:

- Um conjunto constituído por um Analisador de Fourier da Tektronix acoplado a um Microcomputador. Trata-se do mais importante e complexo equipamento eletrônico utilizado na Análise de Envelope [14,15]. O treinamento imprescindível à sua utilização foi obtido principalmente através do Tutorial da Tektronix [16,17].

Observe-se a importância e a complexidade do conjunto Computador/Analisador de Fourier, pois faz a amostragem do sinal vibratório oriundo do rolamento, processa as Transformadas de Hilbert e Fourier e obtém o envelope deste sinal; e ainda apresenta como saída, na tela do Computador, a freqüência de defeito do rolamento, pelo Espectro do sinal de envelope;

- Um martelo com transdutor de força GK-291-B01 [18,19], utilizado para excitação impulsiva da estrutura, a fim de determinar sua freqüência de ressonância [20];
- Um acelerômetro PCB-303-A03, pequeno e leve, de altíssima freqüência de ressonância, capaz de captar sem distorções significativas os sinais de alta freqüência - geralmente entre 5 e 20 KHz - da ressonância da máquina [21];
- Um acelerômetro Brüel & Kjær 4384, com base magnética, que passou a ser utilizado em substituição ao anterior quando se percebeu que a freqüência de ressonância não era tão alta quanto esperado;
- Um amplificador de carga Type 2635, que representa um ganho para o sinal que sai do acelerômetro acima;
- Um filtro Brüel & Kjær, Tracking Filter Type 1623. A utilização de filtros analógicos como este não estava prevista inicialmente, no teste experimental da Técnica do Envelope. A razão para isto é que contava-se com a utilização da função *zoom* do Analisador de Fourier para filtrar o sinal vibratório colhido no mancal defeituoso em torno da freqüência de ressonância da estrutura.

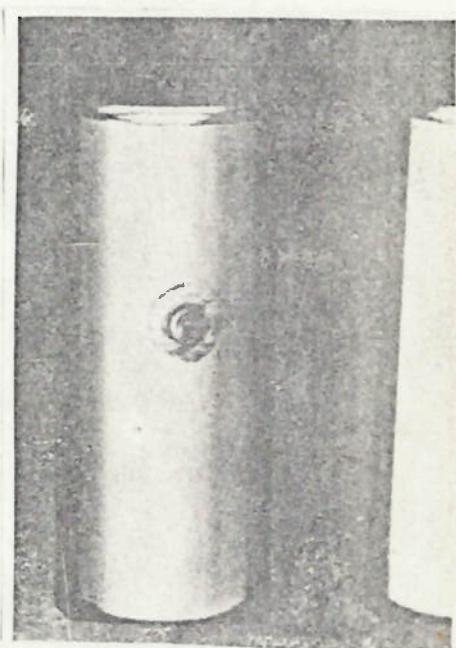
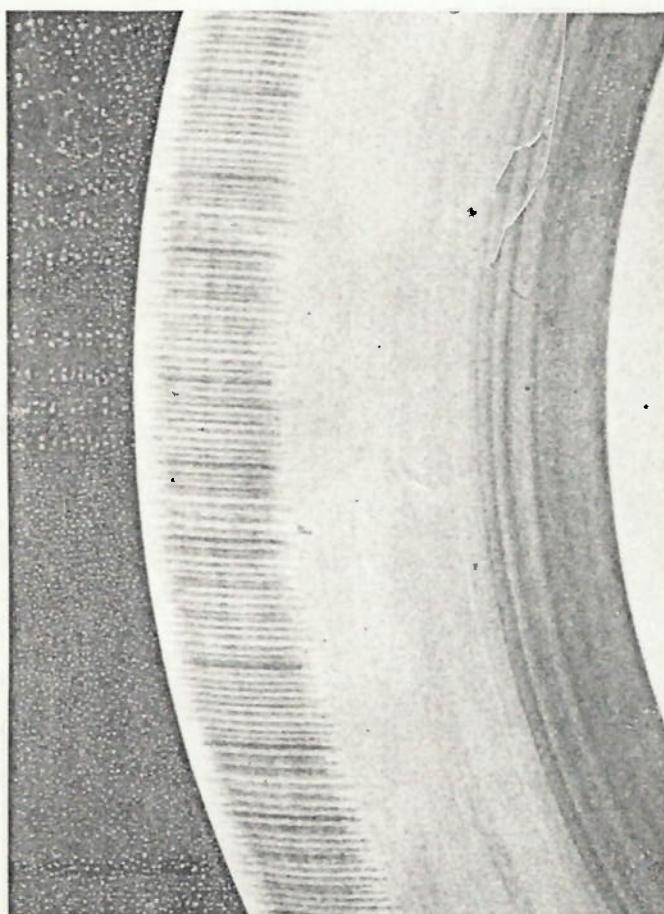
Porém, tal procedimento mostrou-se inviável, uma vez que o Analisador, ao executar o *zoom*, passava a representar o sinal através de uma função complexa. E o próprio Analisador não aceita executar Transformadas de Hilbert de funções complexas. Sem a Transformada de Hilbert, como já foi visto, torna-se impossível a Análise de Envelope planejada, pela ausência de um instrumento capaz de demodular a freqüência buscada, de defeito do rolamento, da freqüência natural da estrutura, que é a moduladora;

- Um filtro Robotron Narrow-Band 01013, de filtragem em banda estreita. Este filtro passou a ser utilizado em substituição ao anterior, que não levava a resultados satisfatórios na Análise de Envelope. O que acontece com o Brüel & Kjaer 1623 é que sua capacidade de filtragem é limitada a 6%, excedendo em 100%, portanto, o recomendado na literatura [3,6].

Os Espectros obtidos com este filtro apresentavam componentes indesejadas, tais como os harmônicos da rotação do motor. Já o Robotron 01013 filtra até 1,5%, e levou aos resultados plenamente satisfatórios ilustrados no próximo item. A lamentar apenas o tempo perdido até se perceber o fato ora descrito.

Fica apenas faltando citar o lápis elétrico, obtido no IPT, e que foi usado para a elaboração, em um dos dois rolamentos, de pequenos defeitos - três no anel externo - simulando danos causados ao rolamento pela passagem de corrente elétrica pelo mesmo [22].

As Figuras 13 e 14 mostram respectivamente a falha simulada via lápis elétrico aplicado na pista externa de um dos rolamentos; e um esquema completo da bancada a ser ensaiada. Já as Figuras 15 e 16 são fotografias que mostram os diversos componentes da bancada realmente implementada para verificação experimental deste Projeto. Estas fotos devem ser comparadas com a bancada teórica esquematizada na Figura 14.



Figuras 13a e 13b: A falha simulada representa danos causados pela passagem de corrente elétrica por um rolamento.

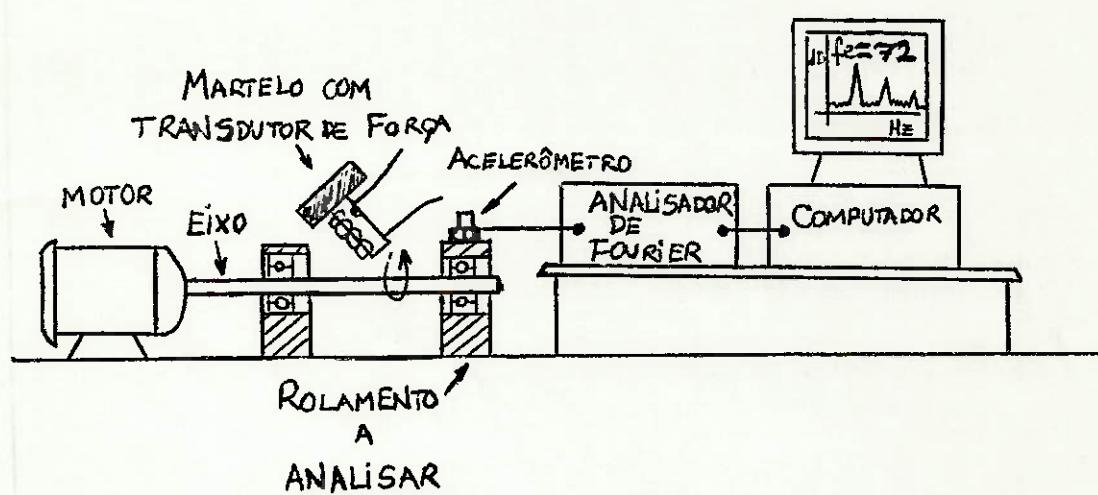
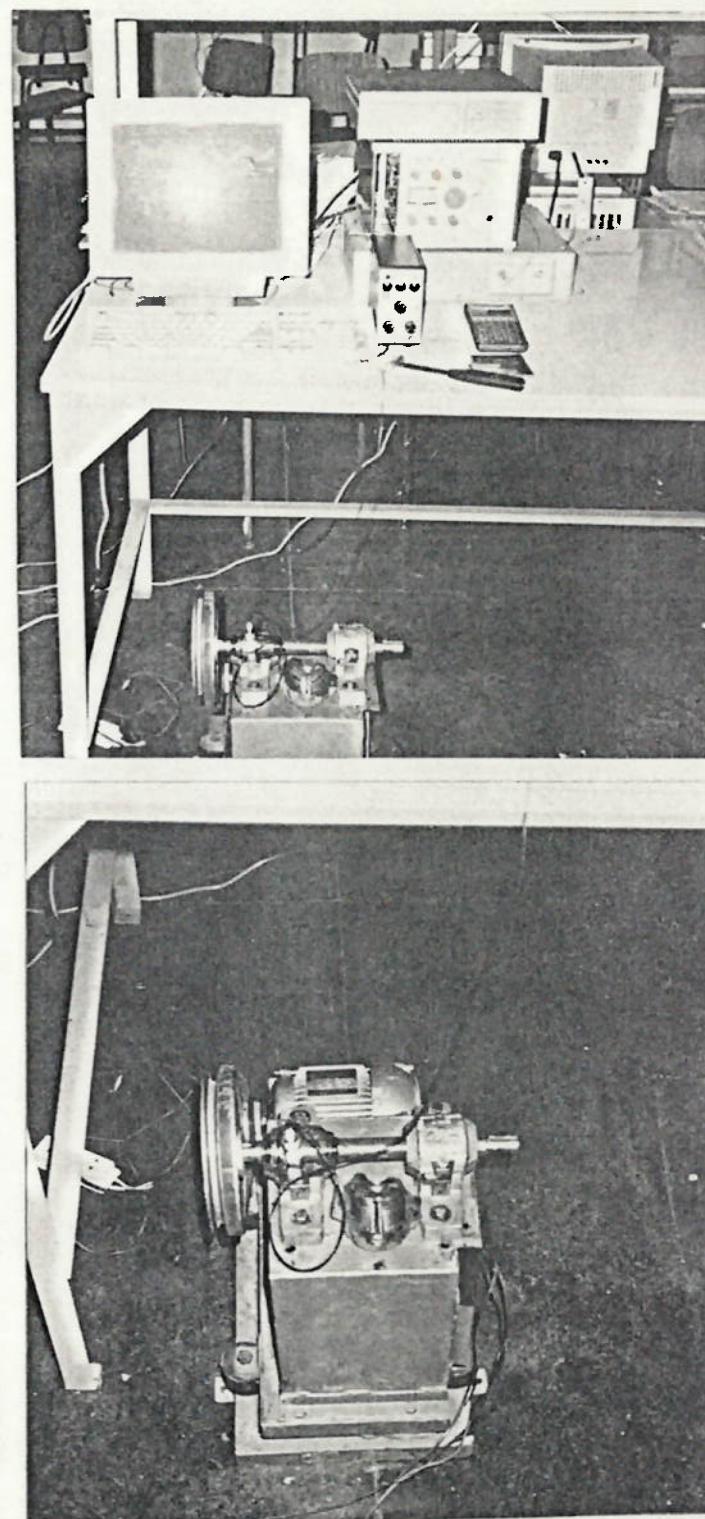
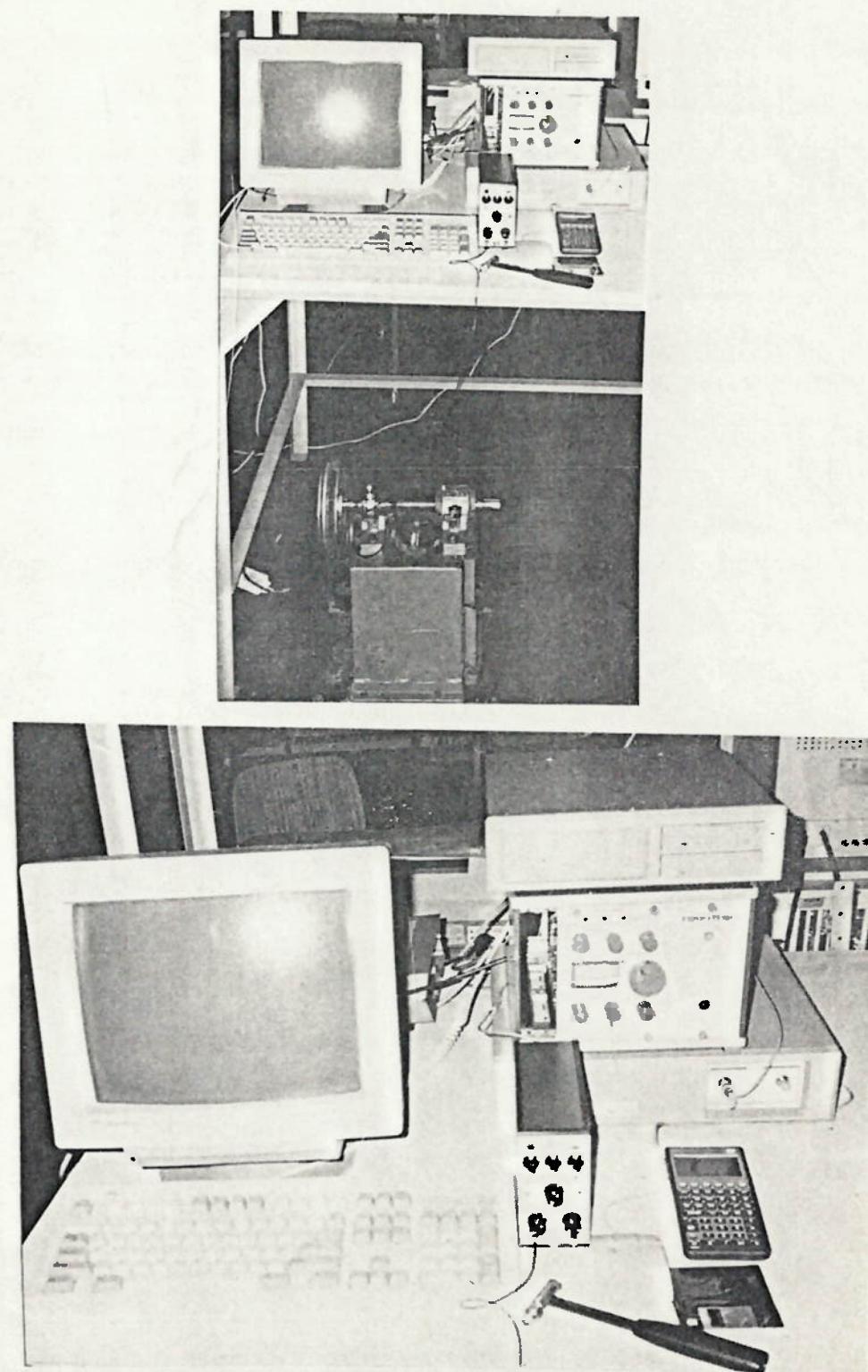


Figura 14: Esquema da bancada planejada para verificação experimental deste Projeto.



Figuras 15a e 15b: Fotografias da bancada utilizada para teste prático da Técnica do Envelope (1).



Figuras 16a e 16b: Fotografias da bancada utilizada para teste prático da Técnica do Envelope (2).

Finalizando este item, um alerta: um cuidado a ser tomado por uma Indústria que pretenda implantar a Técnica do Envelope é justamente quando da verificação de necessidades em termos de aquisição de aparelhagem eletrônica.

Afinal de contas, uma das grandes vantagens da Técnica do Envelope é exatamente a vantajosa relação custo-benefício, compensando-se rapidamente o investimento feito, através da redução dos custos de Manutenção.

Esta observação é necessária porque as Empresas vendedoras de equipamentos eletrônicos - não obstante o ótimo atendimento prestado aos clientes - sendo detentoras da maior parte do conhecimento técnico imprescindível à aplicação de técnicas sofisticadas e recentes, logo pouco conhecidas, como esta, e sendo também praticamente as únicas fontes de publicação e disseminação destes conhecimentos, tendem a criar necessidades, obviamente visando aumento de vendas.

É o caso dos 'detetores de envelope', equipamentos bastante caros, perfeitamente dispensáveis desde que se disponha da aparelhagem descrita acima, muito mais flexível, capaz de atender a diversas outras finalidades.

3.2) - Métodos

Os principais procedimentos práticos, de caráter experimental, desenvolvidos neste Projeto, foram três: a remontagem dos rolamentos no eixo, a execução da Análise de Envelope propriamente dita e a utilização em Laboratório de um Método paralelo ao do Envelope, o Método 'Spike Energy'.

3.2.1) - Remontagem dos rolamentos no eixo

Não estava prevista a remontagem dos rolamentos no eixo. Ela só ocorreu porque a montagem feita pela firma DIN, fabricante das caixas dos mancais, foi péssima.

Este fato foi detectado durante os ensaios com a Técnica do Envelope em Laboratório. Ocorreu que o eixo deslizou por dentro dos rolamentos, devido ao insuficiente aperto das porcas. Com isso, a polia do ventilador encostou na chapa de sustentação dos mancais e do eixo. A consequência final foi um grande aquecimento da estrutura e ruídos anormais que chamaram a atenção para o que estava acontecendo - que pelo menos evitaram a ocorrência de um acidente no Laboratório.

A remontagem foi realizada na Oficina da Mecânica. Essa tarefa consumiu do Projeto um tempo precioso, que deveria ser dedicado a atividades muito mais técnicas e menos braçais. Pelo menos, restou o aprendizado de utilização efetiva de diversas ferramentas, tais como chave de gancho para a porca do rolamento, saca-polias e outras.

Na remontagem também foi feita uma nova furação na chapa de sustentação do eixo, para melhorar o posicionamento das caixas dos mancais. Aqui, foi utilizada a furadeira de coluna da Oficina.

A prova de que a remontagem foi um serviço bem feito, apesar da inexperiência em tarefas deste tipo, é o fato de que não houve mais qualquer outro problema com a parte mecânica da bancada até o fim da execução deste Projeto.

3.2.2.) - Análise de Envelope em Laboratório

A principal atividade experimental deste trabalho foi desenvolvida sem grandes alterações em relação ao que tinha sido planejado.

A Técnica do Envelope foi testada seguindo-se cinco passos principais, expostos a seguir.

1) - Determinação da freqüência natural da estrutura do ventilador

Foi utilizado o método da excitação impulsiva, pela sua simplicidade em relação a outros métodos alternativos, como a Análise por Elementos Finitos, e pelos resultados confiáveis a que leva.

Na prática, a excitação impulsiva é de execução bastante fácil. Basta simular o efeito das choques das esferas do rolamento contra o seu anel externo, martelando-o.

O Espectro colhido pelo acelerômetro e processado pelo Analisador de Fourier é mostrado na tela do computador. Deve-se então selecionar o pico de maior amplitude como a frequência natural mais destacada da estrutura. Isso porque as máquinas não são como os sinos por exemplo, que excitados por um impulso (badalada) vibram numa freqüência bem determinada. Ao contrário, as máquinas geralmente exibem faixas de ressonância, e o usuário da Técnica do Envelope deve determinar o pico mais destacado entre todos.

A martelada deve ser seca e não muito forte, para que não seja verificada saturação (*overload*) na medida. Através de média processada pelo Analisador de Fourier, ao longo de mais de 100 marteladas, para garantir um resultado fiel à realidade, foi determinada para a estrutura do ventilador a freqüência de ressonância mostrada na seção de Resultados Obtidos.

2) - Filtragem, em torno da freqüência natural da estrutura, do sinal vibratório oriundo do mancal defeituoso

Esta filtragem é feita em banda estreita, em torno de 3%, para se fugir das interferências de ruídos advindos de outras fontes de vibração presentes na maioria das máquinas, tais como desbalanceamento de motores, desalinhamento de eixos, sujeira de óleo, defeitos em dentes de engrenagens e outras.

Já se falou na seção anterior dos imprevistos surgidos na filtragem, e como eles foram driblados. Na seção de Resultados está o sinal filtrado referente ao rolamento defeituoso estudado.

3) - Obtenção da Transformada de Hilbert do sinal filtrado

Este passo é realizado através do Computador e do Analisador de Fourier. No presente caso, utilizou-se o aplicativo *Math* do programa *IP*, de análise espectral. Este aplicativo dispõe da função *Hilbert* já pronta, reduzindo o cálculo da Transformada a um mero clique de mouse.

O objetivo deste passo é demodular a baixa freqüência de defeito do rolamento da alta freqüência natural da estrutura, que funciona como onda portadora num processo de Modulação em Amplitude.

Só com a Transformada de Hilbert é que se torna possível a obtenção do envelope do sinal vibratório filtrado, oriundo do rolamento a analisar, envelope que por sua vez contém as freqüências de defeito desejadas. Veja a Transformada de Hilbert do sinal filtrado obtida em Laboratório na seção de Resultados Obtidos.

4) - Obtenção do Envelope do sinal filtrado

Este passo também é de execução trivial com o Analisador de Fourier. Isso porque o Envelope - isto é, a envoltória, a parte mais externa - do sinal colhido no mancal a estudar (e filtrado em torno da freqüência natural da estrutura, como foi visto) nada mais é do que a raiz quadrada da soma dos quadrados deste sinal e de sua Transformada de Hilbert.

Como o aplicativo *Math* realiza todas as operações descritas acima, o Envelope é obtido facilmente.

O sinal de Envelope contém as freqüências de defeito do rolamento e seus harmônicos, já demoduladas da freqüência de ressonância da estrutura e livres de qualquer interferência de ruídos presentes na máquina.

5) - Determinação do Espectro do Envelope

Este passo é uma seqüência previsível do anterior. Isto é, uma vez que o sinal de Envelope contém as freqüências de defeito do rolamento, a Transformada de Fourier - FFT, também disponível no aplicativo *Math* do Analisador de Fourier - apresenta tais freqüências diretamente no Espectro.

O usuário pode ler facilmente os valores das freqüências correspondentes aos harmônicos - já que o Computador determina os picos locais detectando mudanças do sinal da derivada primeira - e os percorre automaticamente quando se pressiona F1 (picos percorridos da esquerda para a direita) ou F2 (picos percorridos da direita para a esquerda).

Encerrando este item, uma interpretação resumida da Técnica do Envelope.

O objetivo único da Técnica é detectar as freqüências de defeito, que serão associadas aos respectivos defeitos por meio de fórmulas que levam em consideração a geometria do rolamento e a rotação do eixo.

Mas isso não é tão simples: essas freqüências não podem ser detectadas diretamente, porque na mesma faixa que elas e com muito mais energia há fontes de ruído nas máquinas que mascaram as freqüências de defeito.

O que se faz então na Técnica é detectar os defeitos indiretamente. Como? Pela observação de que os impactos dos elementos rolantes com os defeitos, que se repetem com a baixa freqüência de defeito, são na verdade impulsos, que excitam as altas freqüências de ressonância da estrutura.

Surge um processo de Modulação em Amplitude. E a demodulação, via Transformada de Hilbert, fornece o envelope que dá o nome à Técnica e contém as freqüências defeito e seus harmônicos já livres de qualquer ruído, tal como era o objetivo inicial. Sem dúvida, trata-se de uma idéia engenhosa.

3.2.3) - Utilização do Método ‘Spike Energy’

A decisão de aplicação deste método, paralelamente ao uso da Análise de Envelope, foi fruto de uma tendência observada para a Manutenção Preditiva. É que este tipo de Manutenção, hoje em dia, tende cada vez mais a ser executado por Sistemas Especialistas e Equipamentos dedicados que integram diversas funções [24,25].

Ou seja, atualmente já se fazem simultaneamente medidas de temperatura, estado do óleo, nível de vibrações - este é o caso do presente Projeto - e outras características das máquinas a fim de se determinar com precisão qual o momento exato em que ela precisa dos cuidados da Manutenção.

Assim, decidiu-se aqui buscar uma fonte complementar de informações sobre o estado do rolamento, além da Análise de Envelope. Este procedimento também traria a vantagem de confirmar ou não as conclusões daquela Análise.

Aqui foi utilizado o modelo IRD 811M, portátil, para a Análise, setado para medir o valor RMS de vibrações de freqüências superiores a 1 KHz. Este aparelho apresenta diretamente em seu visor a aceleração de vibração. Se este valor for baixo, o rolamento está em bom estado, caso contrário está em mau estado.

Este método foi aplicado com o mesmo rolamento e com a mesma bancada da Análise de Envelope, conforme indicado na Figura 17, a seguir, que deve ser comparada com a Figura 14. Para a aquisição do sinal vibratório, adotou-se o *pick-up* em forma de ponta longa, que tem a vantagem de já trazer componentes como o Amplificador de Carga embutidos.

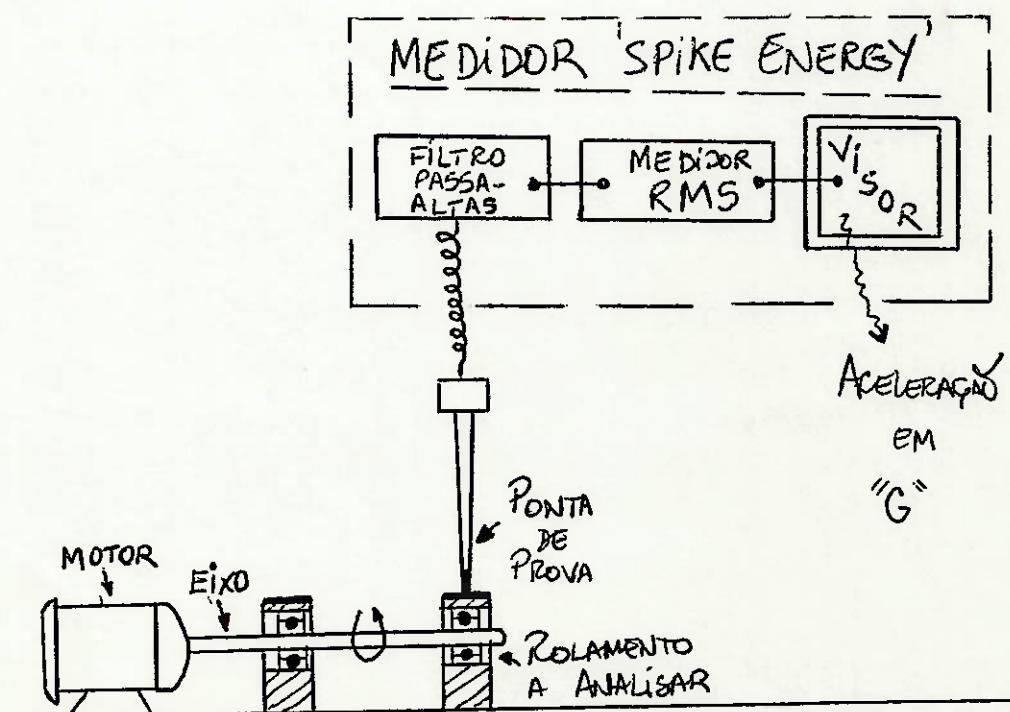


Figura 17: Esquema da bancada sendo analisada por 'Spike Energy'.

Os resultados da aplicação deste método, que basicamente concordaram com os da Técnica do Envelope, estão na próxima seção.

4) - RESULTADOS OBTIDOS

Os principais resultados conseguidos ao longo da execução da parte experimental deste Projeto serão apresentados agora, em ordem cronológica de obtenção. Esta ordem corresponde basicamente aos cinco passos da Análise de Envelope em Laboratório, descritos na seção anterior. Todos os resultados serão discutidos na próxima seção.

4.1) - Freqüência de ressonância da estrutura

Foi obtida por média de 120 excitações impulsivas, resultando em 2450 Hz. A seguir, são exibidas duas das amostras que levaram ao resultado exposto.

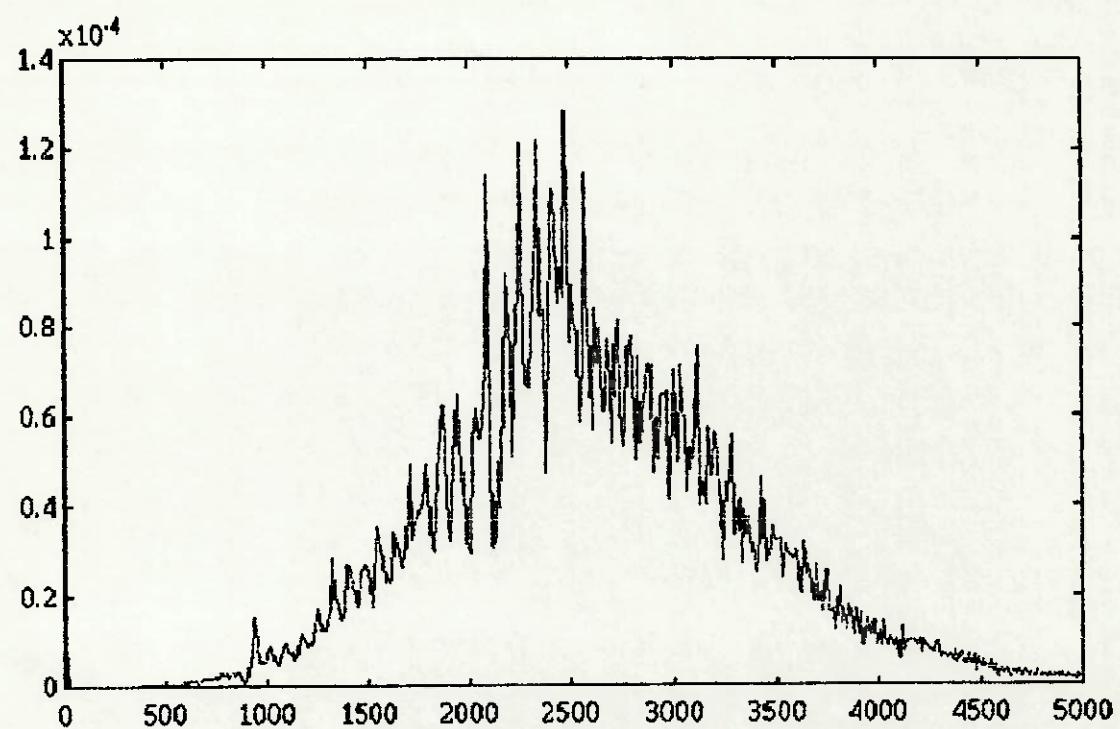


Figura 18:
Determinação da freqüência natural da estrutura, abscissa em Hz (1).

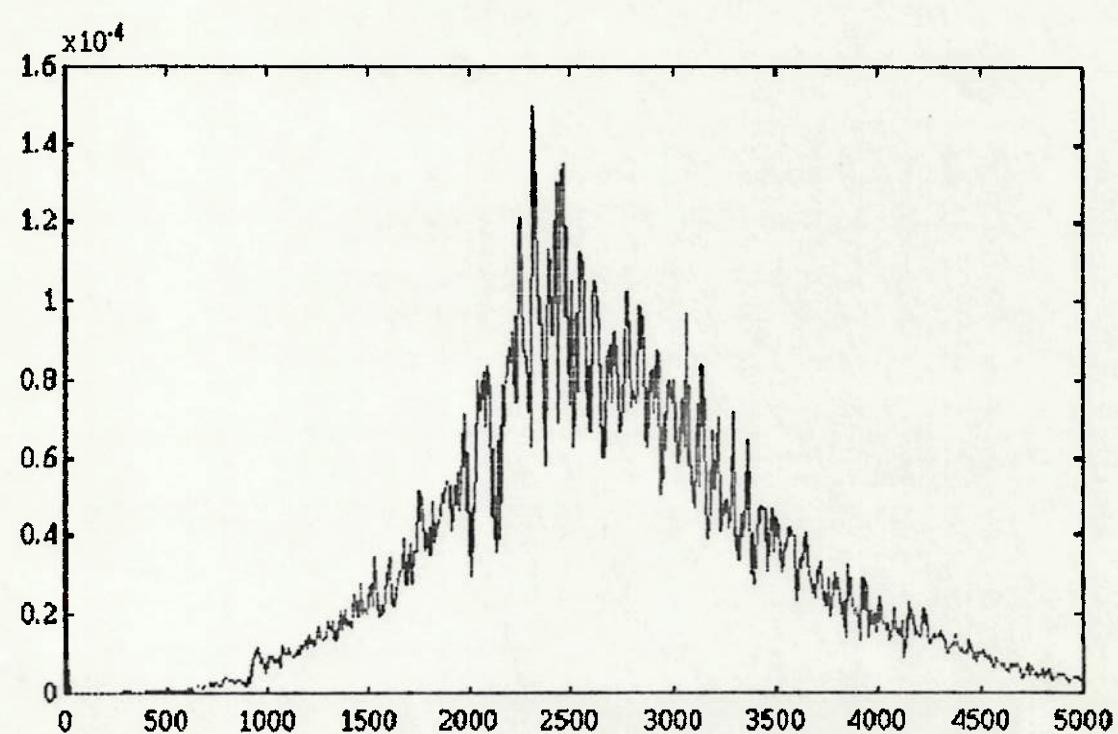


Figura 19:
Determinação da freqüência natural da estrutura, abscissa em Hz (2).

4.2) - Sinal vibratório do rolamento analisado

Este sinal, no tempo, é simplesmente o proveniente do rolamento no qual se fez o defeito.

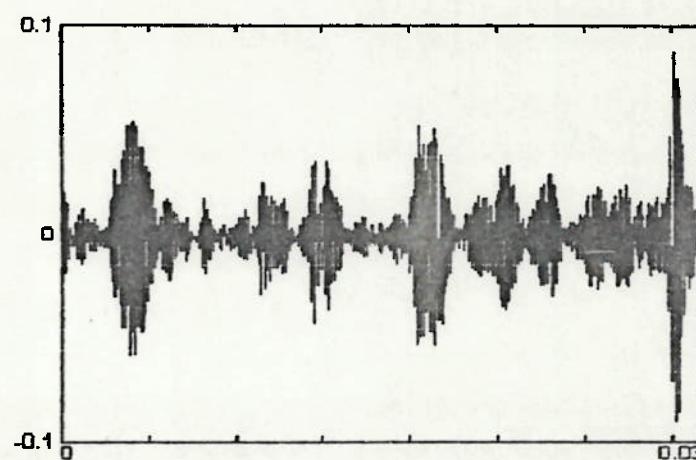


Figura 20: Sinal do rolamento no tempo, abscissa em segundos.

4.3) - Sinal filtrado em torno da ressonância estrutural

É a janela A da Figura 21, a seguir, diretamente obtida do Analisador de Fourier.

4.4) - Transformada de Hilbert do sinal filtrado

Janela B da próxima Figura, 21.

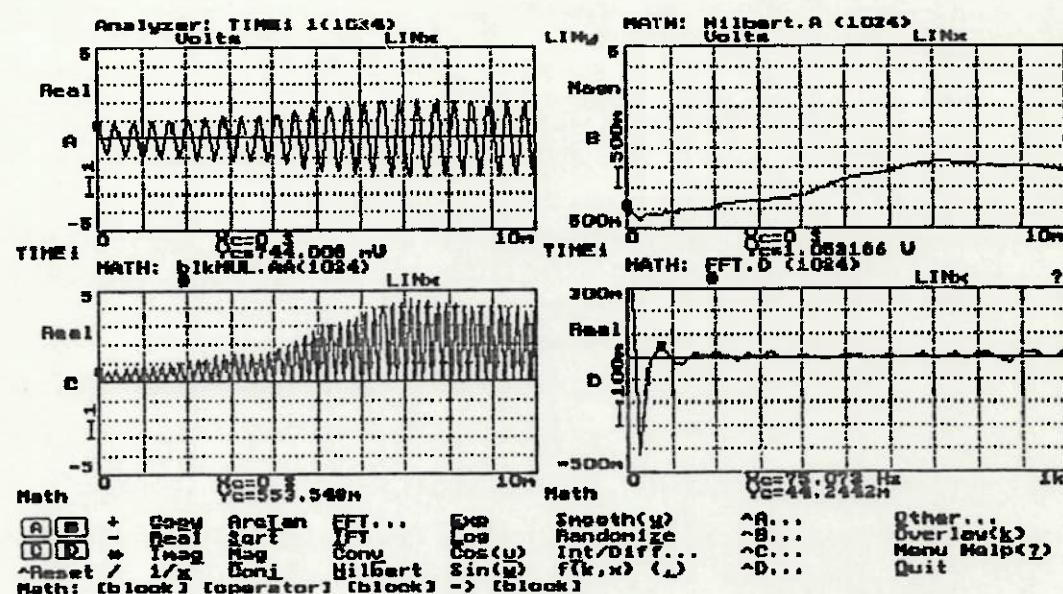


Figura 21: Tela-resumo da Análise de Envelope no rolamento estudado (1).

4.5) - Espectro de Envelope

Este Espectro aparece nas janelas D das Figuras 21 e 22. Na Figura 21 aparece destacada a frequência de defeito na pista externa, que vale 75,073 Hz. Já na Figura 22 é visível a frequência de defeito na pista interna, de 100,1 Hz.

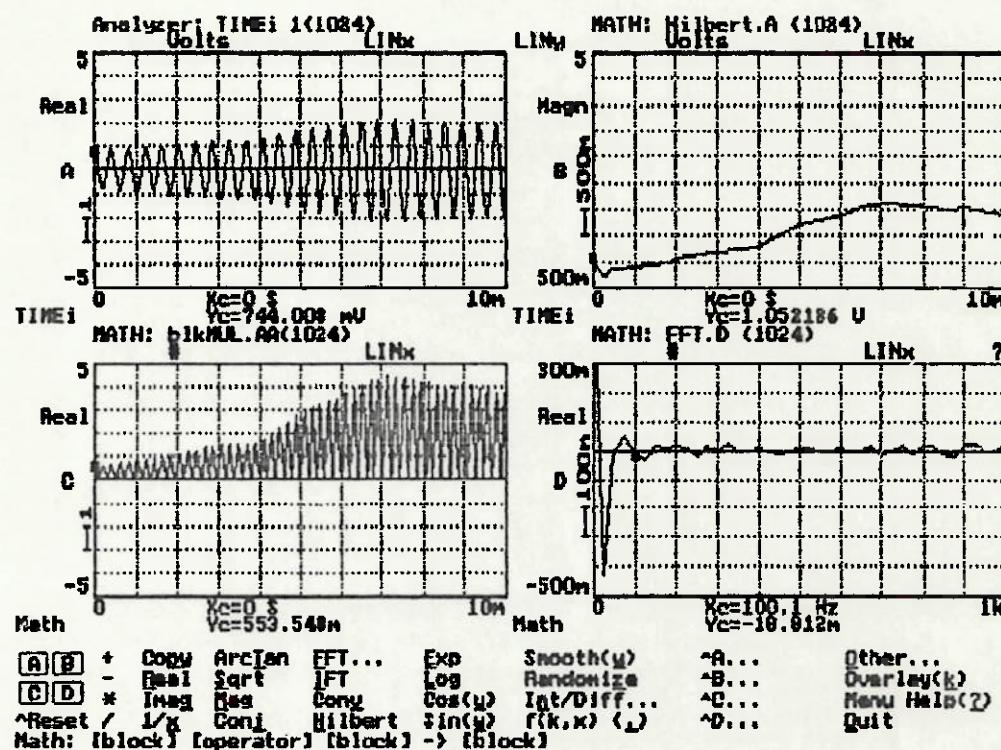


Figura 22: Tela-resumo da Análise de Envelope no rolamento estudado (2).

4.6) - Utilização do método 'Spike Energy'

Foi lida diretamente no visor do instrumento aqui utilizado, o IRD 811M, uma aceleração de vibração igual a 3.g, onde g corresponde à aceleração da gravidade.

Com este dado e com a rotação do eixo, que vale aproximadamente 750 R.P.M. - 1680 R.P.M. do motor com 4/9 de razão de redução da transmissão por polias - pode-se consultar os Bancos de Dados já prontos, sob a forma de gráficos como o que segue, para avaliação do estado do rolamento por este método.

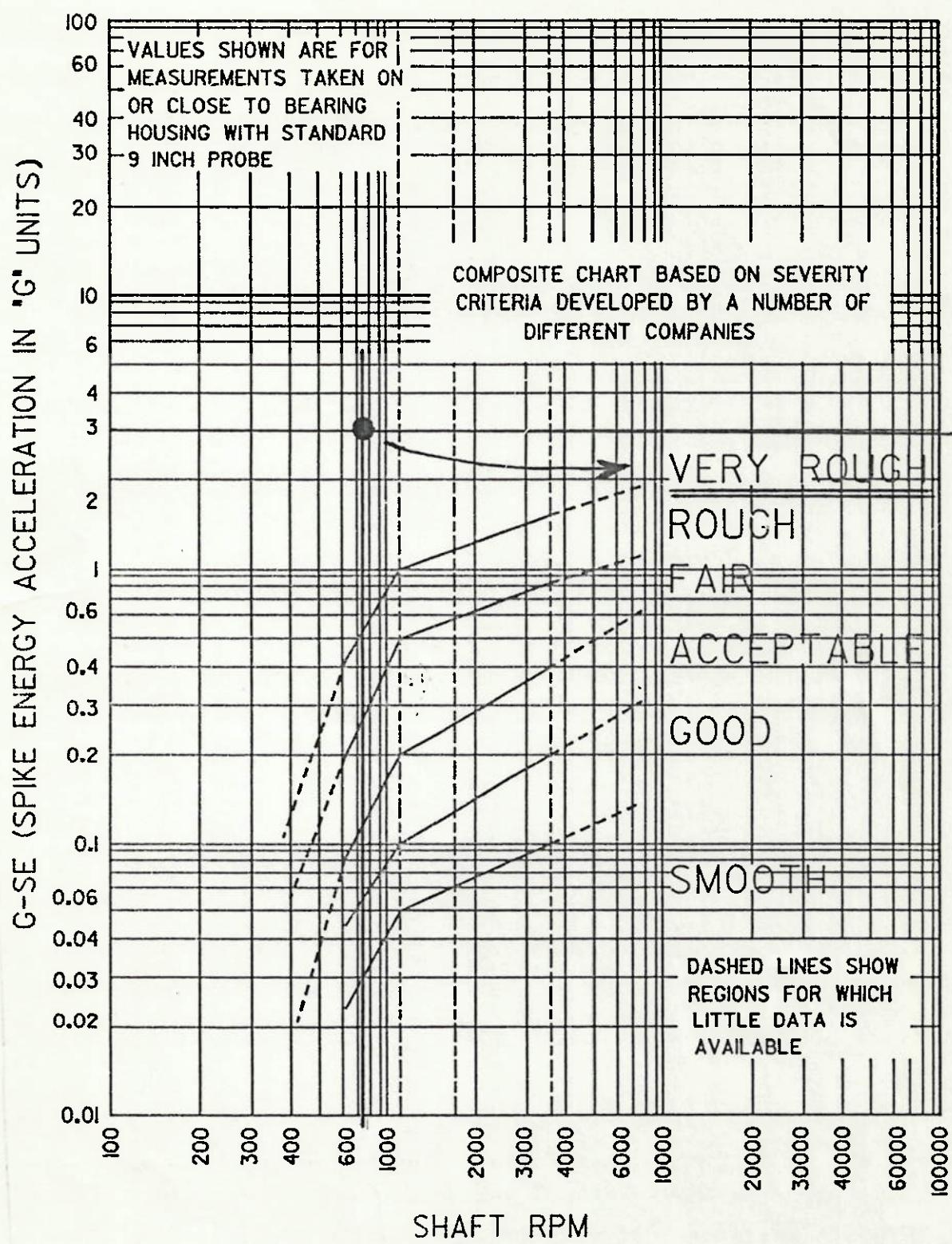


Figura 23: Gráfico mostrando a avaliação do estado
do rolamento analisado através do método 'Spike Energy'.

5) - DISCUSSÃO

Aqui serão analisados os principais resultados expostos na seção anterior. Antes, porém, cumpre discutir um assunto de importância fundamental para que este Projeto atinja seu objetivo, e que até agora não foi abordado. Trata-se da aplicação da Técnica do Envelope a planos de Manutenção Preditiva.

5.1) - Técnica do Envelope e Manutenção Preditiva

A questão básica é: Uma vez detectado e diagnosticado um defeito, quando será o momento ideal de trocá-lo? O rolamento aqui analisado experimentalmente, por exemplo, deveria ser trocado, tendo sido observados defeitos em suas pistas externa e interna?

Para a segunda pergunta, a resposta é sim, conforme será explicado nos dois últimos parágrafos deste item. Infelizmente, já a primeira questão não pode ser respondida genericamente. Isso significa que a princípio não há como se dizer, para cada rolamento e para cada aplicação, exatamente quando deve ser substituído um rolamento defeituoso.

E a razão é simples: a Técnica do Envelope é bastante recente, e ainda não existem Bancos de Dados que correlacionem o nível de vibração do rolamento medido de acordo com esta Técnica com o estado desse rolamento, seja num plano de Manutenção Preditiva por avaliação absoluta como a da Tabela 2, seja num plano de Manutenção Preditiva por avaliação relativa como a da Figura 4.

Assim, o que se recomenda no meio industrial a formação de um Banco de Dados por parte de cada usuário, contendo a sua experiência no uso da Técnica do Envelope.

Ou seja, depois de trocado o rolamento, deve-se prosseguir ensalando o mesmo, até sua falha, inserindo-se o tempo da quebra e o respectivo nível medido de vibração na Base de Dados.

Repete-se este procedimento até se dispor de informações confiáveis. Deste momento em diante, a Empresa terá um aliado importante na luta por uma Qualidade superior de seus Equipamentos: A *Manutenção Preditiva de Rolamentos através da Técnica do Envelope*.

5.2) - Discussão dos Principais Resultados Obtidos

5.2.1) - Freqüência de Ressonância da Estrutura

A freqüência de ressonância da estrutura - a estrutura aqui é entendida, conforme já explicado na seção de Revisão da Literatura, como o sistema vibratório composto pelo rolamento e sua caixa, sendo que o anel externo é o componente de maior importância no sistema [25] - determinada experimentalmente foi de 2450 Hz. O esperado da literatura era um valor entre 5 e 20 KHz. Como explicar esta diferença?

A causa bastante provável desta diferença é o fato do trabalho experimental em Laboratório ter sido desenvolvido com uma estrutura anormal, na qual a tampa superior da caixa do mancal foi retirada.

Tal providência foi necessária para otimizar a detecção do sinal de vibração - que é de baixa intensidade - encostando-se o acelerômetro no anel externo (por sua importância na estrutura) do rolamento.

Na Indústria, isso também é feito, só que de maneira aperfeiçoada: a caixa do rolamento é usinada para permitir a entrada do acelerômetro. Entre outras coisas, este procedimento a nível industrial evita a perda de lubrificação na caixa do rolamento, que ocorreu na bancada experimental deste Projeto.

Provavelmente em consequência do funcionamento da bancada por horas sem lubrificação é que surgiu no Espectro de Envelope do rolo analisado a freqüência de defeito na pista interna, o que não era esperado.

Mas voltando à freqüência natural da estrutura, como entender seu valor abaixo do esperado?

A explicação provável é a seguinte: tendo sido retirada a tampa superior da caixa do rolamento, as forças vibratórias produziam no anel externo do rolo, repetindo, o componente de maior importância no sistema vibratório em estudo - um deslocamento maior que o normal, já que não havia a tampa superior, que de alguma forma restringia este deslocamento.

Ou seja, a rigidez do sistema foi reduzida. E como se sabe da teoria de vibrações que a freqüência natural é diretamente proporcional à rigidez, ela também diminuiu, resultando no valor encontrado, que é inferior ao esperado da literatura.

5.2.2) - Sinal vibratório do rolamento analisado

O sinal do rolamento analisado, sem nenhum tratamento de filtragem ou demodulação, mostrou a característica de rolamentos defeituosos: onda aleatória mais impulsos. Então o resultado obtido - ver Figura 20 - correspondeu ao que era esperado da teoria - ver Tabela 1.

5.2.3) - Espectro de Envelope

Há três considerações importantes a tecer sobre o Espectro de Envelope do sinal vibratório oriundo do mancal analisado. Este Espectro aparece na janela D das Figuras 21 e 22.

A primeira consideração é de que os picos observados são de baixa intensidade. Isto já era esperado, porque os sinalis oriundos de rolamentos defeituosos são de baixa intensidade. Justamente por isso é que a Técnica do Envelope precisa driblar o mascaramento por parte dos ruídos presentes na máquina, de maior energia.

A segunda consideração é de que a freqüência de defeito na pista externa, de 75,073 Hz - que já era esperada, afinal de contas corresponde aos defeitos realizados com lápis elétrico para teste da Técnica - apresentou uma pequena diferença, de menos de 2%, em relação ao valor teórico dessa freqüência, calculado de acordo com as fórmulas da Figura 7.

De acordo com a explicação sobre o modelamento matemático que leva àquelas fórmulas, explicação essa que consta da seção de Revisão da Literatura, essa diferença é plenamente aceitável e também já era esperada.

Finalmente, a última consideração é a mais interessante, porque trata de um resultado inesperado. É o surgimento da freqüência de defeito na pista interna, pelas razões apresentadas no item 5.2.1 - basicamente, a falta de lubrificação com que girou o rolamento.

Esta freqüência de defeito na pista interna também apresentou um pequeno desvio - este sim, já esperado - inferior a 3%, em relação ao cálculo teórico com as fórmulas da Figura 7.

5.2.4) - Método 'Spike Energy'

O resultado da aplicação deste método, mostrado na Figura 23, foi muito importante porque representou uma confirmação ao principal resultado obtido pela Análise de Envelope: o de que o rolamento analisado estava defeituoso.

E note-se que não paira qualquer dúvida sobre esta afirmativa, pois naquela Figura o mancal analisado aparece inserido nitidamente na região de rolamentos muito defeituosos.

6) - CONCLUSÃO

O método 'Spike Energy' apresenta sobre a Técnica do Envelope a vantagem de fornecer uma informação imediata a respeito do estado do rolamento analisado. Já na Técnica do Envelope, só após a criação de um Banco de Dados confiável contendo um certo tempo de experiência do usuário na aplicação da Técnica é que se pode conhecer aquele estado.

Em compensação, a Análise de Envelope é muito mais poderosa, porque detecta falhas incipientes nos rolamentos - o que a torna perfeitamente compatível com sofisticados planos de Manutenção Preditiva - e principalmente porque é a única Técnica capaz de diagnosticar as falhas detectadas.

Mas afinal, qual é a importância prática do diagnóstico das falhas?

Aqui, existem dois aspectos básicos, um ligado à área de Projeto e outro, à de Manutenção.

Erros de Projeto podem ser inferidos através da Análise de Envelope. Por exemplo, se constantemente são diagnosticados defeitos na gaiola de um mancal, é provável que a seleção do rolamento tenha sido infeliz, pois a principal causa de defeitos na gaiola são velocidades excessivas, e, consequentemente, forças de inércia excessivas a que o rolamento fica submetido [22].

O segundo aspecto da importância do diagnóstico é ligado à área de manutenção.

Ou seja, se constantemente são diagnosticadas falhas nas pistas interna e externa de um mancal, a primeira providência do pessoal de Manutenção deve ser uma verificação das condições de lubrificação a que o rolamento está submetido. -

Isso porque sabe-se que a principal causa de defeitos nas pistas interna e externa dos rolamentos é a lubrificação inadequada - tal como foi verificado na prática neste Projeto.

Ao fim deste Projeto, surgem três sugestões para trabalhos semelhantes futuros, expostas a seguir.

A primeira é a obtenção da frequência de ressonância estrutural através de fórmulas adequadas [23], ou via modelagem da estrutura com auxílio de algum programa de Análise por Elementos Finitos. O problema seria como modelar o amortecimento nas junções entre os componentes do mancal.

A segunda é a usinagem adequada da caixa do mancal para permitir a entrada, nela, do acelerômetro sem prejuízo da lubrificação, tal como é feito na Indústria.

Isto manteria os parâmetros da experiência sob um controle mais rígido, evitando o surgimento de freqüências inesperadas, tal como aconteceu neste Projeto.

Finalmente, a última sugestão é que, numa bancada semelhante à aquela utilizada, com um rolamento sabidamente em bom estado e outro sabidamente em mau estado, se faça a Análise de Envelope nos dois mancais.

O objetivo seria testar a parte da teoria da Técnica segundo a qual não há qualquer perigo de serem fornecidas pela Análise de Envelope informações erradas em função da influência do sinal de um rolamento defeituoso em um bom, e vice-versa, devido à grande influência do caminho de transmissão.

Apesar do efeito multiplicador sobre as dificuldades de execução, mostrou-se acertada a escolha de um Projeto prático, que incluisse *hardware* e *software*.

Isto porque realmente há atividades na Engenharia Mecânica de aprendizado impossível em salas de aula ou em simulações de Computadores, devendo ser realizadas na prática pelo Engenheiro pelo menos por uma vez, até para facilitar a futura cobrança sobre o pessoal subalterno. Foi o caso da remontagem dos rolamentos no eixo.

Mas a principal Conclusão deste Projeto foi deixada por último: o objetivo de aplicar a Técnica do Envelope à Manutenção Preditiva de Rolamentos foi efetivamente alcançado, através de um teste prático da Técnica em Laboratório que apresentou resultados lógicos - e confiáveis, na medida em que foram confirmados pela aplicação, no mesmo rolamento e na mesma bancada, de um segundo método de análise, o chamado '*Spike Energy*'.

BIBLIOGRAFIA

Referências Bibliográficas

- 1) - IRD Mechanalysis. **Vibration Technology - 1 Student Textbook.**
- 2) - Den Hartog, J. P. **Vibrações nos Sistemas Mecânicos.** São Paulo, Editora da Universidade de São Paulo.
- 3) - Brown, D. N. e Jensen, T. **Peak and Envelope Analysis for Bearing Fault Detection: A Case Study from a Pacific North-West Mill, U.S.A.** Brüel & Kjær - Application Notes.
- 4) - Gerges, Samir N. Y. **Monitoração e Análise de Vibrações.** Associação Brasileira de Engenharia Automativa, 1993.
- 5) - Seixas, Eduardo de Santana. **Manutenção Corretiva, Preventiva e Preditiva.** 4.º Congresso Ibero-Americanano de Manutenção, Rio de Janeiro, 1987.
- 6) - Gerges, Samir N. Y. e Nunes, Marco A. C. **Detectção de Falhas em Rolamentos através da Medição do Envelope de Vibrações.** IV Congresso Brasileiro de Manutenção.
- 7) - Brüel & Kjær, Application Notes. **Detecting Faulty Rolling-Element Bearings.**

- 8) - Courrech, Joëlle e Gaudet, Mark. **Envelope Analysis - The Key to Rolling-Element Bearing Diagnosis.** Brüel & Kjær, Application Notes.
- 9) - Boulenger, Alain. **Vers la zéro panne avec la Maintenance Conditionnelle.** Paris, AFNOR, 1988.
- 10) - Brüel & Kjær, Application Notes. **System Development WB 1048 - Envelope Detector.**
- 11) - Brüel & Kjær, Application Notes. **Machine Health Monitoring Using Vibration Analysis.**
- 12) - Brüel & Kjær, Application Notes. **Practical Use of the 'Hilbert Transform'.**
- 13) - SKF. **Catálogo Geral.** Torino, Itália, 1990.
- 14) - STAR. **Reference Manual.**
- 15) - STAR. **Theory and Applications.**
- 16) - Tektronix. **Instrument Program Tutorial.**
- 17) - Tektronix. **2600 Application Library - Introduction.**
- 18) - ICP. **General Guide to ICP Instrumentation.**
- 19) - PCB. **Model Operating Guide.**

- 20) - **Impulse Technique for S.F.R. Testing.**
- 21) - Brüel & Kjær. **Piezoelectric Accelerometers and Vibration Preamplifiers - Theory and Application Handbook.**
- 22) - SKF. **Falhas de Rolamentos e Suas Causas.** 1984
- 23) - Goldman, Steve. **Vibration Spectrum Analysis - A Practical Approach.** Industrial Press Inc.
- 24) - NSK. **Extra-Compact Bearing Monitor Model NB-4.** Japão, 1985.
- 25) - NSK. **Bearing Monitor Model NB-4.** Japão, 1988.

Outras Referências Bibliográficas de Leitura Recomendada

- 1') - Boto, P. A. **Detection of Bearing Damage by Shock Pulse Measurements.** Ball Bearing Journal, 1967.
- 2') - Shoel, E. **Shock Pulse Measurement, a New Method for Bearing Monitoring.** Teknisk Informasjon, n.o 7/8, vol. 1, 1969.
- 3') - Quevedo, Carlos Peres. **Circuitos Elétricos.** Editora Guanabara Dols, Rio de Janeiro, 1984.
- 4') - Papoulis, Athanasios. **Signal Analysis.** Editora McGraw-Hill, 1987.

ANDRÉ LUIZ BRAUCKS VIANNA

 - Tel.: (021) 593 - 3122 ou (021) 249 - 5310

**MANUTENÇÃO PREDITIVA DE ROLAMENTOS
ATRAVÉS DA TÉCNICA DO ENVELOPE**

Projeto apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção de Graduação em Engenharia Mecânica com Habilitação em Automação e Sistemas.

São Paulo

1994