



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA - CAMPUS II
PPGEM - PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENG. MECÂNICA



PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE FALHAS EM
ROLAMENTOS DE ROLOS ATRAVÉS DE SINAIS DE
VIBRAÇÃO MECÂNICA**

CÍCERO DA ROCHA SOUTO

CAMPINA GRANDE - PB

NOVEMBRO/2001

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Identificação e Caracterização de
Falhas em Rolamentos de Rolos
através de Sinais de Vibração
Mecânica**

Autor: Cícero da Rocha Souto

Orientador: Antonio Almeida Silva

Campina Grande, novembro de 2001

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Identificação e Caracterização de
Falhas em Rolamentos de Rolos
através de Sinais de Vibração
Mecânica**

**Autor: Cícero da Rocha Souto
Orientador: Antonio Almeida Silva**

**Curso: Engenharia Mecânica
Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

**Campina Grande, novembro de 2001.
PB - Brasil**



5728i Souto, Cícero da Rocha.
Identificação e caracterização de falhas em rolamentos de rolos através de sinais de vibração mecânica / Cícero da Rocha Souto. - Campina Grande, 2001.
110 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2001.
"Orientação : Prof. Dr. Antonio Almeida Silva".
Referências.

1. Rolamentos de Rolos. 2. Vibração Mecânica. 3. Predição de Falhas. 4. Engenharia Mecânica - Dissertação. I. Silva, Antonio Almeida. II. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). III. Título

CDU 621.882.7(043)

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Identificação e Caracterização de
Falhas em Rolamentos de Rolos
através de Sinais de Vibração
Mecânica**

Dissertação aprovada em 14 de novembro de 2001.



**Prof. Dr. Antonio Almeida Silva, Presidente
Universidade Federal da Paraíba - UFPB**



**Prof. Dr. Linilson Rodrigues Padovese
Universidade de São Paulo - USP**



**Prof. Dr. Carlos José de Araújo
Universidade Federal da Paraíba - UFPB**

Campina Grande, novembro de 2001.
PB - Brasil

DEDICATÓRIA

A minha mãe Marlene, aos meus irmãos Alcebiades e Paulo Fernando, a minha noiva Ana Maria pelo apoio, incentivo e paciência que tiveram comigo durante esse período de dedicação no desenvolvimento desse trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Antonio Almeida Silva pela excelente maneira como conduziu os ensinamentos teóricos e práticos essenciais ao bom desenvolvimento do trabalho. Pela maneira rigorosa e ao mesmo tempo compreensiva na entrega dos resultados.

Ao Prof. Dr. Linilson Rodrigues Padovese (USP) pelo incentivo e ensinamentos transmitidos que funcionaram como uma alavanca na fase experimental desse trabalho.

Aos Professores Dr. Raimundo Carlos Silvério Freire (DEE) e Dr. Cursino Brandão Jacobino (DEE) e ao colega Alexandre Cunha Oliveira (DEE), pela doação e empréstimo de alguns equipamentos que foram indispensáveis na fase experimental do trabalho.

Ao ferramenteiro Alex Franklin Lopes da Silva e ao técnico em manutenção industrial Wilson Leite Sulpino pela construção e montagem da bancada de teste.

Aos colegas, Heretiano Gurjão Filho, Fabiano Vieira de Souza e Marcos Antonio da Silva Irmão pelas discussões proveitosas.

À Lúcia Márcia Donato Quirino, secretária da pós-graduação, pela atenção em alertar para as matrículas e fornecer todas as informações que eram solicitadas.

Aos professores das disciplinas cursadas pelo profissionalismo em transmitir os ensinamentos.

À UFPB/CCT/DEM por possibilitar o desenvolvimento do trabalho.

À CAPES pelo apoio financeiro dado através da bolsa de estudos concedida.

À FERGEL em nome de José Bonifácio Leite Sulpino pelo apoio e liberação de suas máquinas para construção da bancada de teste.

SUMÁRIO

1 Introdução	
1.1 Introdução Geral	1
1.2 Generalidades	1
1.3 Objetivos do Trabalho	2
1.3.1 Objetivo Geral	2
1.3.2 Objetivos Específicos	3
1.4 Desenvolvimento do Trabalho	3
1.5 Organização do Trabalho	4
2 Revisão Bibliográfica	
2.1 Introdução	5
2.2 Generalidades	5
2.3 Métodos de Análise de Sinais	7
2.3.1 Métodos de Detecção de Falhas através de Níveis Globais	7
2.3.2 Métodos de Análise no Domínio da Frequência	9
2.3.3 Outros Métodos de Análise	11
3 Técnicas e Metodologia de Análise	
3.1 Introdução	14
3.2 Características Dimensionais dos Rolamentos	15
3.3 Frequências Características de Defeitos	16
3.3.1 Defeito na Pista Interna	18
3.3.2 Defeito nos Rolos	19
3.3.3 Defeito na Gaiola	20
3.3.4 Defeito na Pista Externa	20

3.4 Modelos de vibração	21
3.4.1 Defeitos na pista externa do rolamento	21
3.4.2 Defeitos na pista interna do rolamento	23
3.5 Carregamento radial no rolamento	24
3.6 Parâmetros e métodos de análise de sinais	25
3.6.1 Valores <i>RMS</i> e de pico do sinal de vibração	25
3.6.2 Fator de Crista	27
3.6.3 Fator Kurtose	28
3.6.4 Generalidades dos indicadores	29
3.7 Técnicas de análise espectral de sinais	30
3.7.1 Transformada de Fourier para sinais periódicos	30
3.7.2 Técnica do envelope	33
3.7.2.1 Envelope analógico	34
3.7.2.2 Envelope digital	35
3.7.3 Zoom	38
3.8 Metodologia de Análise	40
4 Planejamento Experimental	
4.1 Introdução	43
4.2 Parâmetros de Aquisição	44
4.2.1 Taxa de Amostragem	44
4.2.2 Tamanho da Amostra e Número de Pontos de Discretização	46
4.2.3 Parâmetros utilizados no trabalho	47
4.3 A Bancada de Ensaio	47
4.3.1 - Características gerais dos elementos da bancada de ensaio	49
4.4 Instrumentação e Aquisição de dados	50
4.4.1 - Características gerais dos instrumentos de aquisição de dados	51
4.5 Programas	52
4.5.1 O Software LabVIEW	52
4.5.2 Programa de aquisição do sinal de vibração	57
4.5.3 O Matlab	59
4.6 Coleta de Dados	60

4.7 Tipo de Defeito	60
4.7.1 Frequências características do defeito	61
4.8 Aplicação das Técnicas Envelope e Análise Espectral	62
4.8.1 Técnica do Envelope	62
4.8.2 Análise Espectral	64
5 Resultados e Discussões	
5.1 Introdução	66
5.2 Resultados	66
5.2.1 Resultados com frequência de rotação do eixo 25 Hz	66
5.2.1.1 Sinais no domínio do tempo e da frequência	66
5.2.1.2 Aplicação do zoom nos espectros de frequência	75
5.2.1.3 Aplicação da técnica do Envelope	79
5.2.2 Resultados com frequência de rotação do eixo 60 Hz	83
5.2.2.1 Sinais no domínio do tempo e da frequência	83
5.2.2.2 Aplicação do zoom nos espectros de frequência	91
5.2.2.3 Aplicação da técnica do Envelope	94
6 Conclusões e Sugestões	
6.1 Comentários	99
6.2 Conclusões	100
6.3 Sugestões	101
Referências Bibliográficas	103
Anexos	107

RESUMO

SOUTO, Cícero Rocha, Identificação e Caracterização de Falhas em Rolamentos de Rolos através de Sinais de Vibração Mecânica, Campina Grande: Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, 2001. 126 p. Dissertação (Mestrado).

O objetivo deste trabalho é diagnosticar e caracterizar falhas em rolamentos de rolos através de sinais de vibração mecânica utilizando-se para análise as técnicas do Envelope e espectral, ambas evidenciando as regiões de frequências mais excitadas pelo defeito. Foram utilizados como ferramentas para aquisição dos sinais de vibração um computador PC, o software LabVIEW, uma placa de aquisição de dados e um acelerômetro alimentado por um condicionador de sinais. As medições foram realizadas numa bancada de teste em laboratório e tiveram como parâmetros variáveis duas rotações de eixo, dois valores de carregamento no rolamento de teste e três graus de severidade de falha introduzidas artificialmente. Os resultados mostraram que as técnicas usadas foram eficientes apresentando resultados compatíveis na identificação e caracterização da falha, evidenciando a frequência característica de defeito.

Palavras Chaves:

Sinais de Vibração, Técnicas de Análise, Detecção de Falhas, Rolamentos de Rolos

ABSTRACT

SOUTO, Cícero Rocha, *Identification and Characterization of defect in roller bearing through mechanical vibration signal*, Campina Grande: Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, 2001. 126 p. Dissertação (Mestrado).

The objective of this work is to diagnose and to characterize defect in roller bearings through the acquisition of vibration signal using for analysis the techniques of the envelope and spectrum, both applied in regions of frequencies of the spectrum more excited by the defect. It was used as tools for acquisition of the vibration signal a computer PC, the software LabVIEW, a data acquisition board, an accelerometer and a signal conditioner. The measurements were accomplished in a test rig in laboratory and its had as variable parameters two shaft speeds, two load values and three degrees of defect severity introduced artificially. The results showed that the techniques were efficient in the identification and characterization of the defect, evidencing the characteristic frequencies, presenting compatible results to each other.

Key Words:

Vibration Signal, Techniques of Analysis, Defects Detection, Roller Bearings

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Introdução Geral

Este capítulo apresenta uma visão geral dos objetivos, do desenvolvimento e da organização deste trabalho, evidenciando algumas particularidades que serão vistas com maior ênfase posteriormente.

1.2 Generalidades

Os sinais de vibração mecânica podem ser coletados através de sensores de deslocamento, velocidade e aceleração que traduzem a vibração em níveis correspondentes de tensões e/ou correntes elétricas. Tomando como exemplo um sistema massa mola amortecedor de um grau de liberdade, pode-se descrever sua vibração através de um sinal com amplitudes e frequências que dependem de parâmetros como massa, rigidez e amortecimento do sistema. No caso de um sinal aleatório, é possível tratá-lo estatisticamente e fazer a correlação entre as características do sinal de vibração com o comportamento do sistema em análise. Pode-se também aplicar técnicas de análise variadas de modo a facilitar a identificação das características desejadas.

A facilidade da manipulação de sinais de vibração viabiliza cada vez mais a aplicação das técnicas de análise em manutenção preditiva de máquinas e equipamentos nas indústrias, não sendo mais compensador deixar a máquina danificar para consertá-la. Os prejuízos de parada de produção são relativamente altos. Entretanto, se houver um acompanhamento do funcionamento da máquina por equipamentos de medidas apropriados, paradas podem ser programadas de acordo com o estado da máquina naquele momento, evitando o incidente da parada por defeito. Quando uma máquina quebra, os danos podem ser bem maiores do que apenas a peça que estava prestes a falhar. Um componente de máquina que apresenta defeito em operação pode danificar outros componentes e com isso elevar o custo da manutenção.

Dessa forma, como a vibração mecânica é um indicador bastante eficiente na apresentação do comportamento irregular da máquina, é possível, através da coleta dos sinais de vibração diagnosticar o estado atual de funcionamento, permitindo uma intervenção e assim evitando os transtornos de paradas repentinas que elevam o custo de manutenção.

A aplicação da manutenção preditiva pode ser estendida a vários componentes de máquinas na intenção de diagnosticar falhas. Os rolamentos em particular, são componentes que necessitam bastante atenção, pois seu mal funcionamento pode além de provocar vibração à máquina, causa ruído, aumento de temperatura no mancal e em caso de quebra acarretar sérios problemas a máquina. O rolamento, por ser um componente de máquina com forma geométrica bem definida, possibilita calcular boa aproximação as frequências características de defeito que estão relacionadas com cada elemento que o compõe. Dessa forma, conhecendo as frequências características de defeito pode-se, através da investigação no espectro de frequência do sinal de vibração, detectar a presença ou não do defeito e ainda indicar qual o elemento do rolamento que está danificado.

1.3 Objetivos do Trabalho

1.3.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral utilizar os sinais de vibração mecânica produzidos por um defeito introduzido na pista externa de um rolamento de rolos para, através

da forma e características do sinal, identificar e caracterizar o tipo de defeito introduzido. Para isso, foram aplicadas as técnicas do envelope e a análise espectral.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Apresentar os valores dos indicadores de níveis globais correspondentes a cada tipo de sinal de vibração.
- Evidenciar o aumento da energia do sinal através do espectro de potência com a introdução e aumento do defeito na pista externa do rolamento.
- Aplicar a técnica do envelope e a análise espectral para identificar e caracterizar o tipo de defeito introduzido.
- Comparar a eficiência de cada técnica na identificação e caracterização do defeito.

1.4 Desenvolvimento do Trabalho

Os sinais de vibração mecânica apresentados neste trabalho foram coletados de uma bancada de ensaio com um rolamento de rolos com defeito na pista externa. Para estes sinais foram utilizados alguns indicadores de níveis globais como: valor de pico, nível *RMS*, fator de crista e kurtose, observando-se o comportamento de cada um deles com o crescimento do defeito introduzido artificialmente.

Foram aplicadas as técnicas de análise espectral e Envelope ao espectro de frequência do sinal de vibração, nas regiões de aumento de energia do sinal em comparação com o espectro de frequência de um rolamento sem defeito. As técnicas de análise que utilizam o espectro de frequência proporcionam uma melhor interpretação do sinal devido ao fato de apresentarem todas as suas frequências. As linhas espectrais de frequência são identificadas separadamente, destacando as frequências características de defeito, caso existam. Esse procedimento facilita a visualização do defeito, pois além de identificar sua presença ainda evidencia em qual componente do rolamento se encontra o defeito.

1.5 Organização do trabalho

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica que sintetiza resultados e conclusões de trabalhos desenvolvidos por outros autores e que tem relação com o estudo desse trabalho.

O capítulo 3 apresenta as técnicas utilizadas, detalhando cada método de análise de sinais de vibração, bem como a metodologia de análise aplicada a este trabalho. O equacionamento necessário ao desenvolvimento do trabalho também é mostrado.

O capítulo 4 apresenta o planejamento experimental, descrevendo todo o sistema de aquisição de dados incluindo os softwares de aquisição e de processamento e análise dos sinais de vibração, assim com os parâmetros de aquisição. São apresentados também os componentes e a bancada de teste utilizada. Mostra-se os tipos de defeito considerados, como foram introduzidos e os parâmetros variáveis de cada ensaio realizado.

O capítulo 5 apresenta os resultados e discussões realizadas a partir dos dados coletados e das técnicas de análise de sinais aplicados.

O capítulo 6 apresenta as conclusões e sugestões cabíveis aos resultados encontrados correlacionando-as com os objetivos anteriormente apresentados.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

Este capítulo apresenta sucintamente resultados e discussões de trabalhos correlata desenvolvidos por outros autores. Através deles obtém-se uma referência para a comparação de resultados.

2.2 Generalidades

Uma máquina ou equipamento mecânico é composto de vários tipos de mecanismos, que transformam os movimentos e os esforços de maneira a desenvolver um determinado trabalho. Para que esses movimentos se desenvolvam é necessário que os mecanismos estejam apoiados e possam deslizar facilitando o movimento desejado. Os eixos, responsáveis na maioria das vezes pela transmissão dos movimentos, estão normalmente apoiados em mancais e separados por um componente mecânico que tem a finalidade de não deixar que exista o contato direto com os apoios. Essa separação diminui a força de atrito entre os componentes e, conseqüentemente, os desgastes mecânicos que ocorrem entre eles.

O rolamento, alvo de estudo deste trabalho, tem seu uso em eixos submetidos a rotações consideradas altas e possuem também grandes capacidades de suportarem cargas (radiais e/ou axiais) (Manual NSK, 1999). As esferas ou rolos permitem que o contato entre os elementos mecânicos seja minimizado, diminuindo bastante a força de atrito entre os elementos mecânicos (Shigley, 1984).

Com a utilização crescente de rolamentos surgiu a necessidade de conservação dentro das condições que permitam o seu bom desempenho e por consequência do equipamento. A boa conservação do rolamento permite sempre o desempenho satisfatório da máquina como também garante sua maior durabilidade. A condição de falha de um rolamento pode comprometer toda a estrutura da máquina. Atualmente, a manutenção corretiva têm sido aplicada a máquinas e equipamentos quando acontece um defeito inesperado ou quando é classificada como máquina não crítica em um processo produtivo (ISO 9002). O defeito de um componente da máquina pode danificar outros componentes, acarretando maiores problemas como: maior tempo de parada máquina, maior custo de manutenção, etc. Para a indústria estes fatores são de grande importância. Posteriormente à manutenção corretiva surgiu o conceito de prevenção da falha, que, a partir de padrões de vida útil do rolamento concebidos pelos fabricantes, permite a troca antecipada à falha e viabiliza a parada programada do equipamento. Este tipo de intervenção foi denominada de Manutenção Preventiva. Embora este conceito pareça ter resolvido o problema da manutenção, inconvenientes ocorrem, pois nem sempre o rolamento está realmente com falha e essa verificação obriga a parada, desmontagem, inspeção e montagem do equipamento, trazendo custos financeiros desnecessários. Para solucionar este problema, a Manutenção Preditiva se propõe monitorar constantemente o equipamento permitindo, no caso de rolamentos, acompanhar o desgaste no decorrer do tempo. Esse acompanhamento pode ser feito considerando vários parâmetros, dos quais pode-se destacar os níveis de temperatura, de ruído e de vibração que a máquina possa atingir. Os níveis de vibração são expressos por sinais de vibração dos quais pode-se retirar uma grande quantidade de informações quanto à detecção e diagnóstico de falha com maior precisão possível (Vargas, 1996).

Os sinais de vibração podem se tornar ferramentas para as técnicas de predição de falhas, desde que se desenvolvam métodos baseados em critérios quantitativos e

qualitativos. Dessa maneira, o monitoramento da condição mecânica de máquina rotativa pode ser dividida em duas fases (Silva, 1999):

- 1ª) Selecionar a(s) técnica(s) adequada(s) para detecção e diagnóstico de falhas em um determinado componente através das características dos sinais e padrões vibratórios. Isto significa extrair de um sinal complexo de vibração, sujeito a várias fontes de excitação interna ou externa, características que estejam altamente correlacionadas à falha, evitando-se a possibilidade de falsos alarmes que reduzem a confiabilidade do programa de monitoramento;
- 2ª) Estabelecer critérios e limites para condições aceitáveis de operação de máquinas e necessidade de manutenção. Dentre estes limites, destacam-se os limites absolutos e os limites qualitativos. Os limites absolutos advertem sobre as condições que podem resultar em falhas, sendo baseados em restrições físicas como a folga máxima admissível entre eixo-mancal sem que ocorra contato. Os limites qualitativos são baseados em grandezas físicas como vibração, temperatura e pressão cujos valores são estabelecidos pela experiência e dependem do tipo de máquina, onde e como as medições são efetuadas, grau de precisão e tolerâncias dimensionais, etc.

2.3 Métodos de Análise de Sinais

As técnicas de análise e diagnóstico de falhas podem ser divididas em medição de níveis globais e análise de sinal em frequência. Os níveis globais possuem grande capacidade de detecção do mau funcionamento da máquina, porém se limitam a identificação e diagnóstico da falha. Já as análises em frequência identificam o defeito e onde estão localizados, quando se trata de rolamentos (Marra, 2000).

2.3.1 Métodos de Detecção de Falhas através de Níveis Globais

A detecção de falha através de níveis globais é representada por um valor numérico que descreve uma determinada grandeza ou a relação entre grandezas físicas do sinal de vibração. As informações fornecidas pelos indicadores de níveis globais são mais resumidas, porém são bem mais simples de serem obtidas.

O valor X_{RMS} demonstra fisicamente a energia contida no sinal de vibração. Já o valor X_{PICO} demonstra o valor máximo de pico que o sinal de vibração atingiu. Rush (1997), observou que os níveis RMS do sinal de vibração não são sensíveis durante o estágio inicial de desenvolvimento de falhas, apesar do crescimento à medida que a falha aumenta de tamanho ao longo do tempo. Já os níveis de pico máximo do sinal de vibração se mostraram mais sensíveis nos estágios iniciais de falhas do que quando a falha aumentava de tamanho.

O fator de crista é definido como sendo a relação entre o nível de pico e o nível RMS do sinal medido no rolamento em uma faixa de frequência de análise entre 1 KHz e 10 KHz (Gerges, 1996). Essa relação apresenta um aumento no estágio inicial de falha proveniente da influencia do crescimento mais acentuado do valor de pico com relação ao RMS do sinal, chegando até um valor máximo. A partir desse ponto passa a decrescer pela influencia dos níveis RMS do sinal de vibração que crescem mais rapidamente que os níveis de pico. Essa inflexão da curva do fator de crista mostra que o acompanhamento do desenvolvimento da falha através desse indicador pode mascarar o defeito dependendo da periodicidade da medida. Isso requer um acompanhamento ou histórico do rolamento desde a condição inicial de bom funcionamento..

A kurtose é definida com sendo o quarto momento estatístico dividido pelo desvio padrão ao quadrado do sinal de vibração. Pachaud et al. (1997) demonstraram que a kurtose é proporcional ao quadrado do fator de crista e ao tempo entre impactos, significando que a kurtose é um indicador que depende da frequência de rotação do eixo. A habilidade do fator de crista em identificar a existência de impactos provocados pelos rolos ou esferas passando por uma falha é aproximadamente 13 vezes o tempo de relaxação, enquanto a kurtose corresponde a apenas 3 vezes o tempo de relaxação. Concluiu-se então que a kurtose é um indicador mais sensível que o fator de crista, entretanto, a kurtose é extremamente sensível ao ruído. Na prática é necessário uma filtragem para manter confiabilidade do indicador.

Silva e Souto (2000) aplicaram o fator de crista e kurtose aos sinais de vibração de rolamento de esferas com defeito, concluindo que a medida ou cálculo desses indicadores sobre uma larga faixa de frequência reduz sua sensibilidade devido a efeitos de mascaramento e capacidade de detecção de defeitos.

2.3.2 Métodos de Análise no Domínio da Frequência

As técnicas de análise de sinais no domínio da frequência, ao contrário dos níveis globais, não representam apenas um valor numérico identificando uma característica física do sinal de vibração. Estas técnicas normalmente apresentam e investigam todo conteúdo do sinal amostrado separadamente. Dessa forma, todas as informações existentes no sinal de vibração serão visualizadas na análise. Portanto, pode-se não somente identificar que existe a falha como também localizá-la.

No caso de defeitos em rolamentos, encontram-se as frequências características de defeitos utilizando equações que permitam determinar a frequência de defeito nas pistas, na gaiola e nos elementos rolantes do rolamento (Allan, 1954) , permitindo verificar o componente do rolamento que apresenta o defeito.

Uma das técnicas de análise mais utilizadas é a Transformada de Fourier (*TF*). Em termos de análise espectral é a ferramenta fundamental. A *TF* permite que uma função periódica possa ser decomposta em uma somatória de senos e cossenos equivalente à função inicial (Gomes, 1985). A *TF* não acrescenta informações ao sinal, apenas apresenta as frequências que compõem o sinal original separadas em raias ou linhas espectrais, possibilitando uma melhor interpretação. Para os sinais de vibração gerados por defeitos em rolamentos, a decomposição do sinal original em frequências individuais facilita a visualização das frequências características de defeitos. Essa passagem do tempo para frequência e vice-versa resolve muitos problemas encontrados nas análises de sinal. Embora a *TF* seja uma excelente ferramenta para a análise de sinais, muitas vezes é necessário fazer uso de outras ferramentas de análise, pois, dependendo das características do defeito, das influências externas e de vários outros fatores, a interpretação exclusivamente através da *TF* pode não ser a melhor solução (Hanykin & Veen, 2001) .

A técnica do envelope, conhecida também como detector de envoltória nas telecomunicações, é a demodulação de um sinal no qual a modulante é a informação procurada. Um sinal modulado é composto por um sinal denominado de portador e um outro conhecido como modulante. O primeiro é o sinal de alta frequência, que proporciona a propagação da informação chamada de modulante. Esse tipo de tratamento é muito usado nos sistemas eletrônicos de telecomunicações (Gomes, 1985). Para os sinais de vibração gerados por defeitos em rolamentos tem-se um sinal de baixa frequência proveniente da passagem dos rolos ou esferas pela falha, excitando geralmente as altas frequências. Nesse sentido, a técnica do envelope pode ser aplicada baseada nos mesmos princípios da eletrônica.

Na prática, observa-se no sinal de vibração no domínio da frequência (*TF*) as regiões onde se concentra o maior nível de energia do sinal. Essas poderão ser regiões de ressonâncias estruturais que os impactos provocados pelo defeito esteja excitando, e portanto, devem ser investigadas (Lépore et al, 1999). Isso demonstra que a investigação inicial é um pouco empírica e depende muito da experiência do analista. Definindo uma região de possível investigação, é feita uma filtragem (filtro passa faixa) em torno da frequência de maior energia considerando uma banda lateral inferior e superior. Esse tamanho das bandas podem ser considerado em torno de duas vezes à frequência de defeito, para que o mesmo possa ser visto, caso exista. Esse processo de filtragem elimina parte do ruído e parte das frequências que não estão na região de maior energia. Realizada a filtragem do sinal no domínio da frequência, aplica-se a transformada de Fourier inversa (*TFI*), voltando o sinal para o domínio do tempo para então aplicar o detector de envoltória ou envelope. Aplicando-se novamente a *TF* no sinal filtrado obtém-se o espectro do sinal mostrado nas baixas frequências.

Nunes (1989) observou que existe um risco de não se conseguir distinguir qual o tipo de falha no rolamento com o envelope, caso existam defeitos combinados nas duas pistas ou em uma das duas pistas e nas esferas, ou ainda nas esferas e na gaiola. Provavelmente isso ocorre porque o elemento que provocar o maior impacto irá predominar excitando as altas frequências do sinal no domínio da frequência. Este autor afirma também que quando o defeito se encontra no estágio inicial, a técnica do envelope mostra claramente onde o defeito está localizado.

Vargas (1996) caracterizou a detecção e o diagnóstico de falha em rolamentos de esferas através da aquisição de sinais de pressão e intensidade sonora, em estudo comparativo com o sinal de vibração, utilizando a transformada de Fourier e a técnica do envelope. Foi mostrado que a técnica do envelope é viável para aplicação com sinais acústicos e vibratórios.

Silva e Mucheroni (2000) concluíram que o método de análise em frequência através dos espectros do envelope mostrou-se bastante sensível para detecção e localização de falhas iniciais em rolamentos de esferas, não apresentando boa sensibilidade com o crescimento da falha, especialmente quando a falha se localiza na pista interna.

Lépure et. al. (2000) apresentaram um estudo comparativo da eficiência entre a técnica do envelope e a decomposição wavelets na detecção de defeitos em rolamentos com sinais simulados e com sinais de vibração obtidos em uma bancada de teste. Concluíram que a detecção de defeito através da técnica do envelope em bandas de alta frequência mostrou-se robusta, com baixo custo computacional e indicada quando o defeito localizava-se na pista fixa do rolamento onde não ocorre o efeito da modulação do sinal pela aplicação da carga. Mostraram também que a decomposição wavelets é mais eficiente para detecção de defeito na pista interna do rolamento.

2.3.3 Outros Métodos de Análise

A análise utilizando o Cepstrum reduz o número de picos igualmente espaçados no domínio da frequência em um único pico fundamental no domínio da frequência, coordenada no tempo. O cepstrum de potência é definido como sendo a transformada de Fourier inversa multiplicada pelo logaritmo do seu módulo. Já o cepstrum complexo é definido como sendo a transformada de Fourier inversa multiplicada simplesmente pelo seu logaritmo. O caráter periódico dos espectros observados em rolamentos, engrenagens, rotores desbalanceados, entre outros, acompanhado da facilidade de utilização de filtros passa baixa no espectro, tem reduzido a influência das distorções nas ressonâncias estruturais tornando esta técnica interessante para análise de falhas (Braun, 1986).

As representações tempo-frequência são funções bidimensionais que mostram o comportamento das diferentes componentes em frequência de um sinal a cada instante de tempo. Silva (1999) mostrou que o método da análise conjunta tempo-frequência através dos mapas de contornos *PWVD* (Pseudo Wigner-Ville Distribution), aplicados na caracterização e diagnóstico de falhas de rolamentos de esferas, mostraram resultados satisfatórios, apresentando estruturas típicas de captura simultânea das características temporais e espectrais dos sinais de vibração medidos.

Guimarães e Duarte (2000) mostraram que a distribuição Pseudo Wigner-Ville Distribution (*PWVD*) apresenta limitações para sistemas de engrenagens com falhas, contendo um número reduzido de frequências dominantes, devido a presença de termos cruzados que dificultam a distinção do padrão transiente dos diversos harmônicos. Foi mostrado também que Transformada de Wavelet Contínua (*CWT*) identificou perfeitamente as características transitórias das componentes geradas pela falha do dente da engrenagem e a Distribuição de Choi-Williams (*CWD*) conseguiu detectar todos os casos de falhas.

Estupinam e Saavedra (2000) mostraram que o uso do zoom na análise de sinais no tempo, possibilita a identificação dos impactos periódicos produzidos pela passagem das esferas no defeito. Entretanto, para baixas velocidades, não se obteve um resultado satisfatório pois as amplitudes dos impactos são muito baixas e se confundem com as componentes de baixas frequências.

Uma das maneiras de se obter o diagnóstico de severidade automatizado é através da aplicação de redes neurais artificiais (*RNAs*), cujos algoritmos podem ser utilizados na determinação do nível de severidade associado a defeitos de máquinas rotativas. Alves & Lima (1998) apresentaram um estudo baseado em simulações cujo propósito era tornar possível o diagnóstico de severidade de forma automática. Foram simulados sinais de vibração semelhantes aos de desbalanceamento, desalinhamento e defeito em mancais de rolamentos. Através das simulações foram diagnosticados, mediante o emprego de redes neurais modulares, as severidades dos defeitos citados com diversos espectros que apresentavam ruídos de até 30 % da amplitude máxima. Para níveis de ruídos contendo 50 % da amplitude máxima não foi possível o diagnóstico de severidade.

Padovese (1999) apresentou um estudo que tratou do desenvolvimento de um algoritmo computacional prático para diagnóstico de defeitos e classificação em rolamentos, independentemente das condições de operação. Duas redes neurais diferentes (MLP e PNN) foram utilizadas para identificar quatro classes de defeitos na pista externa do rolamento. Nesse estudo foram discutidos diferentes tipos de estratégias de classificação bem com as influencias no esforço de treinamento e a performance de cada uma delas.

CAPÍTULO 3

TÉCNICAS E METODOLOGIA DE ANÁLISE

3.1 Introdução

Em sistemas mecânicos que utilizam rolamentos como elementos rotativos é muito comum o aparecimento de falhas nos seus componentes devido a desbalanceamentos, desalinhamentos, montagens inadequadas, lubrificação insuficiente, sobrecargas inesperadas, contaminação e fadiga dos componentes. Essas falhas podem aparecer de diversas maneiras nos elementos do rolamento e com isso trazer inúmeros problemas à máquina. Alguns sintomas característicos quando um rolamento começa a apresentar defeito são ruído, aumento de temperatura na região próxima ao rolamento e aumento do nível de vibração da máquina. Este último, se em níveis inadequados, pode excitar frequências naturais do sistema levando a máquina a danos na sua estrutura. As vibrações ocorrem devido a uma superfície defeituosa entrar em contato com outra e produzir impactos de curta duração. Se o rolamento estiver girando com velocidade angular constante, dependendo do componente danificado no rolamento, esses impactos poderão ser repetidos periodicamente com frequência característica de defeito que depende da geometria do rolamento. Os rolamentos podem apresentar defeito na pista externa, na pista interna, nos rolos ou esferas e na gaiola. Cada tipo de defeito determina uma frequência característica que está relacionada com a geometria do rolamento,

ângulo de aplicação da carga e rotação. Um rolamento típico gera um sinal de vibração do tipo aleatório, contendo uma grande concentração de frequências e harmônicos associados. Se a falha é pequena as vibrações geradas serão pequenas e são excitadoras das altas frequências. Porém, com o aumento da falha ocorre um crescimento na vibração passando então a excitar as baixas frequências (Ângelo, 1987). É importante levar em consideração esse fato, pois cada técnica de análise é sensível a uma determinada situação, de modo que nos estágios iniciais da falha é possível usar uma técnica que não seja sensível às amplitudes baixas dos impactos, ou vice-versa. O valor das frequências características de defeitos é obtida através das equações definidas para cada tipo de defeito, facilitando bastante a análise do sinal de vibração, funcionando como um apontador ou localizador da falha, dependendo da técnica de análise utilizada.

3.2 Características Dimensionais dos Rolamentos

As frequências características de defeitos, provenientes de falhas nos componentes dos rolamentos, estão relacionadas diretamente com a geometria de cada rolamento. A Figura 3.1 mostra a geometria de um rolamento de rolos apresentando cada dimensão importante na dedução das equações cinemáticas para cálculos das frequências características de defeitos (Allan, 1954).

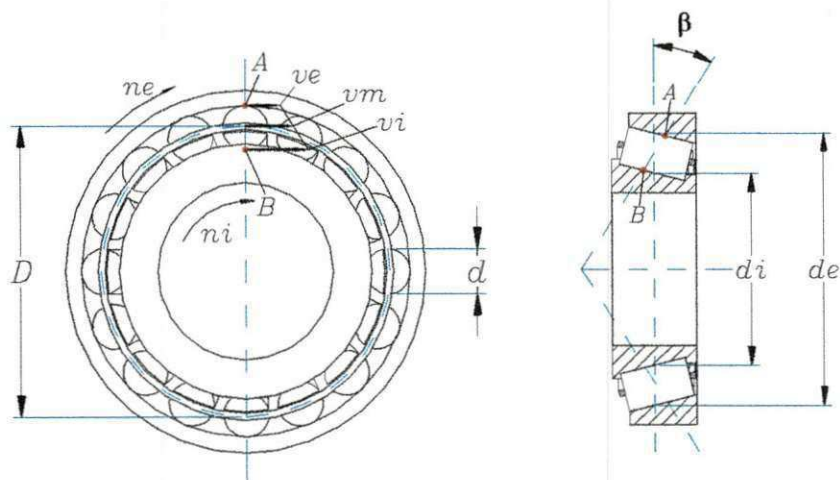


Figura 3.1 – Geometria de um rolamento de rolos

onde: ni = velocidade de rotação da pista interna (rpm)
 ne = velocidade de rotação da pista externa (rpm)
 nrg = velocidade de rotação dos rolos e da gaiola (rpm)
 nr = velocidade de rotação dos rolos em relação ao seu eixo (rpm)
 nri = velocidade de rotação dos rolos relativa a pista interna (rpm)
 nre = velocidade de rotação da pista externa relativa aos rolos (rpm)
 vi = velocidade tangencial da pista interna (mm/s)
 ve = velocidade tangencial da pista externa (mm/s)
 vm = velocidade média (mm/s)
 D = diâmetro médio (mm)
 d = diâmetro do rolo (mm)
 di = diâmetro efetivo da pista interna (mm)
 de = diâmetro efetivo da pista externa (mm)
 β = ângulo de contato (graus)

3.3 Freqüências Características de Defeitos

Considerando-se a velocidade tangencial no ponto B (Figura 3.1) como sendo a velocidade da pista interna e a velocidade tangencial no ponto A como sendo a velocidade da pista externa, a velocidade entre A e B , ao longo do diâmetro do rolo, varia linear e paralelamente às velocidades das pistas. Dessa forma, a velocidade média pode ser expressa por:

$$vm = \frac{vi + ve}{2} \quad (3.01)$$

sendo,

$$vi = \frac{\pi \cdot di \cdot ni}{60} \quad (3.02)$$

e

$$v_e = \frac{\pi \cdot d_e \cdot n_e}{60} \quad (3.03)$$

substituindo-se as equações 3.02 e 3.03 em 3.01 obtém-se:

$$v_m = \frac{\pi}{120} (d_i \cdot n_i + d_e \cdot n_e) \quad (3.04)$$

observando-se a Figura 3.1 encontram-se as seguintes relações:

$$d_i = D - d \cdot \cos \beta \quad (3.05)$$

$$d_e = D + d \cdot \cos \beta \quad (3.06)$$

substituindo-se as equações 3.05 e 3.06 em 3.04 obtém-se

$$v_m = \frac{\pi}{120} n_i \cdot D \left(1 - \frac{d}{D} \cos \beta\right) + \frac{\pi}{120} n_e \cdot D \left(1 - \frac{d}{D} \cos \beta\right) \quad (3.07)$$

Conseqüentemente a velocidade de rotação dos rolamentos e gaiola é dada por:

$$n_{rg} = \frac{1}{2} n_i \left(1 - \frac{d}{D} \cos \beta\right) + \frac{1}{2} n_e \left(1 + \frac{d}{D} \cos \beta\right) \quad (3.08)$$

a velocidade de rotação dos rolos relativo à pista interna é a diferença entre a velocidade de rotação dos rolos e gaiola pela velocidade de rotação da pista interna, como mostra:

$$n_{ri} = n_{rg} - n_i = \frac{1}{2} (n_e - n_i) \left(1 + \frac{d}{D} \cos \beta\right) \quad (3.09)$$

e similarmente, a velocidade de rotação da pista externa relativa aos rolos é dada por:

$$ner = ne - nrg = \frac{1}{2}(ne - ni)\left(1 - \frac{d}{D} \cos \beta\right) \quad (3.10)$$

a velocidade de rotação dos rolos ao redor do seu próprio eixo pode ser encontrada por:

$$nr = \frac{di}{d} nri \quad (3.11)$$

ou por:

$$nr = \frac{de}{d} nre \quad (3.12)$$

substituindo-se a equação 3.09 em 3.11 obtém-se

$$nr = \frac{1}{2} \frac{D}{d} (ne - ni) \left(1 - \frac{d}{D} \cos \beta\right) \left(1 + \frac{d}{D} \cos \beta\right) \quad (3.13)$$

3.3.1 Defeito na Pista Interna

Considerando a pista interna do rolamento a pista estacionária, ou seja, $v_i = 0$, e substituindo este valor na equação 3.09 encontra-se que:

$$nri = -\frac{1}{2} ni \left(1 + \frac{d}{D} \cos \beta\right) \quad (3.14)$$

e nesse caso a velocidade de rotação do eixo $n = ni$, portanto temos que:

$$nri = -\frac{1}{2} n \left(1 + \frac{d}{D} \cos \beta\right) \quad (3.15)$$

substituindo-se as velocidades de rotações em rpm por frequências em Hz tem-se que:

$$f_i = -\frac{1}{2} f \left(1 + \frac{d}{D} \cos \beta\right) \quad (3.16)$$

onde: f_i = frequência de rotação da pista interna [Hz]

f = frequência de rotação do eixo [Hz]

A equação 3.16 mostra a frequência de rotação da pista interna. No entanto deve-se considerar o número de rolos para o cálculo da frequência característica de defeitos, pois os impactos acontecem periodicamente pela passagem de cada rolo pela falha. Dessa forma a frequência característica de defeito na pista interna é dada por:

$$f_{di} = -\frac{1}{2} N_r \cdot f \left(1 + \frac{d}{D} \cos \beta\right) \quad (3.17)$$

onde: f_{di} = frequência característica de defeito na pista interna [Hz]

N_r = número de rolos

O sinal negativo que aparece na equação significa que o sentido de rotação estabelecido para o equacionamento é contrário ao movimento do rolamento.

3.3.2 Defeito nos Rolos

Analogamente à dedução anterior, considera-se $n_e = 0$ e por consequência $n_i = n$, substituindo na equação 3.13 obtém-se a velocidade de rotação dos rolos:

$$n_r = \frac{1}{2} \frac{D}{d} n \left(1 - \frac{d}{D} \cos \beta\right) \left(1 + \frac{d}{D} \cos \beta\right) \quad (3.18)$$

substituindo-se as velocidades de rotações em rpm por frequências em Hz tem-se que:

$$f_{dr} = \frac{1}{2} \frac{D}{d} f \left[1 - \left(\frac{d}{D} \cos \beta\right)^2\right] \quad (3.19)$$

onde: fdr = frequência característica de defeito nos rolos [Hz]

Neste caso a frequência característica de defeito é semelhante a equação 3.18, pois o efeito do impacto é provocado pelo choque entre o defeito num rolo e a pista em contato.

3.3.3 Defeito na Gaiola

Similarmente às deduções anteriores obtém-se a velocidade de rotação da gaiola considerando-se $n_e = 0$, $n_i = v_i$, e substituindo-se na equação 3.08.

$$nrg = \frac{1}{2}n\left(1 - \frac{d}{D}\cos\beta\right) \quad (3.20)$$

substituindo-se as velocidades de rotações em rpm por frequências em Hz tem-se que:

$$fdg = \frac{1}{2}f\left(1 - \frac{d}{D}\cos\beta\right) \quad (3.21)$$

onde: fdg = frequência característica de defeito da gaiola [Hz]

Da mesma maneira que a dedução anterior a frequência característica de defeito é semelhante à equação 3.20.

3.3.4 Defeito na Pista Externa

Para o cálculo da velocidade de rotação da pista externa deve-se considerar que a pista estacionária é a pista interna. Nesse caso $n_i = 0$, e $n_e = n$, pois a pista externa estará girando com a mesma velocidade de rotação do eixo. Substituindo-se essas considerações na equação 3.10 encontra-se a velocidade de rotação da pista externa que é dada por:

$$nre = \frac{1}{2}n\left(1 - \frac{d}{D}\cos\beta\right) \quad (3.22)$$

Substituindo-se as velocidades de rotações em rpm por frequências em Hz e considerando o efeito de todos os rolamentos passando pela falha, obtém-se a seguinte equação:

$$f_{de} = \frac{1}{2} Nr \cdot f \left(1 - \frac{d}{D} \cos \beta\right) \quad (3.23)$$

onde: f_{de} = frequência característica de defeito na pista externa [Hz]

Os cálculos das outras frequências características de defeito devem ser refeitos quando considera-se a pista interna como estacionária. O desenvolvimento das equações é semelhante aos já apresentados.

3.4 Modelos de vibração

3.4.1 Defeitos na pista externa do rolamento

A passagem do rolo por uma falha localizada na pista estacionária, gera um pulso de curta duração. Entretanto, na prática observa-se sucessivos pulsos por decorrência da passagem dos rolos pelo defeito na pista. Esses impactos sucessivos além de aumentar o ruído e a temperatura do equipamento podem excitar frequências de ressonâncias da estrutura. A duração dos impactos é determinada pelo fator de amortecimento do sistema, rigidez da estrutura, lubrificação do rolamento, entre outros. A resposta de vibração de um rolo passando por uma falha na pista externa pode ser expressa como sendo o produto de uma função exponencial $e(t)$ por uma função senoidal $g(t)$ descrita abaixo (Haykin e Veen, 2001):

$$e(t) = e^{-t/\tau} \quad (3.24)$$

onde: t = tempo

τ = tempo de relaxação

e

$$g(t) = A \text{sen } 2\pi f_1 t \quad (3.25)$$

onde: A = amplitude da vibração

f_l = frequência de vibração livre

Nesse caso a resposta de vibração pode ser dada por:

$$s(t) = Ae^{-t/\tau} \text{sen } 2\pi f_l t \quad (3.26)$$

A Figura 3.2 mostra o modelo de vibração de um impacto provocado pela passagem de um rolo por um defeito na pista externa.

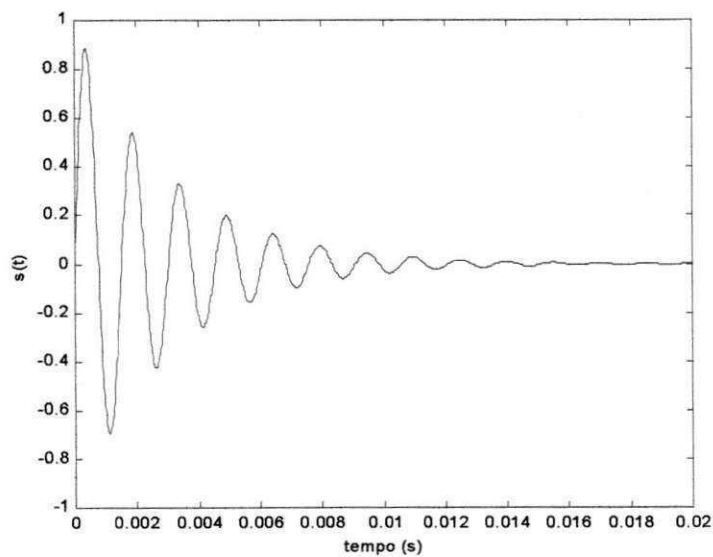


Figura 3.2 – Modelo do sinal de vibração de um impacto

Impactos sucessivos podem ser modelados através da convolução entre $s(t)$ e um pente de Dirac $\delta_{T_d}(t)$.

$$s(t) \otimes \delta_{T_d} = \sum_{-\infty}^{\infty} s(t - nT_d) \quad (3.27)$$

onde: T_d = tempo entre impactos

\otimes = denota a convolução

A Figura 3.3 mostra o resultado da equação 3.27, apresentando o modelo de impactos espaçados de T_d .

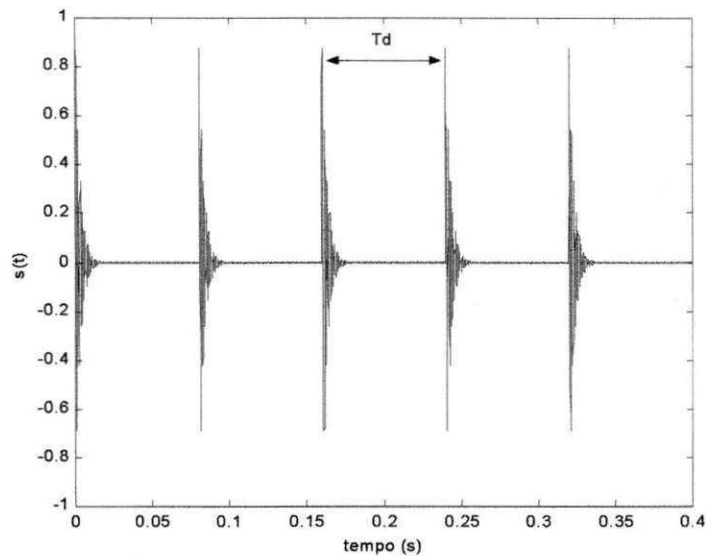


Figura 3.3 – Modelo do sinal de vibração de um defeito na pista externa do rolamento

3.4.2 Defeitos na pista interna do rolamento

O carregamento aplicado ao rolamento influencia bastante o sinal de vibração da pista que se move com a rotação do eixo, ou seja, a pista interna. A variação de carga causa uma modulação em amplitude no sinal de vibração, isso dificulta a identificação da falha (Vargas, 1996). Considerando-se que a amplitude dos impulsos produzidos pela falha é diretamente proporcional à carga nos rolos, a expressão dos impulsos modulados pode ser obtido através da multiplicação de uma série de impulsos $s(t) \otimes \delta_{T_0}$, pela distribuição de carga $q(t)$ (Silva, 1999). A Figura 3.4 mostra um modelo de sinal de vibração na pista interna modulado pela influência do carregamento.

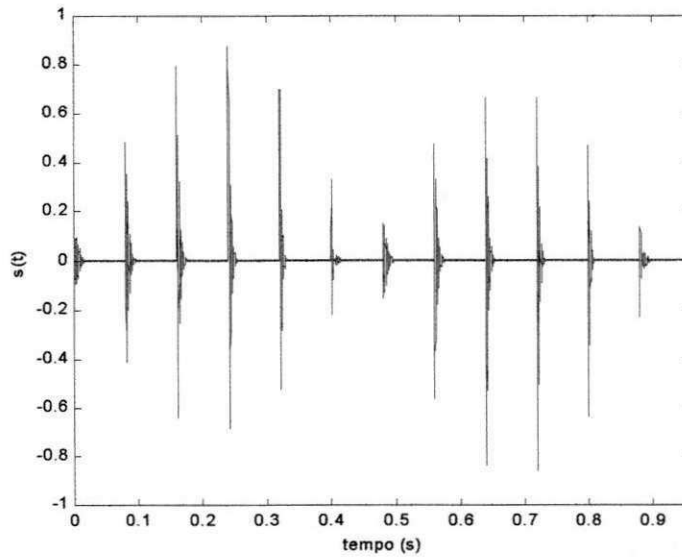


Figura 3.4 - Modelo do sinal de vibração de um defeito na pista interna do rolamento

3.5 Carregamento radial no rolamento

A distribuição de carga ao longo da circunferência de um rolamento sob carregamento radial é determinada pelas deformações elásticas nos pontos de contato entre os elementos rolantes e as pistas, sendo definida pela equação de Stribeck (Harris, 1966):

$$q(\theta) = q_0 \left[1 - \left(\frac{1}{2\varepsilon} \right) (1 - \cos \theta) \right]^n \quad (3.28)$$

onde: q_0 = máxima intensidade de carga

ε = fator de distribuição de carga

θ = posição angular da zona de carga

$n = 10/9$ para rolamento de rolos

Em rolamentos com folga positiva, $\varepsilon < 0.5$ e $\theta_{\max} < \pi/2$, obtém-se uma distribuição de carga conforme mostra a Figura 3.5.

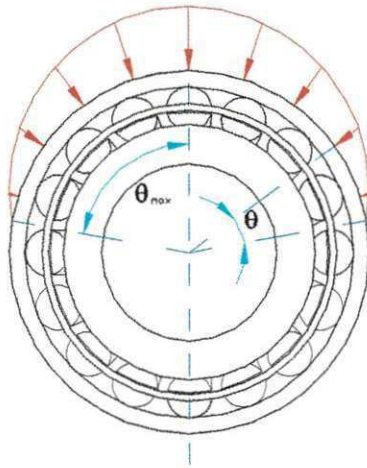


Figura 3.5 - Distribuição de carga radial no rolamento

Observa-se que a equação de Stribeck (3.28) não leva em consideração pequenas flutuações na distribuição de carga que podem ocorrer devido à mudança do número e posição dos elementos rolantes na zona de carga.

A função no tempo, representando a carga instantânea num ponto da pista interna do rolamento, pode ser obtida substituindo θ por $2\pi f_s t$ (equação 3.29):

$$q(t) = \begin{cases} q_o [1 - (1/2\varepsilon)(1 - \cos 2\pi f_s t)]^n & \text{para } |\theta| < \theta_{\max} \\ 0 & \text{fora} \end{cases} \quad (3.29)$$

onde: f_s = frequência de rotação do eixo em revoluções por segundo [Hz]

3.6 Parâmetros e métodos de análise de sinais

3.6.1 Valores RMS e de pico do sinal de vibração

Em sistemas mecânicos, um sinal de vibração pode representar um deslocamento, uma velocidade ou uma aceleração (ver Anexo A). De modo que, na análise de sinais costuma-se definir potência independentemente se o sinal de $x(t)$ representa deslocamento, velocidade ou

aceleração (Bruel & Kjaer, 2001). A Equação 3.30 expressa a potência instantânea do sinal como sendo:

$$p(t) = x^2(t) \quad (3.30)$$

Desta equação, define-se a potência média do sinal como sendo:

$$P = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} x^2(t) dt \quad (3.31)$$

A raiz quadrada da potência média é definida como sendo a energia média quadrática (*RMS* - root mean square) do sinal $x(t)$ e é representada pela equação 3.32.

$$X_{RMS} = \sqrt{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} x^2(t) dt} \quad (3.32)$$

O nível *RMS* do sinal de vibração pode ser usado como indicador de falha no rolamento, exprimindo a energia média do sinal de vibração.

O nível de pico do sinal $x(t)$ (X_{PICO}) é definido como o valor máximo de pico que o deslocamento, velocidade ou aceleração pode assumir.

A Figura 3.6 apresenta esses indicadores representados numa função senoidal. Nesse caso, a relação entre o nível máximo de pico e o nível *RMS* do sinal $x(t)$ é:

$$X_{RMS} \cong 0,707 X_{PICO} .$$

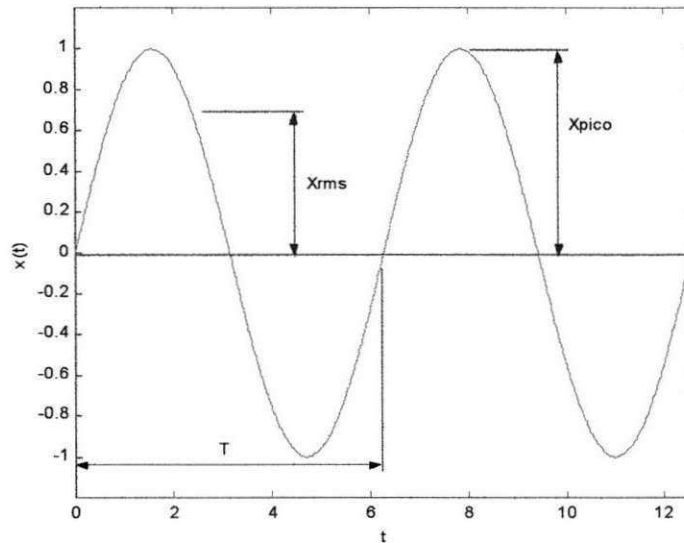


Figura 3.6 - Representação dos indicadores X_{RMS} e X_{PICO}

3.6.2 Fator de Crista

O fator de crista é definido com sendo a razão entre o nível de pico e o nível RMS do sinal de vibração, para uma faixa de análise de frequência entre 1 KHz e 10 KHz. A equação 3.33 mostra esta relação:

$$F_C = \frac{X_{PICO}}{X_{RMS}} \quad (3.33)$$

Conforme Vargas (1996) com a deterioração progressiva das superfícies de contato, o nível X_{PICO} cresce mais rapidamente que o nível X_{RMS} devido ao aumento impulsivo da vibração, causando o crescimento do fator de crista. Com o aumento da falha e conseqüentemente a diminuição impulsiva da vibração, o fator de crista decresce novamente. A Figura 3.7 mostra a evolução do fator de crista em função das variações dos níveis de pico e RMS do sinal de vibração.

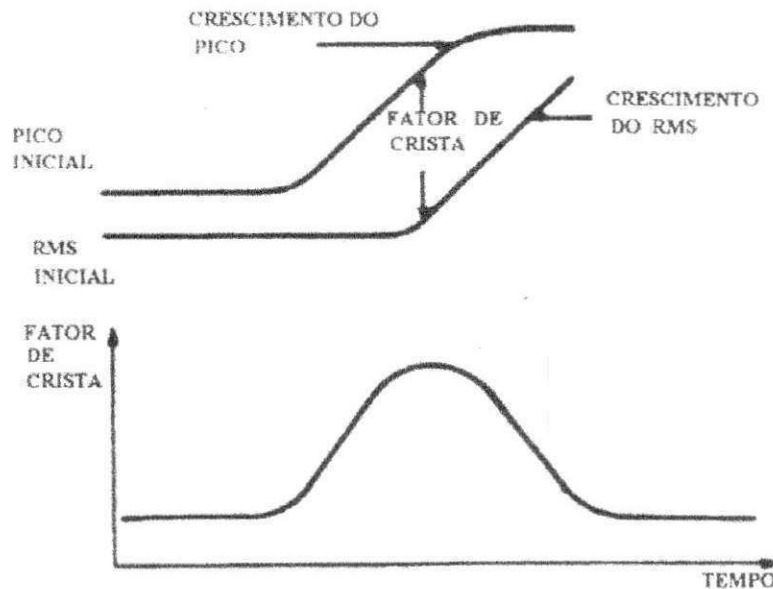


Figura 3.7 - Fator de crista para desenvolvimento de falha de rolamento. Fonte: Vargas (1996).

Utilizando-se o fator de crista como indicador de falha de rolamento é conveniente acompanhar o desenvolvimento da falha num menor espaço de tempo possível. Isso é necessário para que não haja o risco de fazer uma medida num instante de falha pequena e em seguida fazer outra medida num instante de falha grave obtendo valores próximos um do outro. Dessa maneira, a falha estará grave e no entanto pode-se diagnosticar como falha pequena devido o comportamento que o fator de crista apresenta.

3.6.3 Fator Kurtose

A kurtose é definida como sendo o quarto momento estatístico normalizado. Considerando-se uma distribuição gaussiana, o quarto momento estatístico é dado por:

$$M_4 = \int_{-\infty}^{\infty} (x(t) - \mu)^4 p(x) dx \quad (3.34)$$

onde: $x(t)$ = sinal

μ = média do sinal $x(t)$

$p(x)$ = função densidade de probabilidade

Por conveniência, esse momento estatístico é normalizado removendo a média e dividindo pelo desvio padrão elevado ao quadrado, encontra-se a kurtose.

$$Kur = \frac{M_4}{\sigma^2} \quad (3.35)$$

A Tabela 1 apresenta os valores da kurtose estatístico, para algumas formas de onda conhecidas.

Tabela 3.1 - Kurtose de algumas formas de ondas conhecidas

SINAL	KURTOSE
Seno	1,5
Quadrada	1
Triangular	2
Random Gaussiana	3

Um sinal de rolamento sem defeito é considerado aleatório com distribuição de probabilidade estatística gaussiana. Isso significa que o valor da kurtose é igual a 3. Isso significa, teoricamente, que quando o rolamento apresentar falha a kurtose será maior que 3, devido à introdução dos impactos ao sinal.

3.6.4 Generalidades dos indicadores

Esses indicadores são denominados de níveis globais dos sinais de vibração. Embora funcionem de maneira satisfatória na detecção de falhas em rolamentos, não identificam em que posição se localiza a falha, sendo necessário o uso de técnicas de análise mais sofisticadas para tal identificação. Outra relevante consideração sobre esses indicadores é que um ou outro pode detectar com maior sensibilidade a falha, dependendo da situação aplicada. Pachaud et. al. (1997) concluíram que a kurtose é um indicador mais sensível que o fator de crista quando

a relação entre a frequência de ressonância e a frequência de repetição dos impactos cresce. Neste estudo foi mostrado que pode-se usar os indicadores de falha aplicados a uma técnica de análise. Por exemplo acompanhar o desenvolvimento do fator de crista e kurtose no envelope do sinal.

3.7 Técnicas de análise espectral de sinais

As técnicas de análise espectral de sinais possibilitam melhor visualização do desenvolvimento da falha no rolamento. Embora sejam mais complexas na sua implementação, permitem não só detecção da falha, semelhantemente aos indicadores, mas também identificam e localização da falha caracterizada pela frequência característica de defeito de cada componente do rolamento.

3.7.1 Transformada de Fourier para sinais periódicos

O estudo de sinais usando representações senoidais é denominado análise de Fourier em homenagem a Joseph Fourier (1768-1830) por sua contribuição à teoria de representação de funções como superposições ponderadas de senóides (Haykin e Veen, 2001). A série de Fourier estabelece que uma função periódica (ver Anexo B) $f(t)$ pode ser decomposta em uma série de senos e cossenos equivalentes à função dada. A equação 3.36 descreve matematicamente a *TF*:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t) \quad (3.36)$$

onde: $f(t)$ = função periódica

$\frac{a_0}{2}$ = valor médio da função

a_n e b_n = coeficientes da transformada de Fourier

ω_0 = frequência fundamental

O valor médio da função pode ser descrito com sendo:

$$\frac{a_0}{2} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (3.37)$$

onde: T = período da função $f(t)$

sendo então o valor médio da função a relação entre área representada pela função e o período da função.

Os coeficientes da transformada de Fourier são definidos por:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(mwt) dt \quad (3.38)$$

e

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(mwt) dt \quad (3.39)$$

A Figura 3.8 demonstra graficamente como um sinal de onda quadrada pode ser composto por uma série de senos e cossenos. Nesse caso, considera-se que $f(t)$ é uma função par (ver Anexo B) e conseqüentemente os coeficientes b_n são nulos.

Os gráficos da Figura 3.8 mostram uma seqüência de cossenos com frequências diferentes, ou seja, as harmônicas ímpares da transformada de Fourier. Os gráficos (a), (c), (e) e (g) são respectivamente a frequência fundamental do sinal ($\cos(wt)$), a terceira harmônica ($\cos(3wt)$), a quinta harmônica ($\cos(5wt)$) e a sétima harmônica ($\cos(7wt)$). Somando-se esses cossenos seguidamente obtém-se uma função que se aproxima cada vez mais de um onda quadrada. Por exemplo: somando (a) + (c) obtém-se (b), somando (b) + (e) obtém-se (d) e assim sucessivamente até que seja somada todas as harmônicas. O gráfico (h) mostra o somatório até a nona harmônica da fundamental. As coordenadas verticais dos gráficos expressão as amplitudes e as horizontais o tempo.

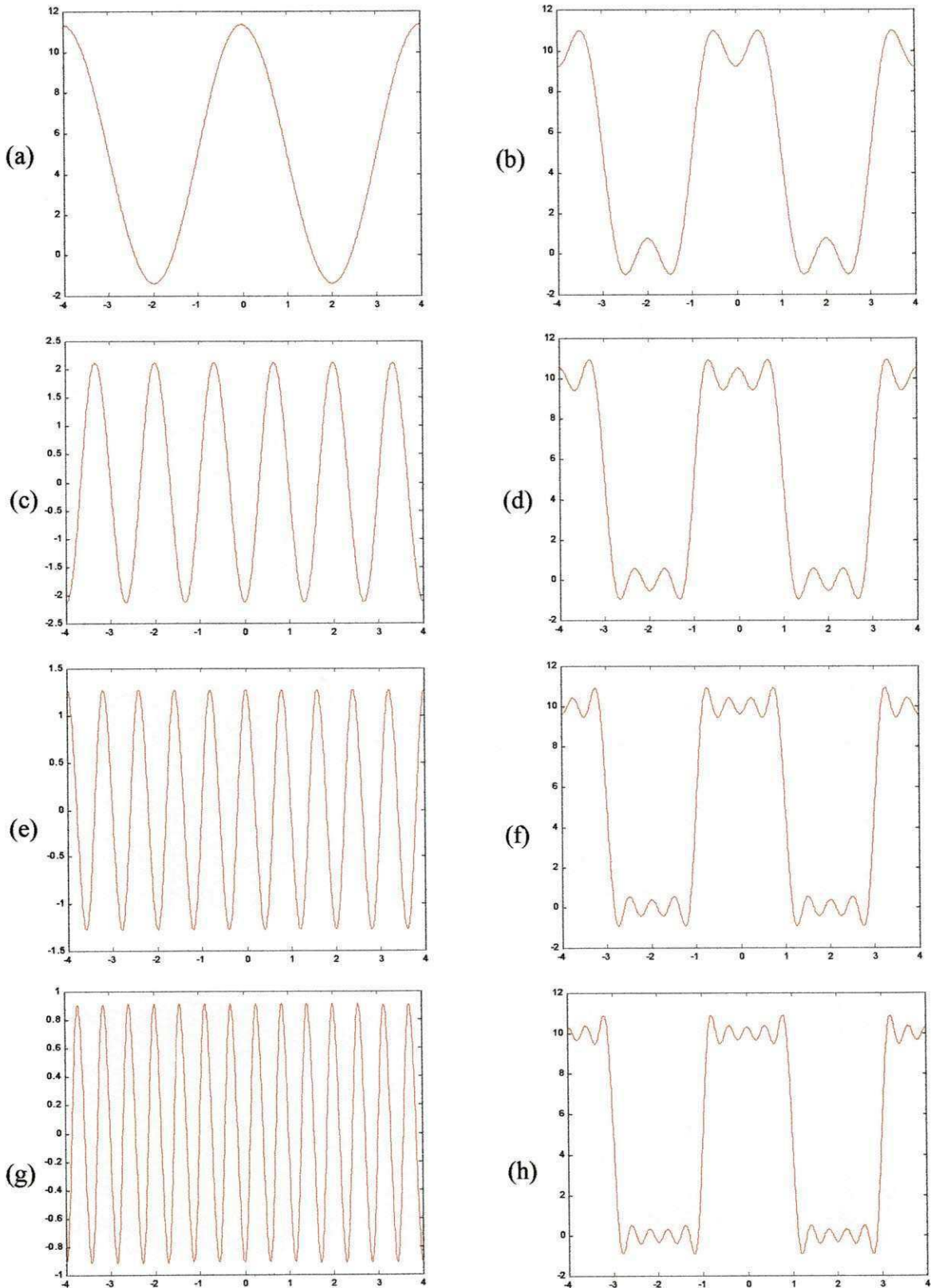


Figura 3.8 - Termos individuais da transformada de Fourier para uma onda quadrada

$$(a)+(c)=(b), (b)+(e)=(d), (d)+(g)=(f) \text{ e } (f)+\cos(9\omega t)=(h)$$

Efetuar o caminho inverso é uma boa maneira de demonstrar a validade da transformada de Fourier, ou seja, partindo da decomposição em série, remontar graficamente a função $f(t)$.

É importante ressaltar que para se ter total precisão na transformada de Fourier seria necessário calcular as componentes da série até $n = \infty$.

A partir do gráfico da Figura 3.8(h) obtém-se o espectro de frequência do sinal, onde aparecem a frequência fundamental, as harmônicas múltiplas da frequência fundamental e o nível médio do sinal. A Figura 3.9 mostra o espectro de frequências da onda quadrada sem o nível médio do sinal.

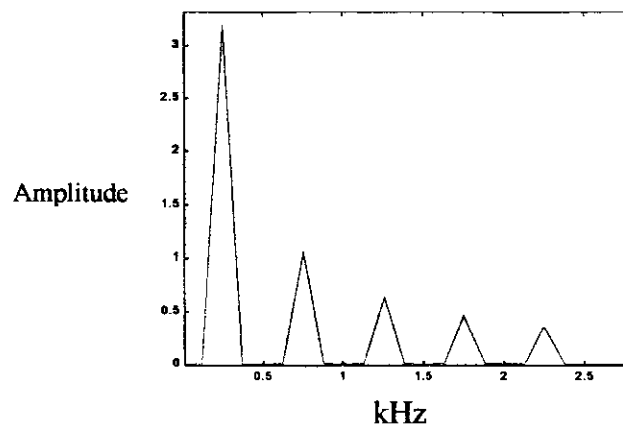


Figura 3.9 - Espectro de frequência da onda quadrada apresentado na Figura 3.8(h).

3.7.2 Técnica do envelope

A técnica do envelope se baseia na detecção da envoltória do sinal, ou seja, na recuperação do contorno do sinal. É possível obter o envelope do sinal no tempo através do detetor de envoltória analógico, usando um circuito passivo, ou através da técnica digital usando a transformada de Hilbert. Nos sistemas de telecomunicações o detetor de envoltória é usado para recuperar um sinal modulado em amplitude, que na maioria das vezes é a voz humana. Na prática, acontece uma demodulação de sinal composto por um sinal de baixa frequência, denominado de modulante, e um outro sinal de alta frequência, que é a portadora. Esse último é o sinal responsável pela propagação das ondas no meio. Semelhantemente ao sinal modulado das telecomunicações, o sinal de vibração de falha em rolamentos também é

um sinal modulado. A frequência modulante é a frequência de impactos provocados pela passagem dos rolos sobre a falha nas pistas, e a portadora é especialmente as ressonâncias da estrutura e o ruído inerente ao sinal devido o atrito e deslizamentos dos rolos sobre as pistas.

3.7.2.1 Envelope analógico

O detetor de envoltória ou detetor de envelope analógico é um circuito composto por um diodo e um circuito RC (resistor-capacitor). O diodo é responsável pela retificação do sinal, enquanto o circuito RC é um filtro passa-baixa com frequência de corte próxima da frequência da modulante. A Figura 3.10 ilustra o circuito detetor de envelope.

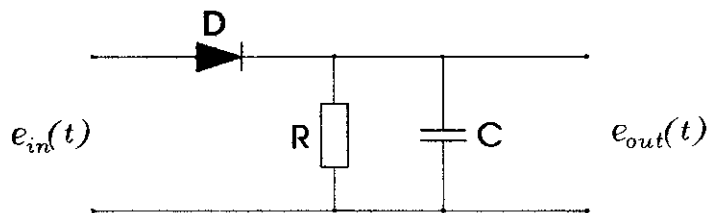


Figura 3.10 - Circuito detetor de envelope.

A Figura 3.11 (a) mostra um sinal modulado de entrada. Em (b) ilustra-se o sinal modulado ao passar pela retificação imposta pelo diodo sem a presença do capacitor. Em (c) observa-se o efeito do capacitor deixando passar apenas o sinal da modulante para saída e atenuando o sinal da portadora. A Figura 3.11 (d) mostra a saída do sinal idealizada, pois como a frequência da portadora é muito maior que a da modulante, pode-se supor uma cossenóide pura somada a um nível DC correspondente ao nível médio do sinal (Gomes, 1985).

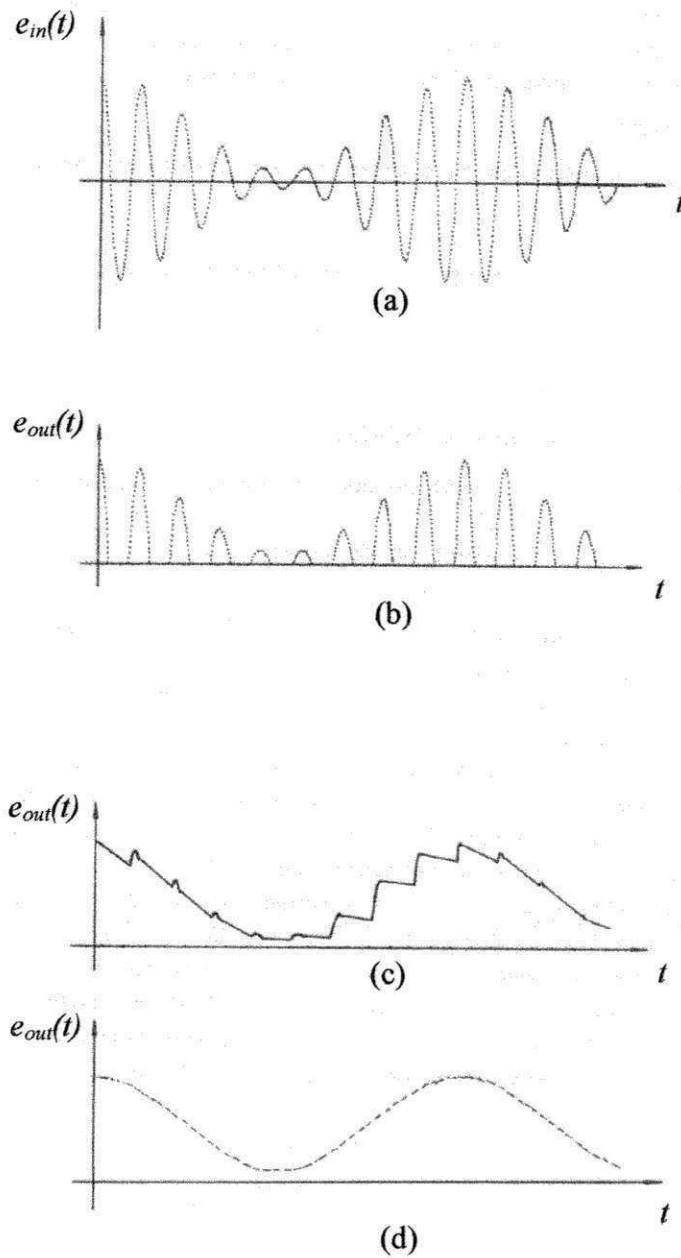


Figura 3.11 - Funcionamento do circuito detetor de envelope. Fonte: Gomes (1993)

3.7.2.2 Envelope digital

O envelope digital consiste na curva que une suavemente os picos de um sinal modulado $w(t)$. A Figura 3.12 mostra um sinal modulado destacando o envelope.

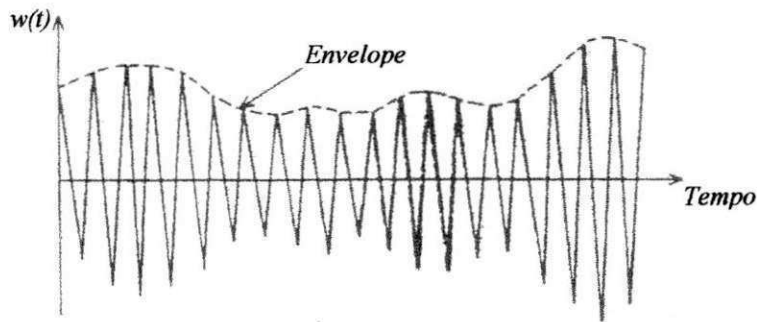


Figura 3.12 - Envelope do sinal com amplitude modulada. Fonte: Vargas (1996)

Um processo aleatório $w(t)$ pode ser escrito como a parte real de um processo complexo $z(t)$ da seguinte forma:

$$z(t) = w(t) + iy(t) \quad (3.40)$$

onde: $z(t)$ = processo complexo

$w(t)$ = parte real do processo complexo

$y(t)$ = parte imaginária do processo complexo

$y(t)$ é também um processo aleatório e $w(t)$ pode ser expresso como uma curva senoidal com variação de amplitude e fase.

$$w(t) = a(t) \cos \phi(t) \quad (3.41)$$

logo

$$a(t) = |z(t)| = \sqrt{w^2 + y^2} \quad (3.42)$$

e

$$\phi(t) = \arctan \frac{y}{w} \quad (3.43)$$

onde: $a(t)$ = envelope do sinal modulado

$\phi(t)$ = curva de fase associada ao sinal modulado

O processo aleatório $y(t)$ deve ser escolhido de tal modo que $a(t)$ tenha o mesmo sentido físico requerido, isto é, que $a(t)$ seja uma curva suave unindo os picos de $w(t)$. Escolhas adequadas de $y(t)$ podem ser determinadas pela consideração de que $w(t)$ é harmônica:

$$w(t) = A \cos 2\pi f_s t \quad (3.44)$$

onde: A = amplitude do sinal

f_s = frequência do sinal

então:

$$a(t) = A \quad (3.45)$$

pois para unir os picos de uma função senoidal suavemente $w(t)$ inscreve uma função constante de amplitude igual ao valor de pico da função $w(t)$. Neste caso $y(t)$ será igual a:

$$y(t) = \pm A \text{ sen } 2\pi f_s t \quad (3.46)$$

para isso substitui-se $w(t)$ e $a(t)$ na equação 3.42.

Outra maneira de obter-se o envelope é considerando $w(t)$ a resposta ao impulso de um sistema de um grau de liberdade, dado por:

$$w(t) = Ae^{-t/\tau} \text{ sen } 2\pi f_s t \quad (3.47)$$

neste caso

$$a(t) = Ae^{-t/\tau} \quad (3.48)$$

conseqüentemente

$$y(t) = -Ae^{-t/\tau} \cos 2\pi f_s t \quad (3.49)$$

A transformada de Hilbert é definida por Papoulis (1984) como:

$$\hat{w}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{w(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (3.50)$$

Baseando-se nestes argumentos, duas definições para o processo de envelope aleatório são possíveis:

$$a_1(t) = \sqrt{w^2 + \frac{\dot{w}}{2\pi f_s}} \quad (3.51)$$

e

$$a_1(t) = \sqrt{w^2 + \dot{w}^2} \quad (3.52)$$

A equação (3.51) é a definição de envelope Crandal e Mark e a equação (3.52) é o envelope sugerido por Vargas (1996).

3.7.3 Zoom

O zoom permite capturar um sinal numa faixa de frequência estreita em torno da frequência desejada para análise e expandi-lo de modo a aumentar o espaçamento visual das raia de frequência ou linhas espectrais. Isso proporciona melhor interpretação e identificação das frequências que existem naquela faixa particular. A Figura 3.13 mostra um espectro de frequência sem aplicação do zoom. Observa-se que não são identificados claramente as frequências do espectro mostrado. Já a Figura 3.14 apresenta um espectro de frequência com aplicação de zoom, observando-se com clareza as frequências do espectro.

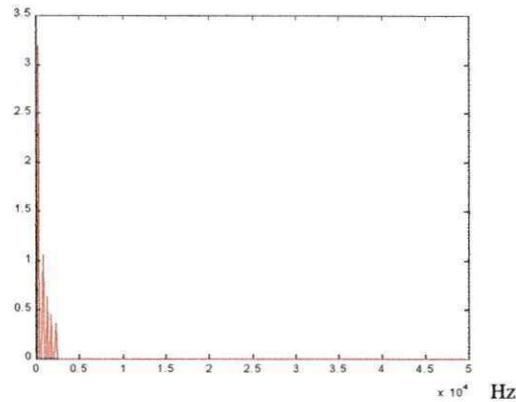


Figura 3.13 - Espectro de frequência sem aplicação do zoom

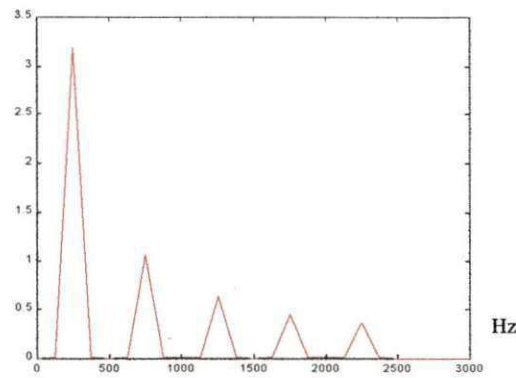


Figura 3.14 - Espectro de frequência com aplicação do zoom

A Figura 3.15 apresenta o mesmo sinal de frequência com resolução espectral (ver Anexo C) menor que o sinal da Figura 3.14. Observa-se que a separação das raiais de frequência é confusa, não sendo possível identificar com precisão quais as frequência que compõem este espectro. Porém, tendo-se boa resolução gráfica, quando necessário, basta expandir a região desejada para uma boa visualização.

O zoom aplicado ao sinal simulado da Figura 3.13, é chamado de zoom espectral pois o sinal coletado foi discretizado no tempo. Esses são traçados por pontos calculados através da série de Fourier. Isso simula uma placa de aquisição de dados coletando sinais com taxa de amostragem fixa.

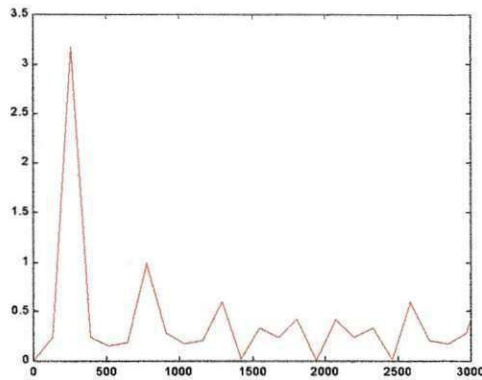


Figura 3.15 - Espectro de frequência com baixa resolução aplicando o zoom

3.8 Metodologia de Análise

Para este trabalho foi desenvolvida uma bancada de teste (Capítulo 4) composta de um eixo apoiado em dois mancais de rolamentos de rolos onde um deles foi escolhido como mancal de teste. Neste mancal foi fixado um acelerômetro ligado a uma placa de aquisição de dados, visando a medição da vibração mecânica em termos de aceleração. Os ensaios tiveram como parâmetros variáveis a rotação do eixo, a carga aplicada no rolamento de teste e a severidade da falha. O eixo foi submetido a rotações de 3600 rpm (60 Hz) e 1500 rpm (25 Hz). A primeira rotação foi escolhida por ser usualmente usada nas máquinas e equipamentos com acoplamento direto. O segundo valor aplica-se a máquinas que operam em baixa rotação, devido as reduções de velocidades existentes. As cargas aplicadas ao rolamento de teste foram de 1000 N e 2000 N. As severidades das falhas foram classificadas em três níveis: baixa severidade, média severidade e alta severidade. A baixa severidade se caracterizou por um risco com espessura de 0,15 mm paralelo à linha de contato do rolo na pista externa do rolamento. A média severidade foi caracterizada por um risco semelhante ao anterior, porém com uma espessura de 0,30 mm. A alta severidade foi caracterizada igualmente às anteriores, mas com uma espessura de risco de 1,0 mm. As falhas foram introduzidas com auxílio de uma ferramenta de corte montada em um torno mecânico. Os dados foram coletados da seguinte forma: foi introduzido a falha, fixada a primeira rotação (25 Hz), aplicada o primeiro valor de carga (1000 N) e em seguida coletava-se 20 amostras (janelas de amostragem). Os dados foram coletados em blocos de 20 janelas de amostragem para que as análises espectrais

fossem feitas a partir da média espectral dos sinais, diminuindo ao máximo possível a influência do ruído aleatório no sinal de vibração. Daí por diante foi fixado um parâmetro e mudado o outro fazendo as combinações possíveis entre rotações e cargas. Após todas as combinações terem sido realizadas, outro rolamento com grau de severidade maior foi instalado e todo o procedimento se repetia novamente. Os dados foram coletados com uma taxa de aquisição de 20 KHz e 4096 pontos. Esses parâmetros de aquisição foram ajustados no momento da coleta de dados.

Os indicadores de níveis globais correspondentes ao fator de crista, kurtose, nível *rms* e nível de pico foram calculados para cada 3 janelas de sinais amostrados de cada bloco. A técnica do envelope foi aplicada as médias espectrais de cada bloco de sinais, de acordo com o procedimento a seguir:

1° - Aplicação da transformada de Fourier em cada bloco de sinais no tempo. Em seguida obteve-se o espectro médio com 20 blocos. As faixas de frequências possivelmente excitadas pelos impactos dos rolos sobre a falha, são observadas em relação ao espectro médio dos sinais de referência (sem defeito);

2° - Aplicação de um filtro passa-faixa digital na faixa de frequência escolhida. Toda região antes e depois da faixa escolhida é atenuada;

3° - Reconstituição do sinal no tempo a partir do sinal filtrado em frequência, ou seja, aplicação da transformada de Fourier inversa no sinal anteriormente filtrado;

4° - Aplicação da transformada de Hilbert no sinal recuperado no passo anterior. Nesse passo encontra-se o envelope do sinal filtrado reconstituído para o domínio do tempo;

5° - Novamente, aplicação da transformada de Fourier no envelope do sinal.

Esse procedimento filtra as possíveis frequências baixas que excitaram as regiões de frequências mais altas.

O zoom foi aplicado nas faixas de frequência possivelmente excitadas pelos impactos. Foram escolhidas faixas de frequência, dos sinais de vibração do rolamento com defeito, que comparadas com as mesmas faixas do sinal de vibração sem defeito apresentaram aumento de energia do sinal. O zoom proporciona uma ampliação daquela região que facilita a visualização separada das linhas espectrais. Nesse caso, existindo o defeito, a diferença entre as linhas espectrais mais evidentes coincide com a frequência característica desse defeito.

CAPÍTULO 4

PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

4.1 Introdução

Como foi discutido anteriormente, o nível de vibração de uma máquina pode ser expresso em termos de variações de deslocamento, velocidade ou aceleração. Entretanto, para visualizar alguns desses parâmetros é necessário a utilização de sensores que traduzam a vibração mecânica em um desses fenômenos físicos. Tais sensores, ligados a placas de aquisição conectadas a um computador, reproduzem as variações das vibrações ocorridas. Neste trabalho, para coleta de dados, foi utilizada uma placa de aquisição de dados da National, modelo AT-MIO-16E-10, acompanhada do software LabVIEW que fez a interface visual do coletor de sinais de vibração. A grande vantagem desse tipo de sistema é a flexibilidade com que pode ser montado um instrumento virtual de medida para cada tipo de situação com a mesma confiabilidade de um equipamento real. O sensor utilizado no trabalho foi um acelerômetro PCB 353B03 acoplado ao mancal de teste, determinado na elaboração do projeto da bancada.

O trabalho foi exclusivamente baseado em dados experimentais de defeitos na pista externa de rolamentos de rolos, não sendo exploradas simulações. Em se tratando de rolamentos, muitos trabalhos foram publicados para defeitos localizados em rolamentos de

esferas com apresentação de sinais de vibrações simulados e experimentais para cada tipo de defeito (Silva, 1999), (Vargas, 1996), (Nunes, 1989). Poucos resultados são apresentados na literatura para rolamentos de rolos o que motivou o presente estudo.

4.2 Parâmetros de Aquisição

4.2.1 Taxa de Amostragem

A aquisição de dados é caracterizada pela técnica de conversão de um sinal analógico (entrada) em um sinal digital (saída). Um conversor analógico-digital (A/D) recebe uma entrada analógica e, após algum tempo, transforma em uma saída digital correspondente à entrada analógica. As técnicas de conversão A/D são inúmeras, não sendo importante discuti-las agora. Entretanto, é importante observar que o sinal de entrada contínuo no tempo após digitalizado passa a ser um sinal discretizado, devido à conversão A/D necessitar de um tempo entre uma amostragem e outra do sinal analógico. Esse tempo entre amostragens é conhecido como taxa de amostragem. As Figura 4.1(a) e 4.1(b) mostram respectivamente um sinal senoidal contínuo e o mesmo sinal discretizado no tempo.

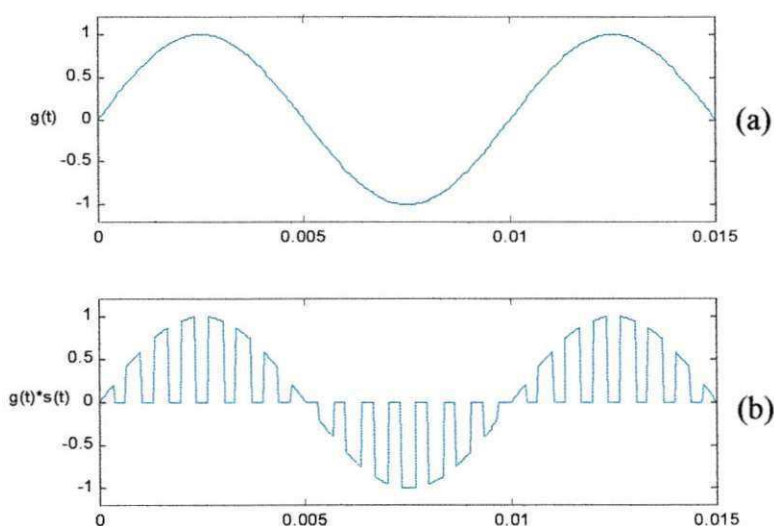


Figura 4.1 - Sinal senoidal discretizado no tempo.

Do ponto de vista de aquisição de dados é preciso que a taxa de amostragem obedeça o teorema de Nyquist (McConnell, 1995), definido como:

$$f_a > 2f_{max} \quad (4.01)$$

onde: f_a = frequência de amostragem ou taxa de amostragem

f_{max} = frequência máxima do sinal amostrado ou frequência de Nyquist

Não sendo obedecido o teorema de Nyquist ocorrerá o problema de *Aliasing*, conforme ilustra a Figura 4.2. Foram considerados na Figura 4.2(a) e (c) dois sinais senoidais de frequências diferentes sendo amostrados com a mesma frequência de amostragem e apresentados nos gráficos (b) e (d) da mesma figura. Observa-se que utilizando-se essa frequência de amostragem, os dois sinais amostrados apresentaram-se quase idênticos, assim, os dois de frequências diferentes depois de amostrados parecem ter a mesma frequência. Isso demonstra que pode-se ter uma visualização e interpretação errônea do sinal coletado caso a taxa de amostragem não seja adequada.

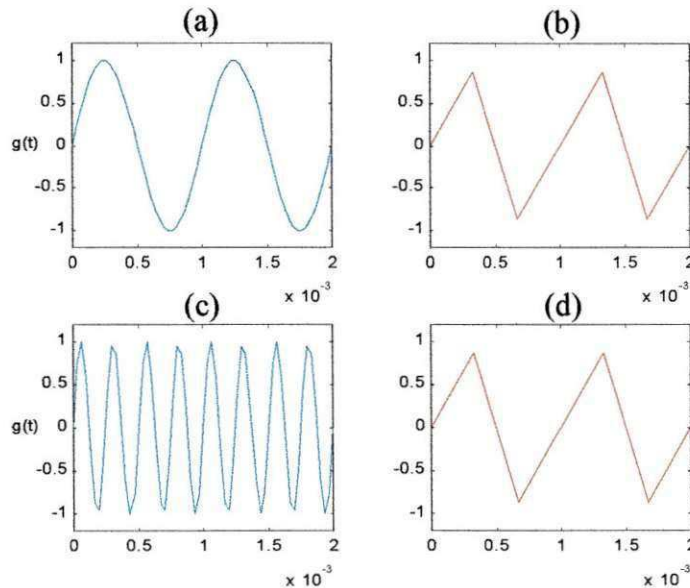


Figura 4.2 - Efeito do teorema de Nyquist nos sinais

A Figura 4.3, referente aos sinais ilustrados na Figura 4.2, apresenta as linhas espectrais das duas frequências distintas no mesmo espectro (f_1 e f_2) com suas harmônicas superior e inferior, respectivamente. Observa-se que a 1ª harmônica inferior de f_2 ($f_2 - f_1$) se posiciona

entre f_1 e $f_1 + f$. Nesse caso ocorreu um deslocamento da frequência f_2 e sua harmônica para a esquerda se sobrepondo às linhas espectrais de frequências mais baixas.

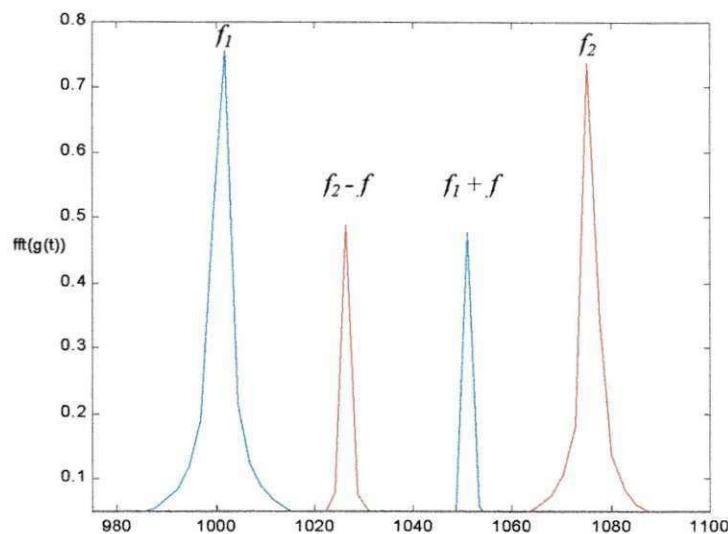


Figura 4.3 - Superposição de linhas espectrais de frequências devido o *Aliasing*

Para assegurar que o sinal não contém frequências acima da máxima, o mesmo deve ser filtrado através de um filtro passa-baixa com frequência de corte igual à frequência máxima antes de ser amostrado.

4.2.2 Tamanho da Amostra e Número de Pontos de Discretização

O tamanho da amostra ou tamanho do bloco de sinal é definido pela equação 4.02:

$$T = dt \cdot N \tag{4.02}$$

onde: T = tempo total de amostragem

dt = intervalo de tempo entre amostragem

N = número de pontos da discretização

Normalmente N é dado na forma de potência de dois (2^n) haja visto que os algoritmos FFT trabalham com expoentes de dois, diminuindo sensivelmente o tempo de processamento de dados.

O intervalo de tempo entre amostragem é determinado através da equação 4.03.

$$dt = \frac{1}{f_a} \quad (4.03)$$

4.2.3 Parâmetros utilizados no trabalho

Neste trabalho não foi utilizado nenhum filtro específico, considerou-se a banda passante do acelerômetro que vai de 0 a 11KHz que é a faixa linear de operação.

Um filtro é um circuito cujo ganho é variável com a frequência, e sua banda passante é definida de acordo com o tipo de filtro utilizado. Esses são classificados em 4 tipos: filtro passa baixa, passa alta, passa faixa e rejeita faixa. Dentre outras características, a faixa de frequência linear de um filtro é uma das mais importantes, pois nessa faixa o filtro trabalha com um ganho teórico máximo e constante (Gomes, 1985), ou seja, teoricamente todas as frequências que estiverem contidas nessa faixa não sofrerão atenuação com a passagem pelo filtro.

Os ensaios iniciais mostraram que acima de 10KHz os níveis de amplitude das linhas espectrais de frequência eram muito baixos, podendo significar que o defeito introduzido no rolamento não excitava as frequências acima desse valor. Diante disso, considerou-se como frequência máxima do sinal 9,2KHz, conseqüentemente, obedecendo o teorema de Nyquist, a taxa de amostragem seria maior que 18,4KHz. Para isso utilizou-se uma taxa de amostragem de 20KHz. O número de pontos considerados foi de 4096 pontos. Calculando-se os outros parâmetros, obtém-se $dt = 0,5\mu s$, $T = 2,048ms$ e $df = 4,88Hz$.

4.3 A Bancada de Ensaio

A bancada de ensaio é uma estrutura simples feita com cantoneira L de aço e dimensões 700x50x50x6 mm formando uma base que apóia uma peça de ferro fundido de 700x500x50 mm. Sobre a peça de ferro fundido montou-se um motor trifásico de 2 pólos conectado

elasticamente a um eixo montado sobre dois mancais de rolamento de rolos, no qual um deles é o rolamento de teste. Na região central do eixo colocou-se um rolamento que recebe a carga total aplicada ao sistema. A carga aplicada nesta posição divide-se igualmente para os dois mancais nas extremidades do eixo. A Figura 4.4 mostra um esquema simplificado da bancada de ensaios.

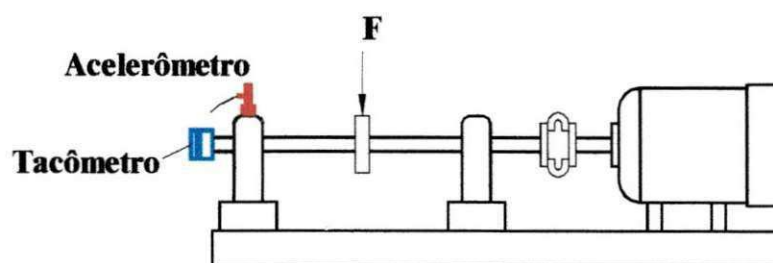


Figura 4.4 - Modelo simplificado da bancada de ensaios

O motor foi ligado através de um inversor de frequência SIEMENS que possui uma faixa de variação de frequências que vai de 0 a 650Hz.

Como sistema de aplicação de carga utilizou-se um macaco hidráulico de 2 toneladas apoiado sobre uma base. A força foi aplicada na extremidade de um braço de alavanca, entre o centro do cilindro do macaco e o ponto de aplicação de carga no eixo da bancada, com uma relação de comprimento de aproximadamente 2 vezes. Nesse caso, a força aplicada no eixo foi aproximadamente duas vezes maior que a força introduzida pelo macaco hidráulico. A leitura da pressão foi feita usando um manômetro adaptado no macaco e em seguida convertida para unidade de força. Para as condições de testes, poderia se trabalhar com uma faixa de aplicação entre 0 e 3500 N.

Um tacômetro digital utilizando diodos foto sensíveis foi desenvolvido para medição de velocidade. Um canal analógico na placa de aquisição de dados foi configurado para receber a informação de rotação do tacômetro.

A Figura 4.5 mostra a foto da bancada de ensaio.



Figura 4.5 - Bancada de ensaios

4.3.1 - Características gerais dos elementos da bancada de ensaio

As características de alguns elementos da bancada de teste da Figura 4.5 são enumerados na Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3.

Tabela 4.1 - Características gerais do motor de indução

MOTOR DE INDUÇÃO	
Marca	WEG
Modelo	63 688
Número de Fases	Trifásico
Potência	1/2 cv
Rotação	3450 rpm
Tensão	380 V

Tabela 4.2 - Características gerais do Inversor de Frequência

INVERSOR DE FREQUÊNCIA	
Marca	SIEMENS
Modelo	MMV12
Variação de Frequência	0 - 650 Hz

Tabela 4.3 - Características gerais do rolamento de teste

ROLAMENTO DE TESTE		
Marca	FAG	
Modelo	30205 A	
Capacidade de Carga	3300 Kgf	Radial
	3550 Kgf	Axial
Limite de Rotação	7100 rpm	Graxa
	10000 rpm	Óleo
Diâmetro dos Rolos	6,44 mm	
Diametral Pitch	38,38 mm	
Número de Rolos	16 rolos	
Ângulo de Contato	14°	

4.4 - Instrumentação de Aquisição de dados

A instrumentação utilizada para aquisição dos sinais de vibração mecânica foi composta de um acelerômetro PCB 353B03, um condicionador de sinais 480E09, uma placa de aquisição de dados National AT-MIO-16E-10, um computador AMD K6II 300 MHz e do software LabVIEW. A Figura 4.6 mostra uma vista geral do sistema de aquisição e suas ligações com a bancada de ensaio.

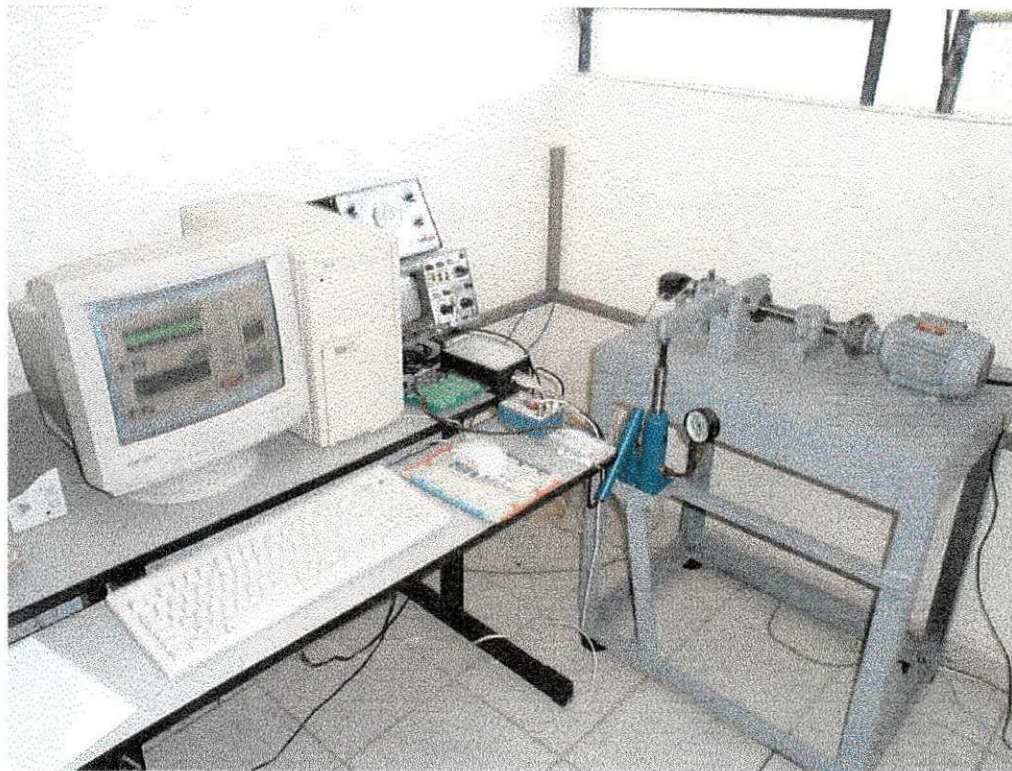


Figura 4.6 - Sistema de aquisição de dados

Para esse trabalho utilizou-se apenas um canal de entrada analógico configurado para leitura de níveis de tensão correspondente à vibração gerada pela falha e lida através do acelerômetro. Os sinais foram lidos e armazenados em arquivo com extensão *txt* para posterior análise. Um condicionador de sinais foi utilizado para alimentar o acelerômetro, já que esse sensor possui um circuito eletrônico interno que exige alimentação externa. Alguns condicionadores de sinais podem também proporcionar ganho no sinal de entrada caso este seja de nível muito baixo, menor que o nível mínimo de sensibilidade do canal de entrada da placa.

4.4.1 - Características gerais dos instrumentos de aquisição de dados

As tabelas 4.4, 4.5 e 4.6 apresentam algumas características dos instrumentos utilizados.

Tabela 4.4 - Características gerais do acelerômetro

ACELERÔMETRO	
Marca	PCB
Modelo	353B03
Sensibilidade	10 mV/g
Peso	10,5 gramas
Faixa de Amplitude	± 500 g
Faixa de Frequência	0.7 Hz a 11 KHz

Tabela 4.5 - Características gerais do condicionador de sinais

CONDICIONADOR DE SINAIS	
Marca	PCB
Modelo	480E09
Nº de Canais	1
Excitação do Sensor	27 V, 2 Ma
Ganho	x1, x10, x100
Resposta a Baixa Frequência	0,15 Hz
Resposta a Alta Frequência	100 KHz

Tabela 4.6 - Características gerais da placa de aquisição de dados

PLACA DE AQUISIÇÃO	
Marca	National Instruments
Modelo	AT-MIO-16E-10
Nº de Canais Analógicos de Entrada	16
Taxa de Amostragem Máxima Por Canal	100 KHz
Faixa de Amplitude	± 10 V

4.5 - Programas

4.5.1 - O Software LabVIEW

Uma das razões prováveis para o uso do LabVIEW é medir algum tipo de fenômeno físico, como temperatura, usando o computador. Entretanto usando o LabVIEW, o computador pode se tornar um instrumento de medição muito mais útil e com bastante recursos. A diferença entre um instrumento de medição e o computador como instrumento de medição é que os controles do instrumento estarão no mouse e no teclado do computador. As aplicações utilizando o LabVIEW são chamadas de Instrumentos Virtuais ou simplesmente VI's. A Figura 4.7 mostra um osciloscópio físico e um osciloscópio virtual usando o LabVIEW

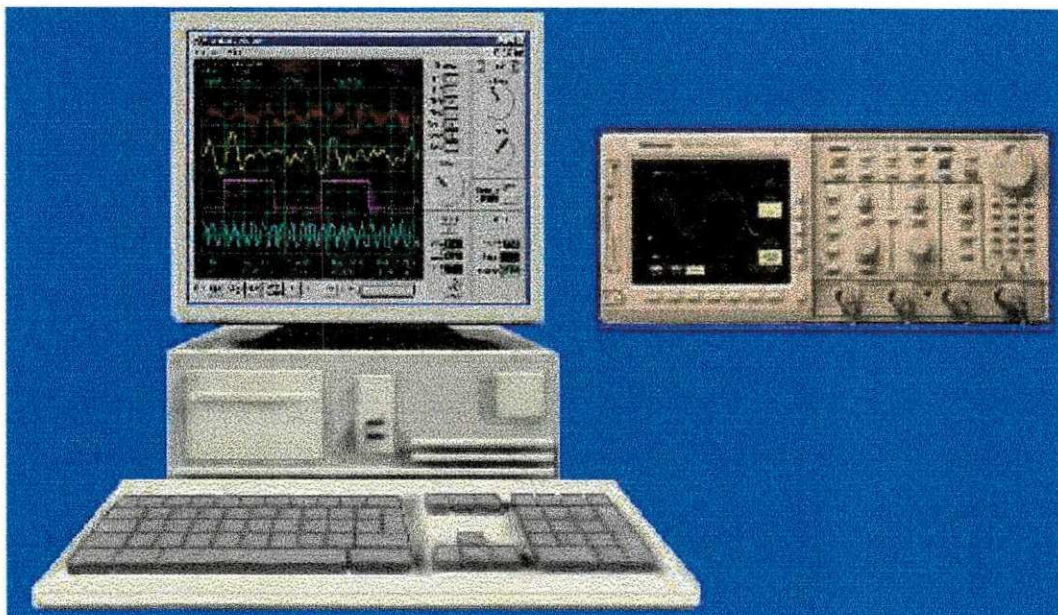


Figura 4.7 - Comparação entre um instrumento físico e um instrumento virtual

O LabVIEW utiliza uma linguagem de programação gráfica onde o seu código fonte é escrito como um fluxograma em que cada bloco executa uma função diferente. Ligados através de linhas, a ordem de execução é estabelecida pelos dados que fluem de um nó para outro. A Figura 4.8 mostra um código fonte de um programa no LabVIEW para medição de temperatura.

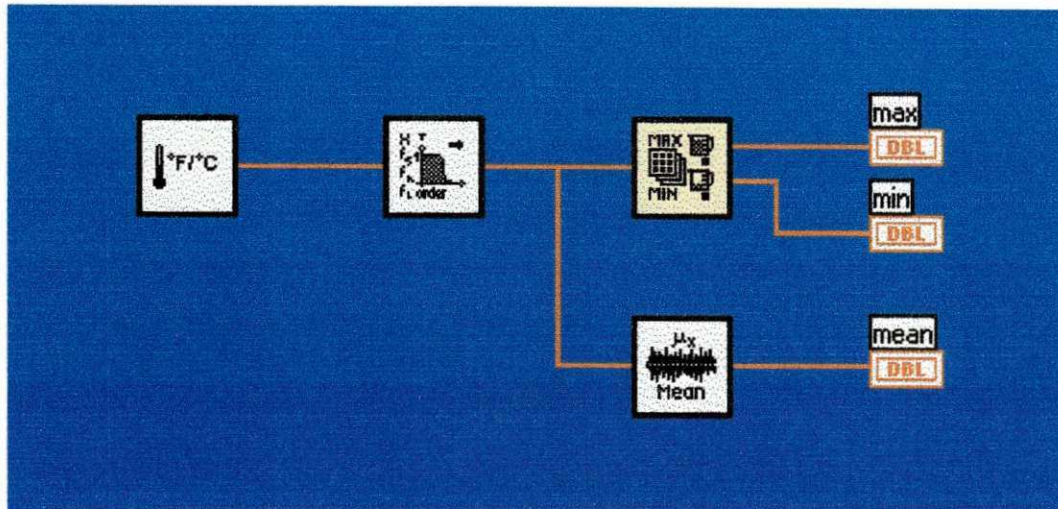


Figura 4.8 - Código fonte de um programa do LabVIEW

Existem duas partes principais nos VI's. A primeira é o painel frontal, que é interface entre o usuário e a máquina. A segunda é o diagrama em blocos, que é o código fonte do programa. A Figura 4.9 mostra o painel frontal e o diagrama em blocos de um programa que faz a leitura de temperatura.

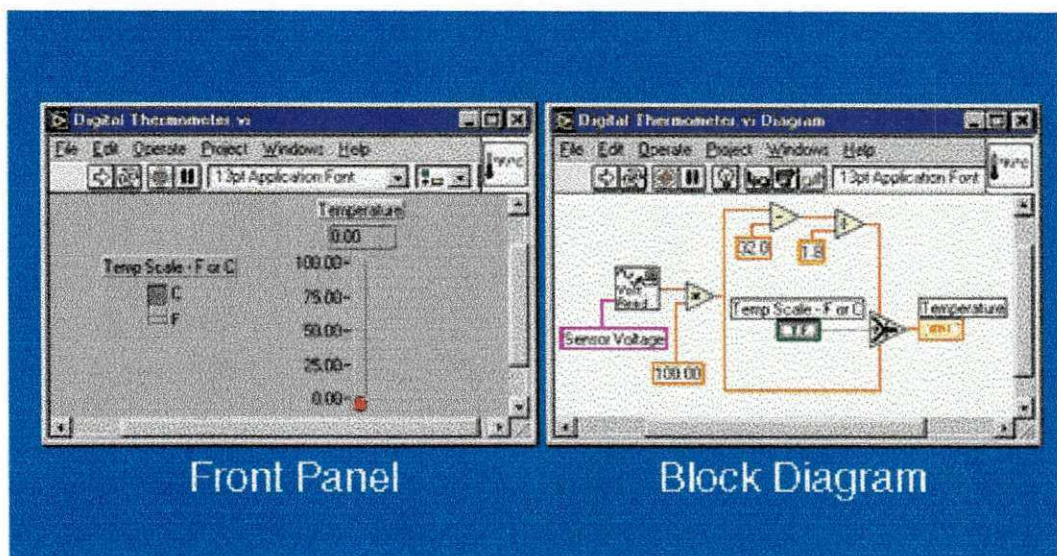


Figura 4.9 - Painel frontal e diagrama em bloco do LabVIEW

No painel frontal pode-se acessar os objetos desejados através da palheta de controle na qual estão apenas os controles e os indicadores. Quando um objeto é selecionado na palheta de controle e é colocado no painel frontal, um terminal aparece automaticamente no diagrama

de blocos. Esse terminal ou bloco é a representação do objeto no código fonte do programa. Os controles são as fontes de dados, ou seja, as entradas de dados e os indicadores são saídas de dados onde são apresentados os resultados das operações realizadas. Os controles e indicadores representados no diagrama de blocos possuem linhas de bordas de diferentes espessuras possibilitando a identificação de cada um deles. As linhas que fazem as ligações entre os blocos também são diferenciadas em cores e espessuras, cada uma indicando um tipo de variável que passará naquela linha. No diagrama de blocos tem-se acesso à palheta de funções, nela estão as funções e os instrumentos virtuais. Uma palheta de ferramentas é também acessível para que se possa manipular os objetos no painel frontal e no diagrama de blocos. Através dela pode-se colocar, retirar, modificar qualquer objeto colocado no programa. Num programa um VI pode ser usado como sub VI bastando que seja colocado no diagrama de blocos. Isso funciona semelhante a sub-rotinas em linguagens de programação. Quando uma aplicação é construída, é criada uma hierarquia que mostra os VI's e sub VI's relacionados com aquela aplicação de maneira ordenada.

O LabVIEW por ser um software que propõe soluções em diversas áreas oferece uma biblioteca com inúmeras aplicações que podem servir ou serem adaptadas para o que se procura. Aplicações com processamento de sinais, automação, controle, simulação, análise numérica, aquisição de dados, aquisição de imagens já estão prontas, podem inclusive servir para a aplicação desejada sem mesmo ter que ser modificada. Como exemplo pode-se observar as Figura 4.10 e Figura 4.11 que mostram algumas simulações.

A Figura 4.10 apresenta a simulação das funções seno, triangular e quadrada. Em seguida aplica uma janela e/ou um filtro e mostra como o sinal se comporta no tempo. Por último mostra o espectro em frequência dos sinais gerados. Observa-se no painel frontal que através dos controles pode-se mudar o tipo de sinal apresentado, a frequência desse sinal, as janelas e filtros existentes.

A Figura 4.11 apresenta um sinal de vibração simulado de um sistema de um grau de liberdade. Através do diagrama em blocos (código fonte) é possível mudar o valor da frequência natural e fator de amortecimento do sistema [Manual LabVIEW].

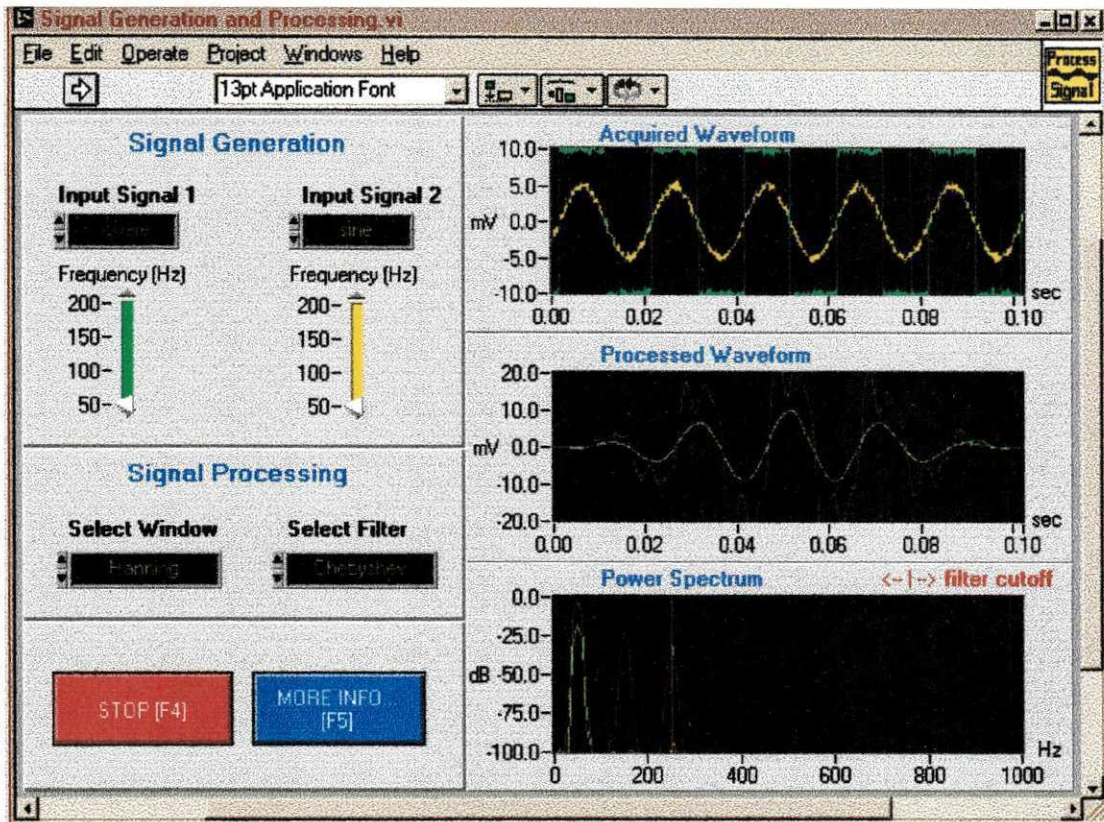


Figura 4.10 - Programa que simula a geração das funções seno, quadrada e triangular

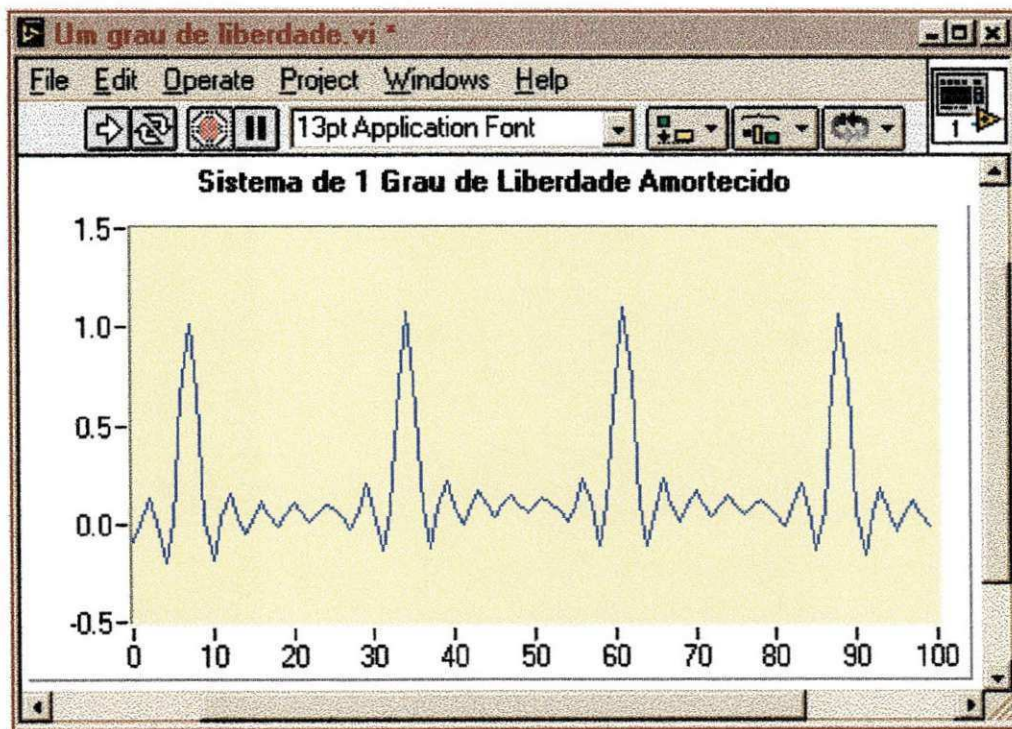


Figura 4.11 - Programa que simula um sistema de um grau de liberdade amortecido

4.5.2 - Programa de aquisição do sinal de vibração

Um programa foi desenvolvido no ambiente LabVIEW para fazer a aquisição do sinal de vibração mecânica provocado pela falha introduzida no rolamento de teste da bancada de ensaios. Nele os parâmetros de coleta de dados são configurados sempre que uma aquisição se inicia e que se faz necessário uma mudança. A Figura 4.12 mostra a interface visual do programa desenvolvido (painel frontal).

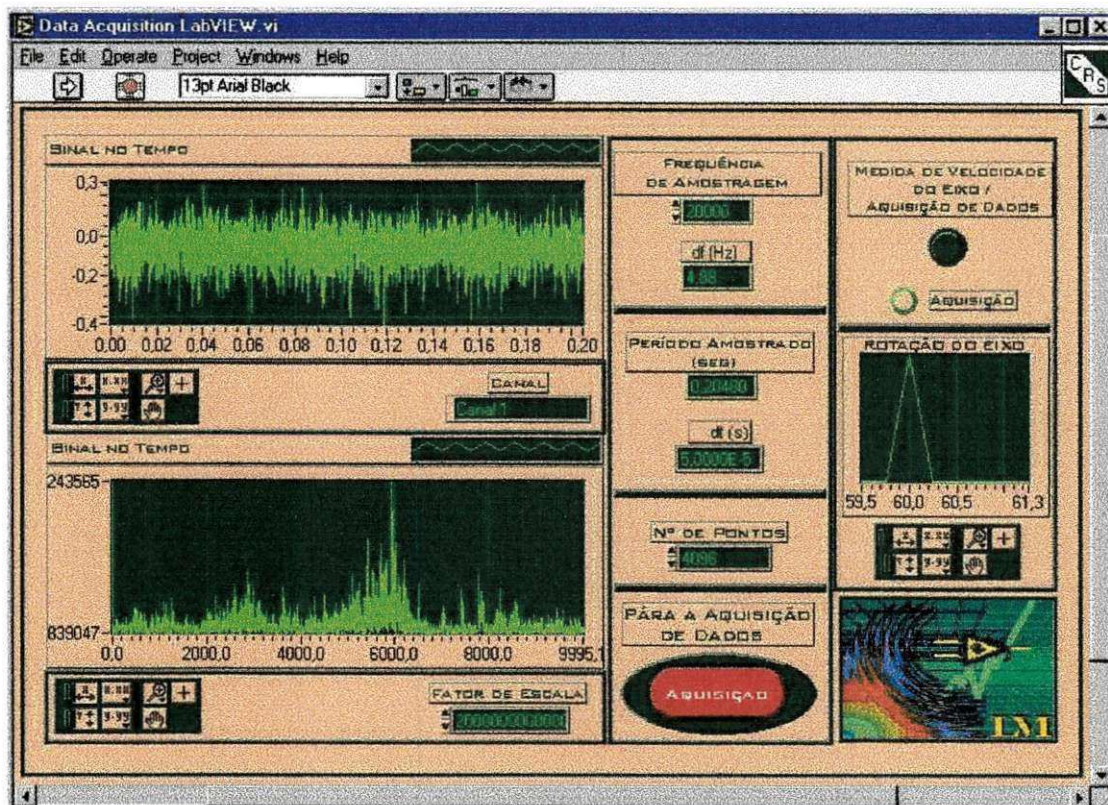


Figura 4.12 - Interface visual do programa de aquisição de dados.

Os parâmetros, como números de pontos e frequência de amostragem, podem ser modificados a qualquer momento. Este programa, além de fazer a aquisição de dados, possibilita a leitura da rotação do eixo do motor através do tacômetro, para um possível ajuste de rotação através do inversor de frequência. Como visto anteriormente, todo painel frontal do LabVIEW acompanha um diagrama em blocos que é o código fonte do programa. A Figura 4.13 mostra a disposição do código fonte para o programa correspondente a interface visual da Figura 4.12. Os VI's (instrumentos virtuais) utilizados foram: AI Acquire Waveform.vi, Auto Power Spectrum.vi e Write Characters To File.vi. O primeiro captura um número

especificado de amostras a uma taxa de amostragem especificada de um único canal e retorna com os dados lidos. O segundo recebe um sinal no tempo e calcula seu auto espectro. O último possibilita criar um arquivo em algum diretório, onde será armazenado os dados coletados e, depois dos dados salvos, fecha o arquivo. Os outros componentes são controles, indicadores e funções necessários para ao funcionamento lógico do programa. Uma outra rotina foi escrita para leitura do sensor de velocidade. Essa rotina usou basicamente dois instrumentos virtuais, o AI Acquire Waveform.vi e o Auto Power Spectrum.vi que coletava a informação do tacômetro e mostrava uma linha espectral na frequência de rotação do eixo. Não foi possível utilizar um canal digital da placa devido o ruído introduzido pelo inversor mascarar a informação de rotação. Como nesse programa usou-se a leitura de um sensor por vez, ou seja, uma entrada analógica era lida de cada vez, utilizou-se dois VI,s de aquisição separadamente. Essa observação é interessante pois quando se usa placas de aquisição de dados, a utilização de vários canais ao mesmo tempo divide a taxa de amostragem máxima da placa pelo número de canais que esta sendo usado e isso pode comprometer a medição.

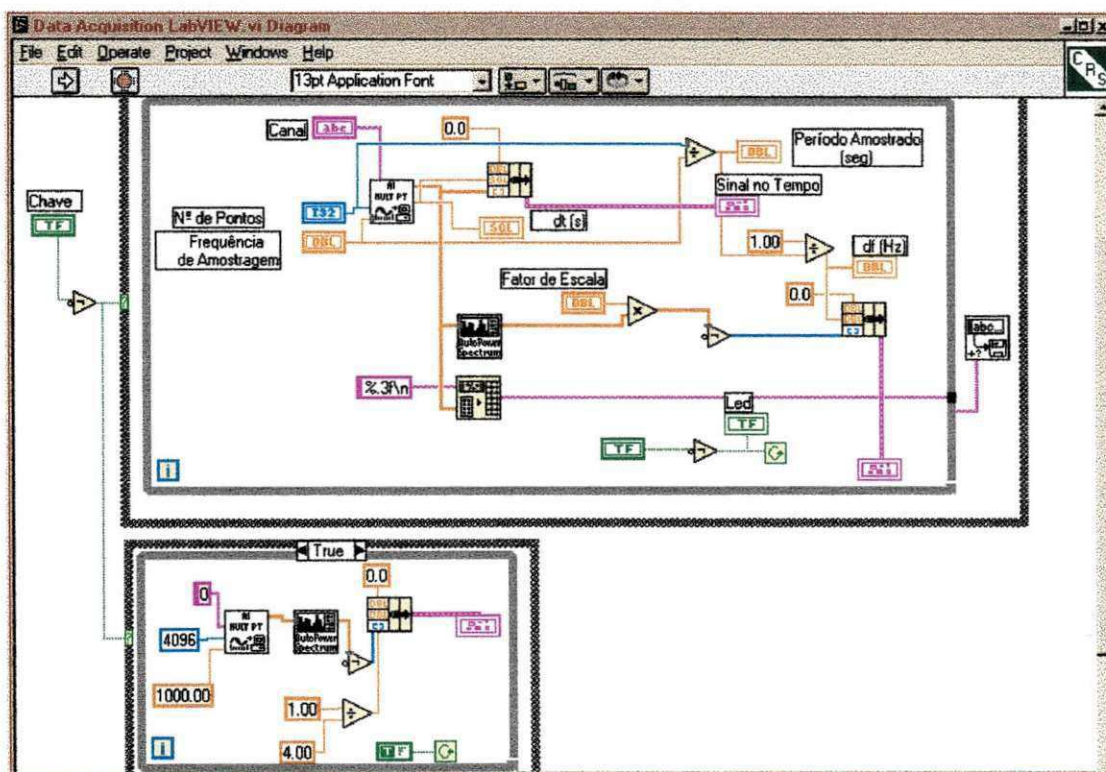


Figura 4.13 - Diagrama em blocos do programa de aquisição

4.5.3 O Matlab

O Matlab é um sistema interativo e uma linguagem de programação para computação técnica e científica. Integra a capacidade de fazer cálculos, visualizar graficamente as soluções expressas em linguagem matemática familiar. Nas aplicações típicas do Matlab incluem-se cálculos matemáticos, desenvolvimento de algoritmos, modelagem, simulações, análise, visualização gráfica de dados, etc. Seu elemento de dados básico é uma matriz que não requer dimensionamento. Isso permite solucionar muitos problemas computacionais, principalmente os que envolvem formulações matriciais ou vetoriais [Matlab 5 - Guia do Usuário]. Na elaboração deste trabalho o Matlab foi a ferramenta computacional utilizada para implementação das técnicas de análise dos dados obtidos através do programa de aquisição de dados. A Figura 4.14 mostra uma seqüência geral da estrutura dos programas desenvolvidos para análise dos sinais de vibração.

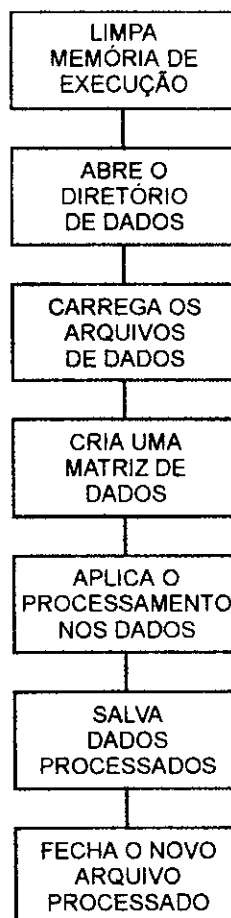


Figura 4.14 - Estrutura geral dos programas em Matlab para análise de vibração

4.6 - Coleta de Dados

Os sinais de vibração foram coletados em blocos de vinte sinais mantendo os parâmetros velocidade de rotação, carga, tamanho de defeito, taxa de amostragem e número de pontos constantes. A mudança de parâmetros a cada vinte blocos de sinais foi feita da seguinte forma:

- 1) As cargas aplicadas ao mancal de teste foram de 1000 N e 2000 N.
- 2) As rotações do eixo foram 60 Hz (3600 rpm) e 25 Hz (1500 rpm).
- 3) O tamanho do defeito foi obtido para três graus de severidade: severidade mínima = 0,15 mm de espessura; severidade média = 0,50 mm de espessura; severidade máxima = 1 mm de espessura.
- 4) A taxa de amostragem 20 KHz.
- 5) Número de pontos 4096 pontos

4.7 - Tipo de Defeito

O tipo de defeito escolhido para análise foi o defeito na pista externa do rolamento. Esse tipo facilita sua introdução artificialmente já que a pista externa do rolamento usado é separada dos rolos e da pista interna. O defeito foi introduzido com uma ferramenta tipo widia, com espessura 3 mm (Figura 4.14), montada sobre um suporte e acoplado a um torno mecânico.

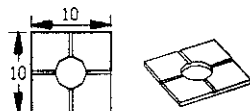


Figura 4.15 - Widia de corte que gerou o defeito no rolamento

A pista externa do rolamento foi presa ao cabeçote e a ferramenta presa no carro horizontal do torno que aprofundava o risco na pista até atingir a espessura desejada.

A Figura 4.15 mostra como foi feito o risco na pista externa do rolamento. A espessura e depende da profundidade h dada pela ferramenta.

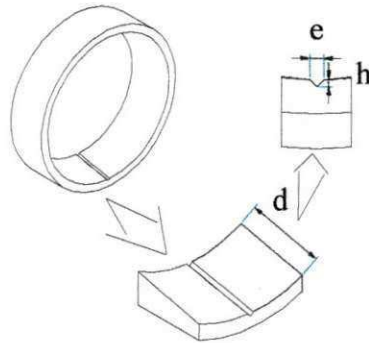


Figura 4.16 - Defeito introduzido no rolamento

A Tabela 4.7 classifica o grau de severidade de defeito de acordo com a espessura do risco introduzido na pista externa do rolamento.

Tabela 4.7 - Severidade do defeito na pista externa do rolamento

GRAU DE SEVERIDADE DO DEFEITO	
Grau de Severidade	Espessura do Defeito (mm)
Baixa	0,15
Média	0,50
Alta	1,00

4.7.1 - Frequências características do defeito

A frequência característica de defeito na pista externa é dada pela equação 3.23. Substituindo-se os valores das características do rolamento nesta equação obtém-se:

para $f = 60 \text{ Hz}$,

$$f_{de} = \frac{1}{2} N r \cdot f \left(1 - \frac{d}{dm} \cos \beta\right) \Rightarrow f_{de} = \frac{1}{2} \cdot 16 \cdot 60 \cdot \left(1 - \frac{6,44}{38,38} \cos(14)\right) = 401,85 \text{ Hz}$$

para $f = 25 \text{ Hz}$,

$$f_{de} = \frac{1}{2} N r \cdot f \left(1 - \frac{d}{dm} \cos \beta\right) \Rightarrow f_{de} = \frac{1}{2} \cdot 16 \cdot 25 \cdot \left(1 - \frac{6,44}{38,38} \cos(14)\right) = 167,44 \text{ Hz}$$

A tabela 4.8 resume os valores das frequências características de defeito.

Tabela 4.8 - Frequência característica de defeito

FREQUÊNCIA CARACTERÍSTICA DE DEFEITO	
Rotação do eixo (Hz)	Frequência (Hz)
25	167,44
60	401,85

4.8 - Aplicação das Técnicas Envelope e Análise Espectral

4.8.1 - Técnica do Envelope

Como visto no capítulo 3, a técnica do envelope é aplicada ao sinal de vibração através de seis passos distintos, nos quais o sinal no domínio do tempo passa para o domínio da frequência, é filtrado, retorna para o domínio do tempo, aplica-se o envelope e por fim retorna-se para o domínio da frequência. Através desses passos, é possível resgatar do sinal modulado às frequências moduladoras ou às baixas frequências contidas no sinal modulado. No caso de sinais de vibração de rolamentos espera-se que nas baixas frequências (espectro do envelope) apareçam as frequências de defeitos, caso existam.

A Figura 4.17 mostra os passos da técnica do envelope aplicada ao sinal modulado com a frequência portadora de 1 KHz, frequência da modulante 100 Hz e um ruído aleatório com

25 % da amplitude do sinal da modulante. Para aplicação da técnica foram desenvolvidas rotinas com o software Matlab. Entrava-se com o nome do primeiro arquivo de dados referente a um tipo de defeito, internamente eram carregados os 20 blocos de sinais e aplicado a transformada de Fourier em cada um deles. Em seguida era feito a média espectral dos 20 blocos de sinais. A partir do espectro médio de potência do sinal seguia-se com os outros 4 passos até chegar ao espectro do envelope.

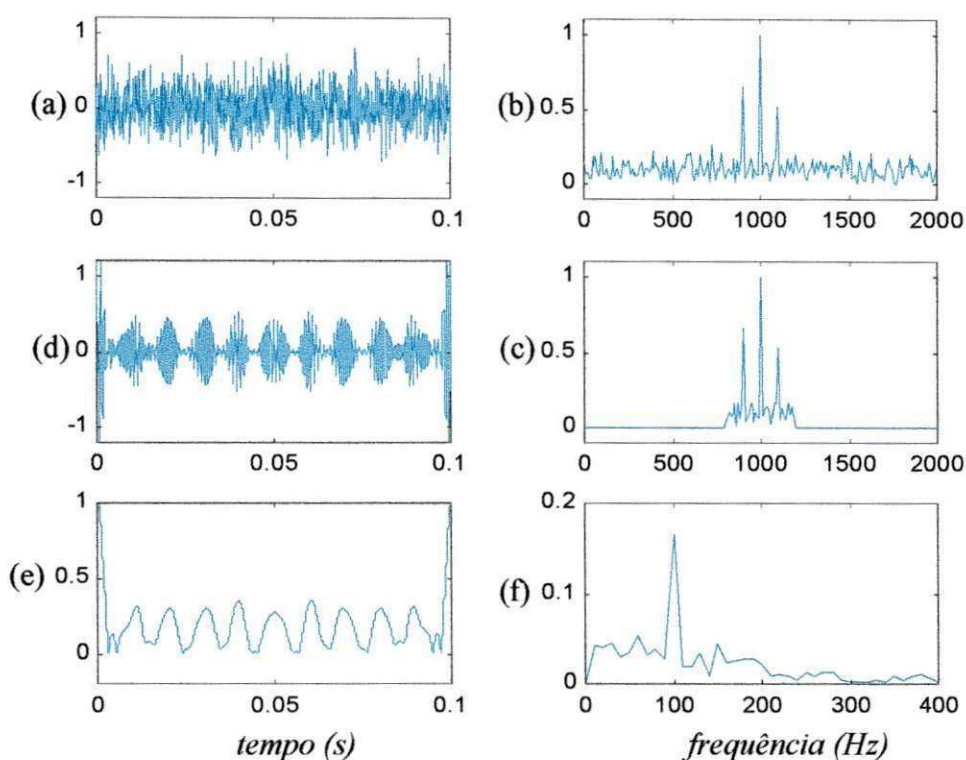


Figura 4.17 - Passos para aplicação da técnica do envelope (Simulação)

A Figura 4.17(a) mostra o sinal senoidal de 1 KHz modulado por outro sinal senoidal de 100 Hz somado a 25 % de ruído aleatório. A Figura 4.17(b) mostra o espectro em frequência do sinal modulado, possuindo todo o conteúdo de frequências que compõem o sinal de vibração. A Figura 4.17(c) mostra o espectro de frequência do sinal filtrado com bandas lateral superior e inferior correspondente a duas vezes a frequência da modulante em torno da frequência da portadora. Em um sinal de vibração real normalmente escolhe-se uma região de frequência para filtrar onde se concentra maior energia do sinal, pois é possível que aquela região de frequência esteja sendo excitada pela presença de defeito. No caso ilustrado acima as frequências eram conhecidas e portanto o filtro passa faixa foi colocado na região desejada.

A Figura 4.17(d) mostra a transformada inversa do espectro de frequência, ou seja, a volta do sinal modulado para o domínio do tempo, o qual é recomposto apenas com as frequências contidas na região filtrada de maior energia do sinal, sendo atenuadas o restante das frequências abaixo e acima da banda passante do filtro. Nessa figura observa-se mais claramente a existência da modulação em amplitude. Na Figura 4.17(a) verifica-se que a presença do ruído impede a visualização clara da modulação. No entanto, quando o sinal é filtrado retirando parte do ruído, a visualização da modulação é evidente. A Figura 4.17(e) mostra o envelope o sinal no tempo, ou seja, o contorno do sinal. Aplicando-se mais uma vez a transformada de Fourier obtém-se o espectro de frequência do sinal em baixas frequências como mostra a Figura 4.17(f). Nesse caso aparece evidente uma raia de frequência de 100 Hz.

4.8.2 - Análise Espectral

A resolução visual do espectro em frequência é demonstrado pelo espaçamento de linhas espectrais. Quanto menor o espaçamento, melhor será a resolução do espectro (McConnell 1995). Isso significa quanto um ponto no gráfico do espectro encontra-se afastado de outro ponto, ou quanto uma linha espectral se encontra distante de outra. Dependendo do distanciamento entre as linhas espectrais podem eventualmente ser mascaradas algumas frequências que são importantes para análise desejada.

A Figura 4.18 apresenta o zoom na região do espectro onde aparecem as linhas espectrais da portadora (1 KHz) e da modulante do sinal simulado anteriormente. Observa-se no gráfico (a) que as linhas espectrais estão muito próximas umas das outras e isso dificulta a visualização ou identificação das frequências que estão em torno de 1000 Hz. Com aplicação do zoom (gráfico (b)) é possível identificar uma linha espectral em 1000 Hz e duas outras em 900 Hz e em 1100 Hz. Essas últimas são respectivamente as bandas laterais inferior e superior do sinal modulado que estão espaçadas de 100 Hz (frequência da modulante) da frequência fundamental ou portadora (1000 Hz).

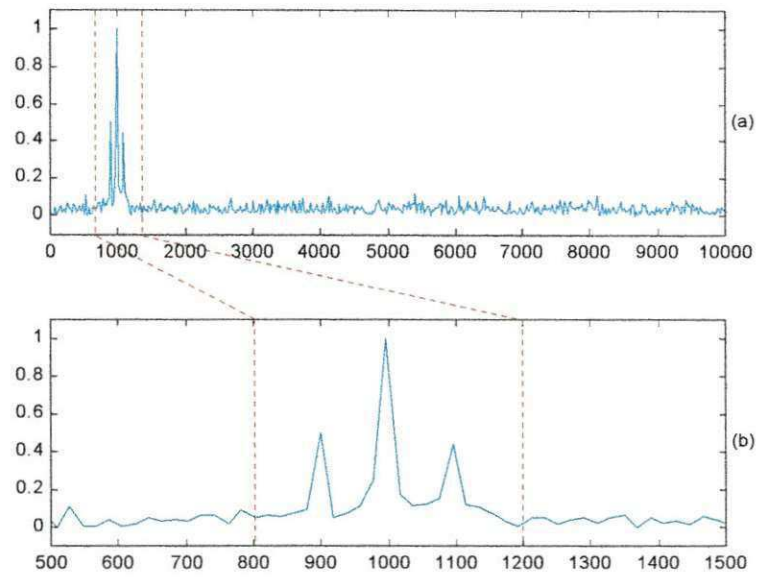


Figura 4.18 - Expansão do espectro através do zoom.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados e análises aplicadas aos sinais de vibração mecânica coletados. As análises foram divididas de acordo com o tipo de parâmetro variável considerado. Como descritos anteriormente, os parâmetros variáveis foram: tipo de defeito (severidade baixa, média e alta), rotação do eixo (25 Hz e 60 Hz) e carga aplicada ao mancal de teste (1000 N e 2000 N). Foram obtidos os níveis globais valor *RMS*, valor de pico, fator de crista e kurtose dos sinais no tempo e aplicadas as técnicas análises de spectral e envelope aos espectros dos sinais de vibração.

5.2 - Resultados

5.2.1 - Resultados com frequência de rotação do eixo 25 Hz

5.2.1.1 - Sinais no domínio do tempo e da frequência

Os gráficos da Figura 5.1 mostram os resultados obtidos para os sinais de vibração considerando a rotação do eixo 25 Hz e variando-se os parâmetros tipo de defeito e carga aplicada. Embora a análise no tempo não seja alvo deste trabalho, a Figura 5.1 apresenta os sinais de vibração do rolamento, visando melhor ilustrar os sinais adquiridos no sistema testado e validar algumas observações importantes sobre o comportamento de alguns parâmetros (X_{RMS} , X_{PICO} , FC, Kurtose). As quatro situações mostradas são: sem defeito (a), com defeito e severidade baixa (b), média (c) e alta (d).

A Figura 5.1(a) mostra o sinal no tempo do rolamento de rolos sem defeito, com rotação do eixo 25 Hz e submetido a uma carga de 1000 N. Os parâmetros carga e frequência de rotação do eixo são mantidos para os outros gráficos. A Figura 5.1(b) mostra o sinal de vibração do rolamento com defeito, localizado na pista externa, e severidade baixa ($e=0,15$ mm). Dos gráficos (a) e (b) nota-se um pequeno aumento de amplitude do sinal com possíveis impactos sucessivos igualmente espaçados. Entretanto, se estes sinais fossem coletados de uma máquina qualquer, a visualização dos impactos não seriam tão evidentes pois poderiam ser confundidas com ruídos.

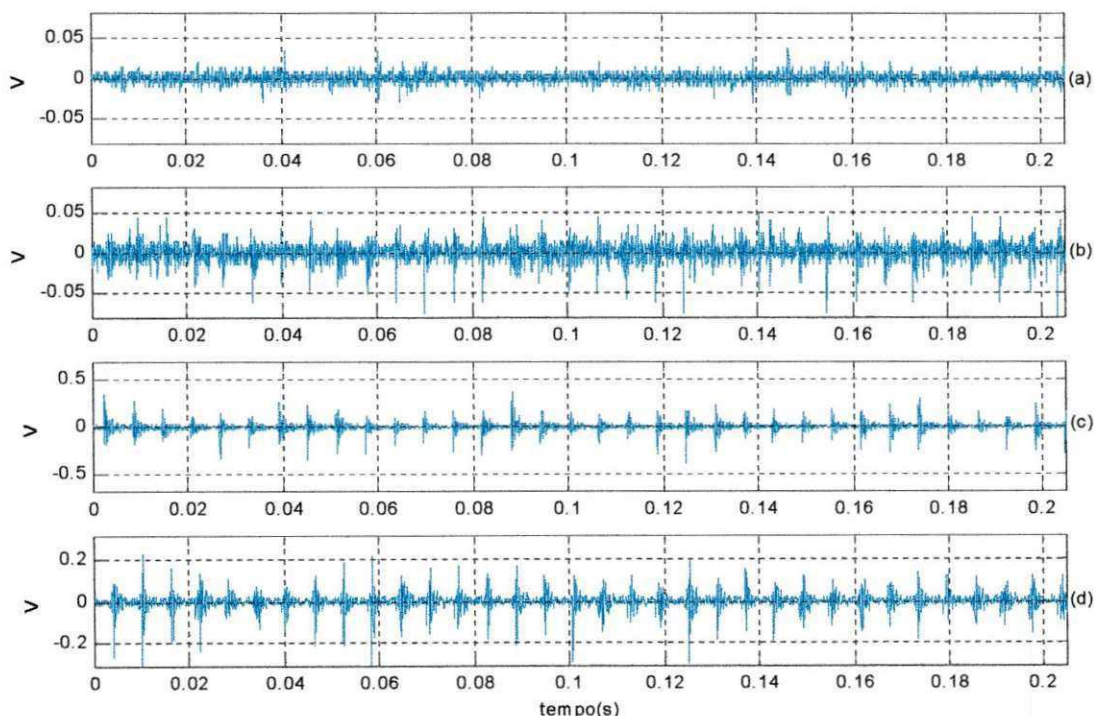


Figura 5.1 - Sinais de vibração do rolamento de rolos com rotação 25 Hz e carga 1000 N (sem defeito (a), com defeito e severidade baixa (b), média (c) e alta (d))

A Figura 5.1(c) mostra com um pouco mais de clareza o aparecimento dos impactos sucessivos provocados pela passagem do rolos sobre a falha. Nesta situação tem-se a severidade do defeito média onde a espessura do defeito é de 0,5 mm. A Figura 5.1(d) evidência a falha claramente através do espaçamento regular entre impactos e nesta situação o defeito tem severidade alta, com espessura de 1 mm.

Os gráficos dos sinais de vibração com defeito apresentam semelhança no que se refere ao aparecimento de impactos sucessivos provocados pela passagem dos rolos sobre o defeito, entretanto seus níveis de amplitudes são diferentes. Essa diferença poderá ser vista mais claramente quando determinado os níveis globais como valor de pico, valor *RMS*, fator de crista, kurtose, etc. Esses níveis globais, também chamados de indicadores, revelam o diagnóstico de falha no rolamento, embora não determinem a localização do defeito.

A Tabela 5.1 mostra os valores dos indicadores valor *RMS*, valor de pico, fator de crista e kurtose dos sinais de vibração apresentados na Figura 5.1. Os níveis são apresentados na ordem de severidade de defeito, considerando o valor de referência o sinal de vibração sem defeito. Observa-se um crescimento dos indicadores sem defeito e com defeitos e severidades baixa e média. Porém, com defeito e severidade alta os valores dos indicadores diminuem.

Tabela 5.1 - Níveis globais do sinal de vibração a 25 Hz, 1000 N

INDICADORES DEFEITO	Valor <i>RMS</i> (V)	Valor de Pico (V)	Fator de Crista	Kurtose
Sem Defeito	0,0061	0,0383	6,2842	4,4638
C/ Defeito Sev. Baixa	0,0116	0,0821	7,1011	8,3391
C/ Defeito Sev. Média	0,0425	0,3792	8,9246	20,0134
C/ Defeito Sev. Alta	0,0354	0,3156	8,9220	17,0378

Os dados apresentados na Tabela 5.1 são traçados nas Figuras 5.2 e 5.3. A Figura 5.2 mostra o comportamento do valor *RMS* e do valor de pico para cada grau de severidade (1=sem defeito, 2=com defeito e severidade baixa, 3=com defeito e severidade média, 4=com defeito e severidade alta). Verifica-se um crescimento até o defeito de severidade média, seguido de uma diminuição quando a severidade do defeito torna-se alta. Os indicadores fator de crista e kurtose mantêm-se também com crescimento de seus níveis até o defeito com severidade média, diminuindo com o aparecimento do defeito de severidade alta.

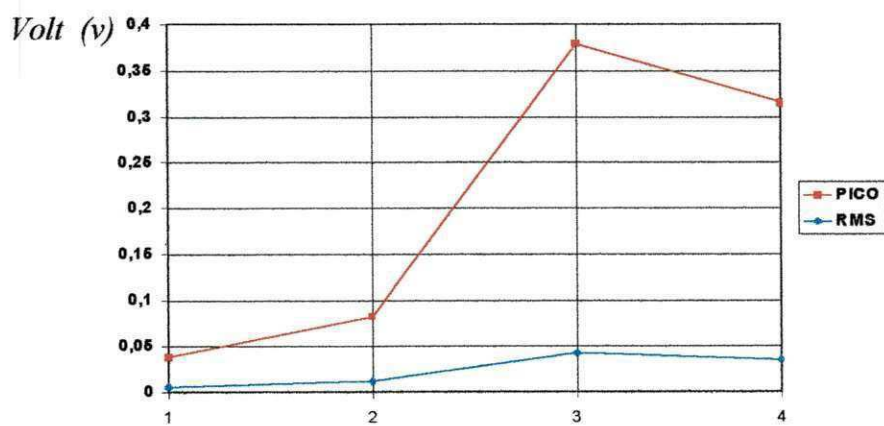


Figura 5.2 - Indicadores valor *RMS* e valor de pico dos sinais de vibração da Figura 5.1 (1=sem defeito, 2=severidade baixa, 3=severidade média, 4=severidade alta)

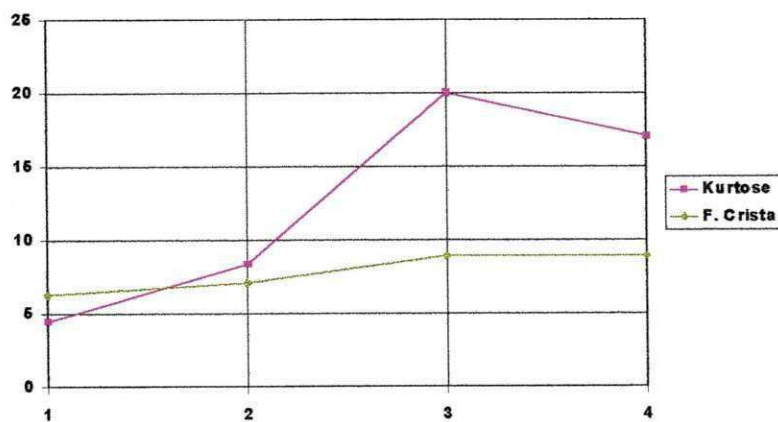


Figura 5.3 - Indicadores fator de crista e kurtose dos sinais de vibração da Figura 5.1 (1=sem defeito, 2=severidade baixa, 3=severidade média, 4=severidade alta)

A Figura 5.4 mostra os sinais no domínio do tempo considerando a mesma rotação do eixo (25 Hz) com mudança da carga aplicada no eixo para 2000 N. A seqüência de gráficos é apresentada considerando o rolamento sem defeito, com defeito e severidades baixa, média e alta, respectivamente.

Nos gráficos da Figura 5.4(a) e (b), mesmo sabendo que as falhas existem e que são de tamanhos diferentes, os sinais são bastantes semelhantes tornando confusa a identificação da periodicidade dos impactos em (b) e, portanto de difícil visualização do defeito. Contudo as Figuras 5.4(c) e (d) mostram bem evidentes os impactos periódicos comprovando a existência de falha no rolamento.

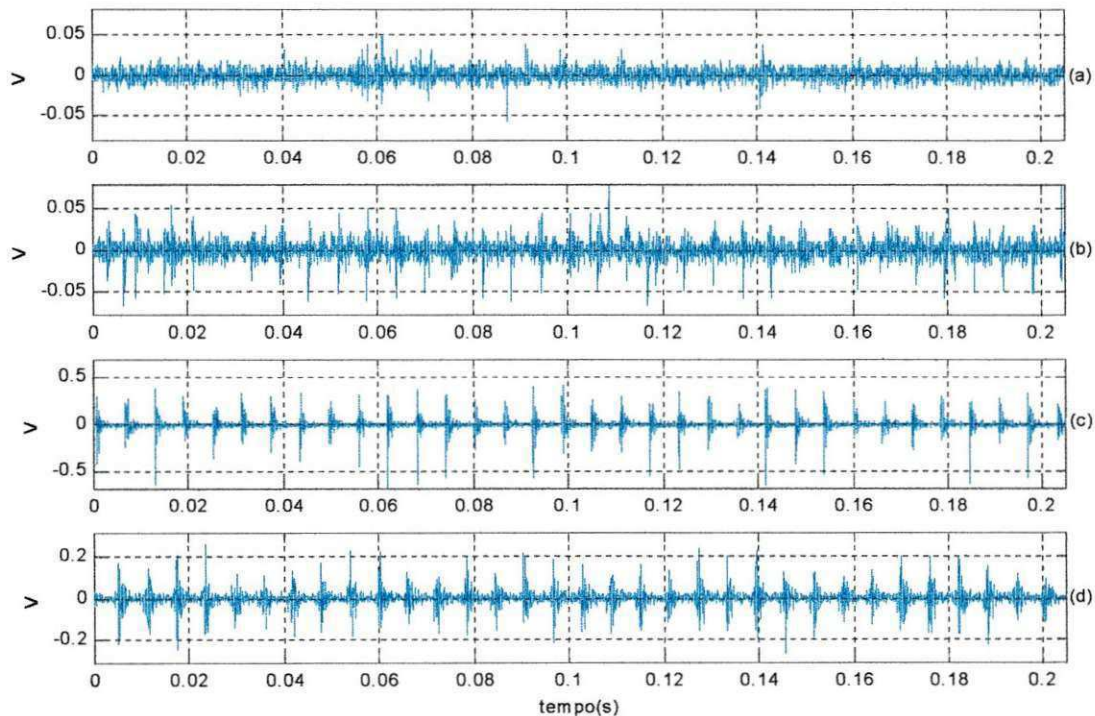


Figura 5.4 - Sinais de vibração do rolamento de rolos com rotação 25Hz e carga 2000 N (sem defeito (a), com defeito e severidade baixa (b), média (c) e alta (d))

A Tabela 5.2 apresenta os resultados dos indicadores valor *RMS*, fator de crista e kurtose dos sinais de vibração da Figura 5.4. Semelhantemente a tabela 5.1, os valores dos indicadores são apresentados seguindo o crescimento do grau de severidade de defeito. Observa-se que os indicadores valor *RMS*, valor de pico e kurtose cresceram até o defeito com

severidade média e voltaram a diminuir com o defeito e severidade alta. Já o fator de crista apresentou também um decréscimo do nível sem defeito para o nível com defeito e severidade baixa, tornando em seguida seu comportamento igual aos outros indicadores.

Tabela 5.2 - Níveis globais do sinal de vibração a 25 Hz, 2000 N

INDICADORES DEFEITO	Valor RMS <i>(V)</i>	Valor de Pico <i>(V)</i>	Fator de Crista	Kurtose
Sem Defeito	0,0078	0,0562	7,2495	5,6410
C/ Defeito Sev. Baixa	0,0114	0,0791	6,9369	8,0752
C/ Defeito Sev. Média	0,0668	0,6804	10,1817	27,5623
C/ Defeito Sev. Alta	0,0383	0,2695	7,0395	12,9155

As Figuras 5.5 e 5.6 apresentam os gráficos correspondentes aos indicadores da tabela acima. Observa-se que o fator de crista do sinal sem defeito possui amplitude maior que com defeito e severidade baixa. Os outros indicadores crescem até o sinal com defeito e severidade média e decrescem para severidade alta de defeito.

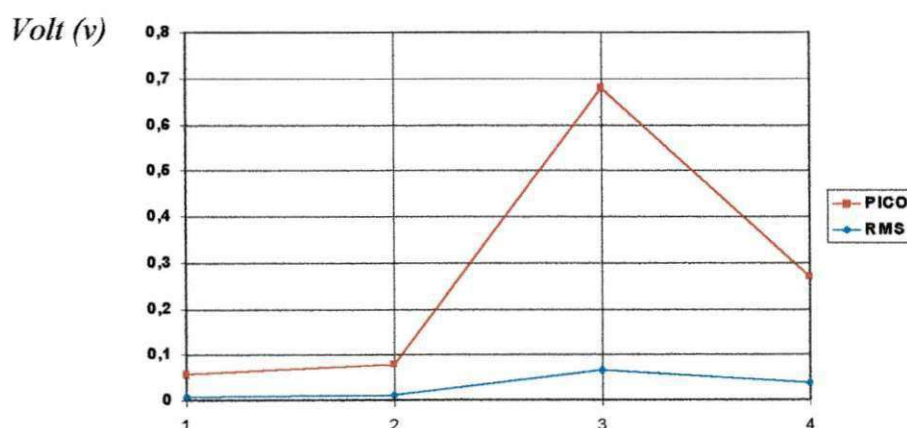


Figura 5.5 - Indicadores valor *RMS* e valor de pico dos sinais de vibração da Figura 5.2 (1=sem defeito, 2=severidade baixa, 3=severidade média, 4=severidade alta)

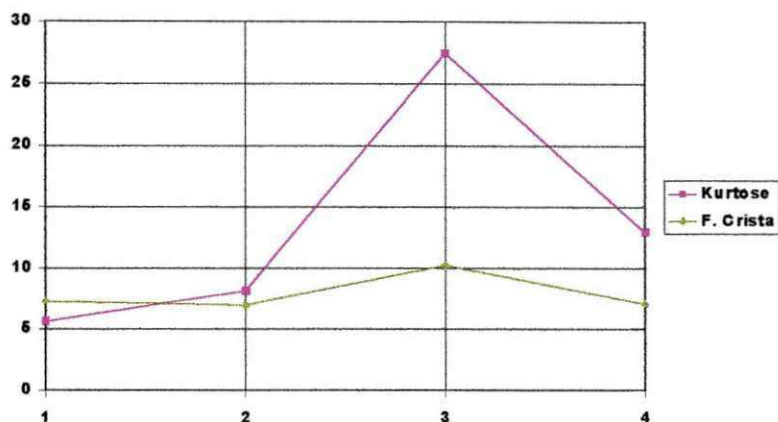


Figura 5.6 - Indicadores fator de crista e kurtose dos sinais de vibração da Figura 5.2 (1=sem defeito, 2=severidade baixa, 3=severidade média, 4=severidade alta)

Os valores dos indicadores nas Tabelas 5.1 e 5.2 diminuem quando o defeito passa do grau de severidade média para o grau de severidade alta. Esse é um resultado que pode levar o analista a uma conclusão incorreta da real situação da máquina caso não esteja acompanhando continuamente os indicadores. Podia-se esperar que com aumento da falha os indicadores continuassem a crescer, mas isso não acontece. Nessa situação, é possível que a falha tenha um tamanho tal que faz com que os rolos passem mais suavemente pelo defeito ou até mesmo que gerem sucessivos impactos menores que os anteriores, diminuindo os níveis dos indicadores. Nesse caso pode-se dizer que a falha é pequena ou que ainda não existe e no entanto a falha já está grave. Esse comportamento não foi observado pelas referências consultadas.

Comparando-se os sinais de vibração no domínio do tempo da Figura 5.1 com os da Figura 5.4, pode-se observar que para cargas diferentes aplicadas ao rolamento de teste, os sinais de vibração não apresentam-se com diferenças claras. Observa-se também que na apresentação do defeito com grau de severidade baixa os impactos que caracterizam o defeito são muitas vezes camuflados pelo ruído inerente ao sinal, dificultando a identificação. Embora seja possível identificar a existência de defeito no rolamento com alguns sinais de vibração no tempo, não é possível determinar qual componente do rolamento está com a falha.

O gráfico da Figura 5.6 mostra que o fator de crista do sinal sem defeito apresenta nível maior do que o sinal com defeito e grau de severidade baixa. Isso pode ser proveniente de outros ruídos que podem prevalecer no sinal de vibração. No entanto, quando a falha se torna dominante no sinal de vibração, a tendência é que os indicadores cresçam até que a falha se torne mais grave ao ponto de apresentar diminuição dos indicadores como acontece quando o defeito tem grau de severidade alta.

Com o aparecimento do defeito no rolamento os espectros apresentam regiões ou intervalos de frequências com amplitudes maiores e linhas espectrais mais evidentes se comparadas com as dos sinais de rolamento sem defeito. Essas regiões possivelmente foram excitadas pelo defeito, modulando as frequências naturais do sistema. São, portanto, regiões prováveis de investigação. A Figura 5.7 apresenta os espectros de potência dos sinais de vibração do rolamento de rolos sem defeito, com defeito e grau severidade baixa ($e=0,15\text{ mm}$), média ($e=0,50\text{ mm}$) e alta ($e=1,0\text{ mm}$) respectivamente, com rotação de eixo 25 Hz e carregamento de 1000 N no rolamento de teste.

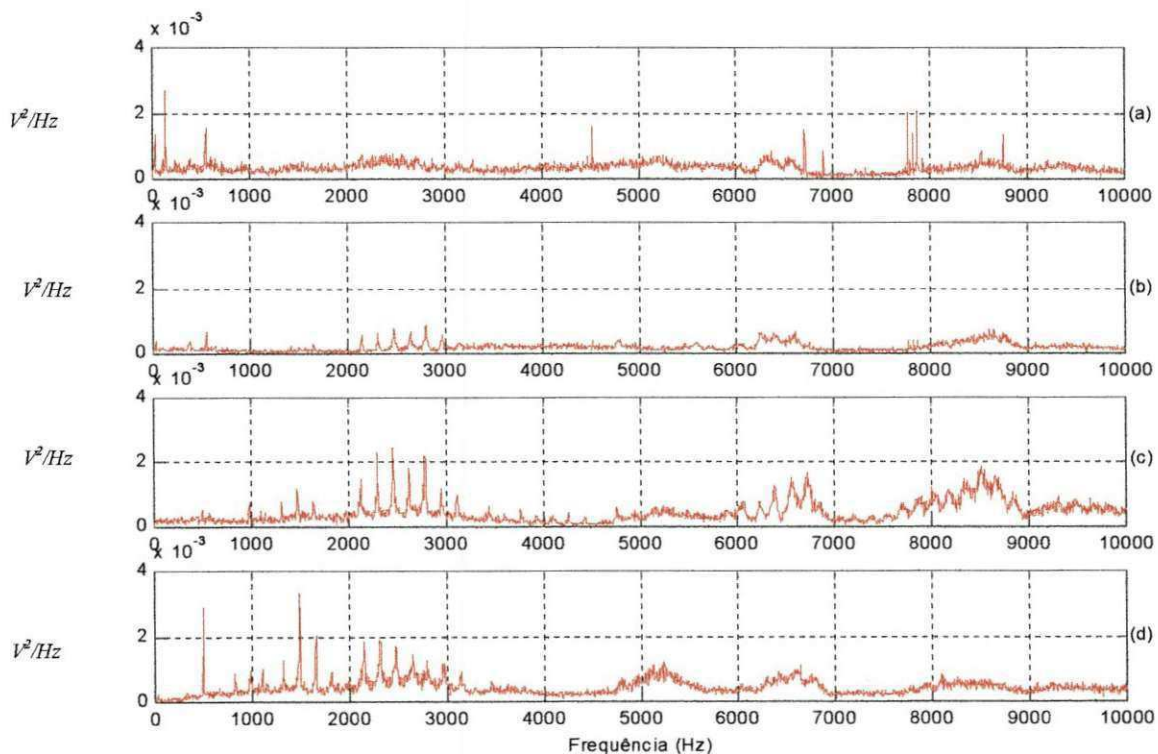


Figura 5.7 - Espectro do sinal de vibração do rolamento de rolos com rotação de 25 Hz. e carga 1000 N (sem defeito (a), com defeito e grau de severidade baixa (b), média (c), alta (d))

Os espectros são comparados entre si para determinar intervalos de frequência a serem analisados posteriormente.

Nos espectros da Figura 5.7(a) é possível identificar a existência de picos importantes nas baixas frequências (ex.: 25 Hz) que podem estar associados a um possível desalinhamento ou desbalanceamento do eixo. Comparando-se as Figuras 5.7(a) e (b) pode-se observar que a região entre 2000 Hz e 3000 Hz evidencia um aumento de energia do sinal, e também o aparecimento de linhas espectrais bem definidas que podem estar correlacionadas com o defeito. Na Figura 5.7(c), além da região de frequência citada anteriormente, verifica-se algumas linhas espectrais com amplitudes maiores que as do sinal sem defeito na região entre 1000 Hz e 2000 Hz. Na Figura 5.7(d), as duas regiões comentadas anteriormente aparecem claramente com amplitudes maiores que as do sinal sem defeito e com linhas espectrais bem evidentes. Algumas outras regiões apresentaram mudanças nas amplitudes, porém não tão relevantes quanto as escolhidas.

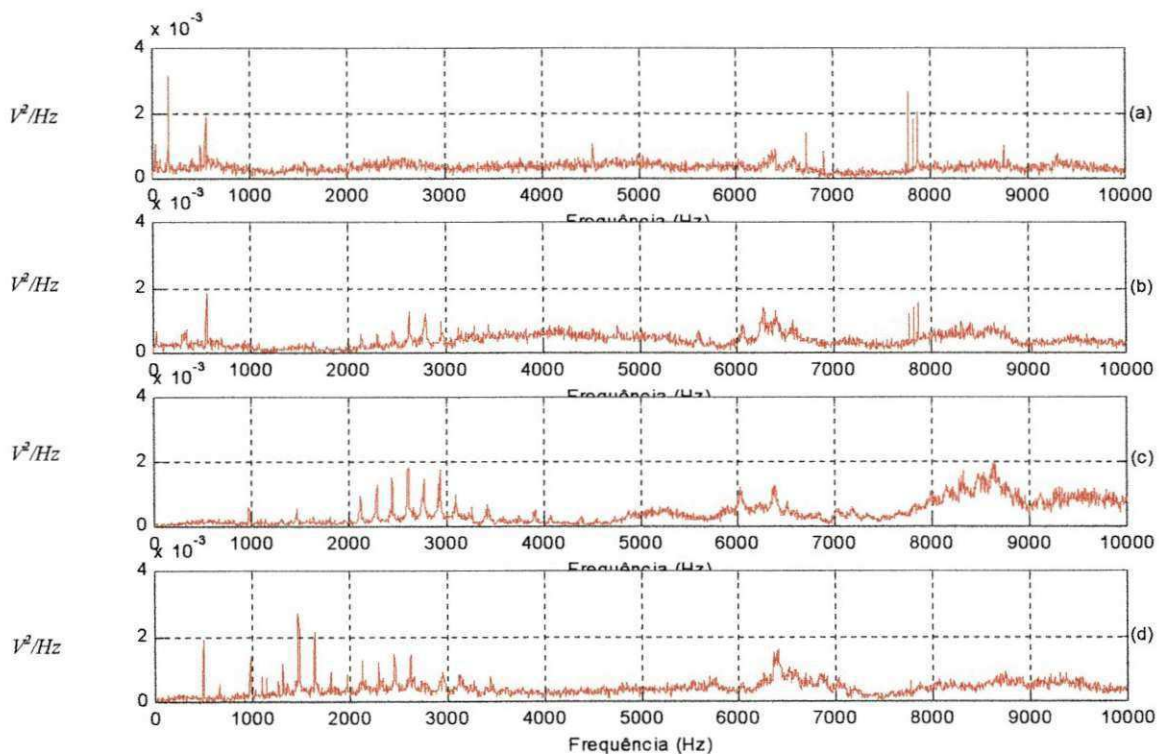


Figura 5.8 - Espectro do sinal de vibração do rolamento de rolos com rotação 25 Hz e carga 2000 N (sem defeito (a), com defeito e grau de severidade baixa (b), média (c), alta (d))

Comparando-se os espectros da Figura 5.8 com os da Figura 5.7, observa-se que estes são muito semelhantes entre si. As regiões de frequências mais excitadas estão situadas entre 2000 Hz e 3000 Hz para os sinais de vibrações com defeito e grau de severidade baixa e entre 1000 Hz e 3000 Hz para os sinais de vibração com defeito e grau de severidade alta.

Mudança de carregamento adotada parece não afetar os espectros de frequência para as duas situações analisadas.

Observa-se que os espectros de frequência mostram com maior clareza a existência do defeito se comparados com os sinais no domínio do tempo, pois estes apresentam linhas espectrais que identificam as componentes de frequência existentes no sinal no domínio do tempo. Dessa maneira, identifica-se as frequências que estão relacionadas com o defeito e com o elemento do rolamento que contém a falha.

Através dos espectros, também pode-se observar que as regiões de frequências mais baixas começam a ser mais excitadas quando o tamanho da falha no rolamento aumenta.

5.2.1.2 - Aplicação do zoom nos espectros de frequência

Os espectros apresentados até agora mostraram que a presença do defeito excita determinadas regiões de frequência que sendo investigadas através de alguma técnica de análise podem apresentar evidências do defeito. Uma maneira simples de visualizar estas regiões é aplicar o zoom onde foram observadas zonas com aumento de amplitude com características da existência do defeito na pista externa do rolamento.

Considerando os cálculos apresentados no capítulo anterior, a frequência característica de defeito para a pista externa do rolamento com frequência de rotação do eixo 25 Hz, é igual a 167,44 Hz. Os parâmetros do rolamento necessários para o cálculo estão listados na Tabela 4.3 (Capítulo 4).

A Figura 5.9 mostra o zoom, na região entre 1000 Hz e 2000 Hz com carregamento de 1000 N e graus de severidade baixa (a), média (b) e alta (c) apresentados.

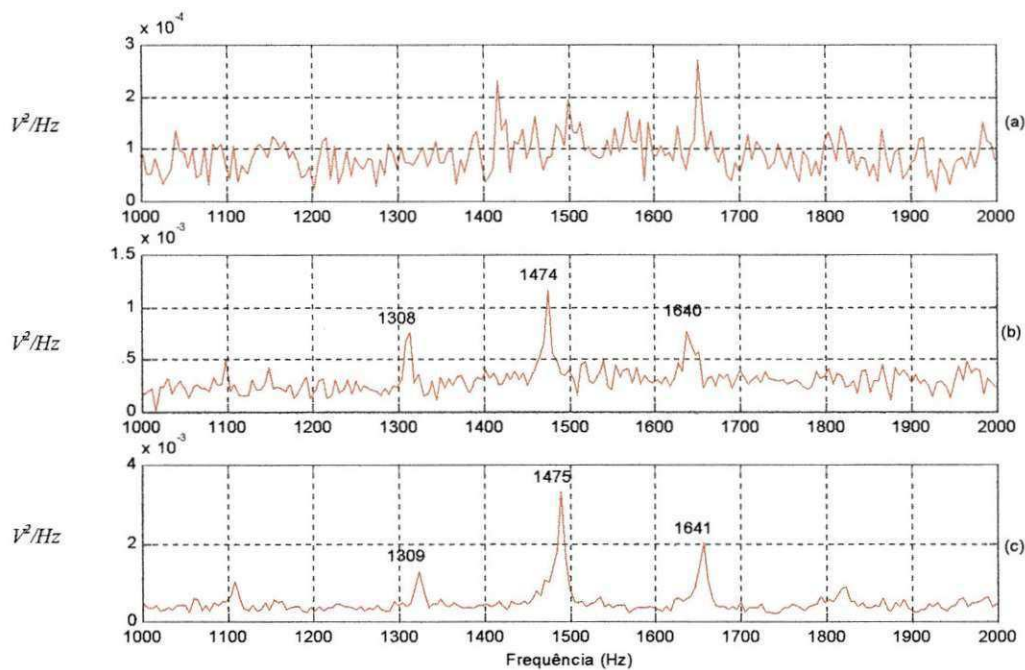


Figura 5.9 - Zoom nos espectros de frequências dos sinais de vibração do rolamento de rolos com rotação 25 Hz e carga 1000 N (com defeito e grau de severidade baixa (a), média (b) alta (c))

Na Figura 5.9(a) não foi possível identificar linhas espectrais de frequência que se relacionem com o defeito. Nessa região com defeito e grau de severidade baixa, a relação sinal ruído é baixa, não sendo uma boa escolha para análise

Observa-se nas Figuras 5.9(b) e (c) que esta região de frequência escolhida apresenta linhas espectrais bastante evidentes, espaçadas pela frequência característica de defeito, 167 Hz aproximadamente. Nota-se também que com defeito e grau de severidade alta (Figura 5.9(c)) as linhas espectrais nessa região tem valores de amplitudes maiores que as linhas espectrais do sinal com defeito e grau de severidade média (Figura 5.9(b)).

As Figuras 5.10(a), (b) e (c) apresentam o zoom do sinal de vibração na região entre 1000 Hz e 2000 Hz agora para uma carga aplicada ao rolamento de teste de 2000 N , com grau de severidade de defeito baixa, média e alta, respectivamente.

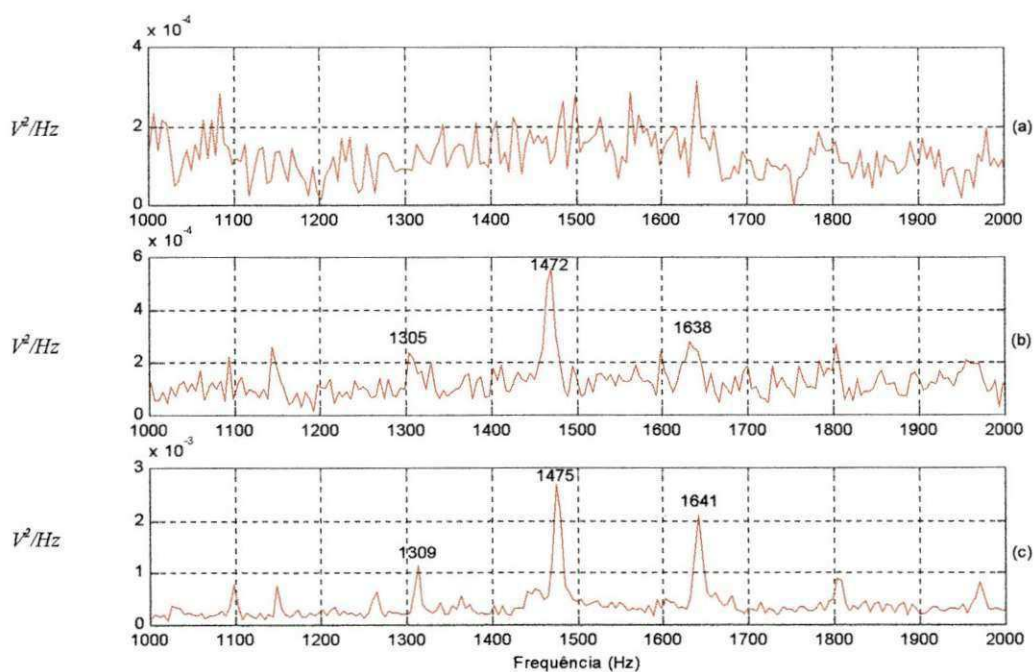


Figura 5.10 - Zoom nos espectros de frequências dos sinais de vibração do rolamento de rolos com rotação 25 Hz e carga 2000 N (com defeito e grau de severidade baixa (a), média (b), alta (c))

Semelhantemente a Figura 5.9(a) o espectro de frequência do sinal de vibração com severidade baixa da Figura 5.10(a) não apresenta linhas espectrais visíveis relacionadas com o defeito. Já os outros espectros (Figuras 5.10(b) e (c)) apresentam linhas espectrais evidentes e espaçadas da frequência característica de defeito.

Observando-se os espectros da Figura 5.9(b) e (c) e comparando-os com os espectros da Figura 5.10(b) e (c) nota-se que as amplitudes das linhas espectrais que evidenciam o defeito nos espectros correspondentes são menores nos espectros de frequências onde a carga aplicada ao rolamento de teste foi maior (2000 N).

As Figuras 5.11(a), (b) e (c) apresentam o zoom do sinal de vibração na região entre 2000 Hz e 3200 Hz com carregamento de 1000 N e grau de severidade de defeito baixa (a), média (b) e alta (c), respectivamente. Nessa região de frequência, para todos os graus de severidade de defeito, foi possível visualizar linhas espectrais bem definidas e espaçadas da frequência característica do defeito. Nota-se que as amplitudes das linhas espectrais

aumentam de intensidade quando o defeito passa do grau de severidade baixo para o grau de severidade médio e que diminuem quando passa do grau de severidade médio para grau de severidade alto.

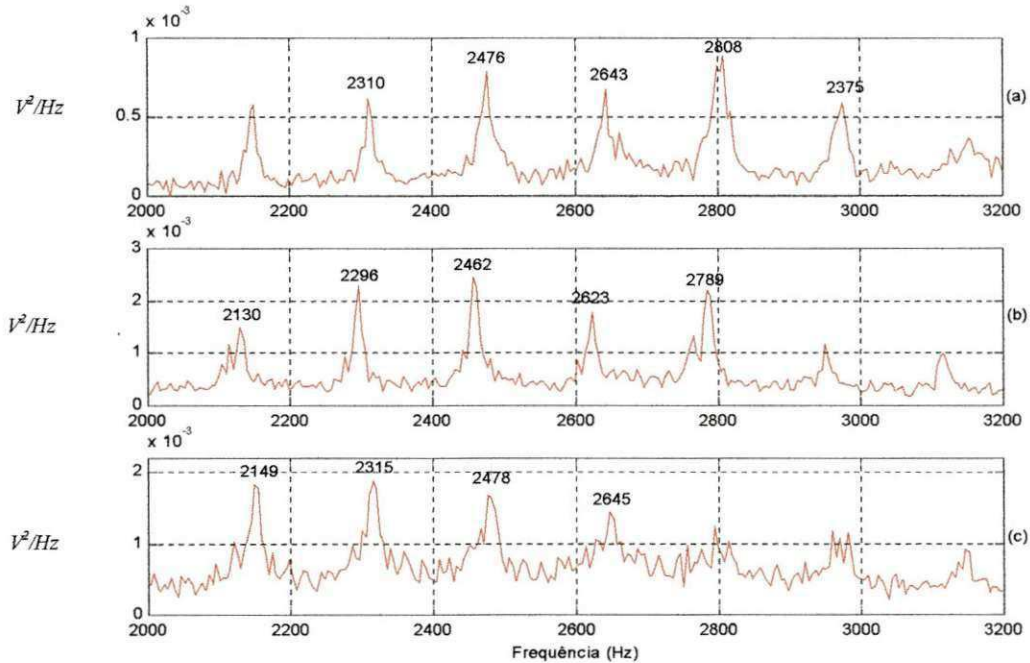


Figura 5.11 - Zoom nos espectros de frequências dos sinal de vibração do rolamento de rolos com rotação 25 Hz e carga 1000 N (com defeito e grau de severidade baixa (a), média (b), alta (c))

As Figuras 5.12(a), (b) e (c) apresentam o zoom do sinal de vibração na mesma região que a figura anterior porém com carregamento de 2000 N, com grau de severidade de defeito baixa (a), média(b) e alta(c), respectivamente.

Semelhantemente aos espectros da Figura 5.11, os espectros da Figura 5.12 mostram linhas espectrais bem evidentes espaçadas da frequência característica do defeito.

Através dos espectros mostrados observa-se que as regiões escolhidas apresentaram linhas espectrais bem definidas e espaçadas da frequência característica do defeito, especialmente na região entre 2000 e 3200 Hz.

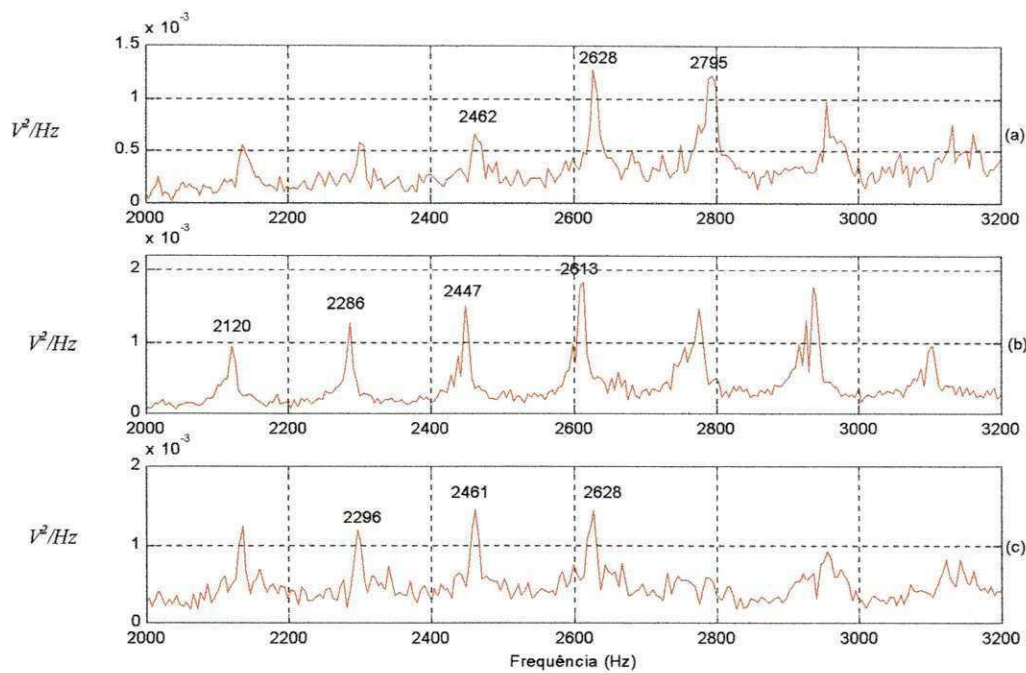


Figura 5.12 - Zoom nos espectros de frequências dos sinal de vibração do rolamento de rolos com rotação 25 Hz e carga 2000 N (com defeito e grau de severidade baixa (a), média (b), alta (c))

5.2.1.3 - Aplicação da técnica do Envelope

A técnica do Envelope, detalhada no capítulo anterior, é aplicada aos sinais geralmente nas regiões onde ocorrem aumento de energia do sinal. Os sinais são filtrados nessas regiões de frequência, recomposto para o domínio do tempo, aplicado a técnica do envelope e por fim trazidos novamente para o domínio da frequência. Nesse último passo tem-se o espectro do sinal nas baixas frequências. Na realidade, a técnica do envelope demodula o sinal com defeito separando das altas frequências as baixas que foram responsáveis pela vibração mecânica (os impactos dos rolos sobre o defeito). Nesta secção será mostrada a técnica do envelope aplicada as regiões dos sinais de vibração escolhidas na secção anterior.

A Figura 5.13 mostra os envelopes dos sinais aplicados na região entre 800 Hz e 2000 Hz do sinal de vibração com severidade de defeito baixa (a), média (b) e alta (c), 25 Hz de rotação do eixo e 1000 N a carga aplicada ao rolamento. A Figura 5.13(a) mostra que nessa região de frequências não foi possível a visualização da frequência característica de defeito com aplicação do envelope, mesmo porque essa não foi uma boa região para análise. Os espectros das Figuras 5.13(b) e (c) mostram a frequência característica de defeito na pista externa do rolamento e algumas linhas espectrais, visíveis até a terceira harmônica. As linhas tracejadas em vermelho indicam a frequência característica de defeito (167Hz) e suas harmônicas calculadas.

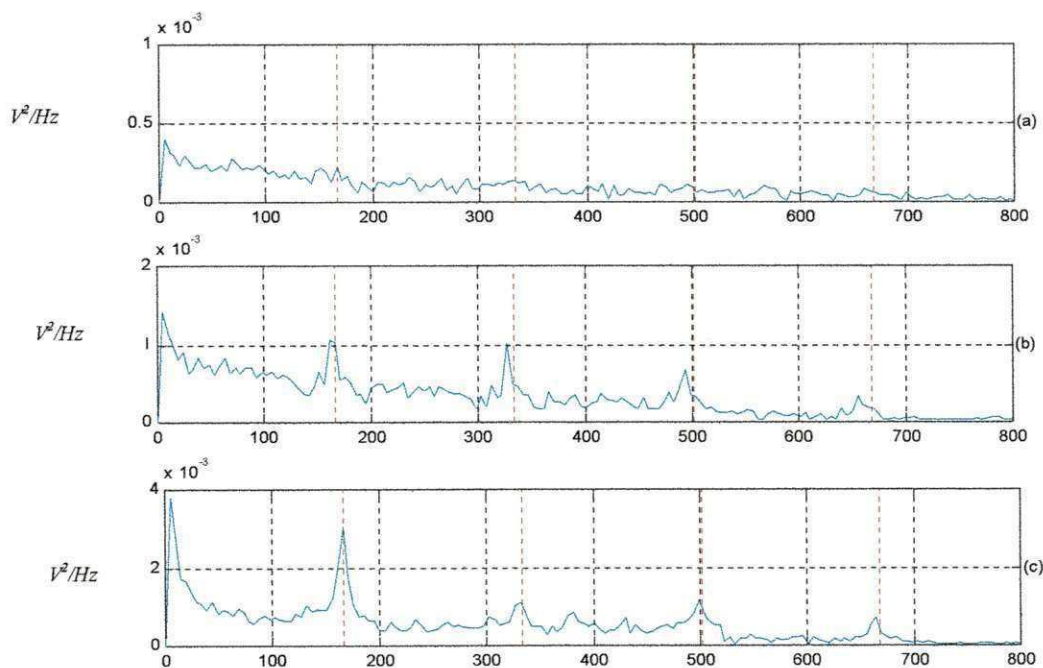


Figura 5.13 - Envelope dos sinais de vibração do rolamento de rolos com rotação 25 Hz carga 1000 N filtrado na região entre 800 Hz e 2000 Hz (com severidade de defeito baixa (a), média (b) e alta (c))

A Figura 5.14 mostra os envelopes dos sinais aplicados na região filtrada entre 800 Hz e 2000 Hz do sinal de vibração com severidade de defeito baixa (a), média (b) e alta (c), 25 Hz de rotação do eixo e 2000 N de carga aplicada ao rolamento. A Figura 5.14(a) mostra que nessa região, para o defeito com grau de severidade baixa, também não foi possível visualizar

a frequência característica do defeito. Já os outros espectros da mesma figura mostram uma linha espectral correspondente a frequência característica de defeito e algumas harmônicas.

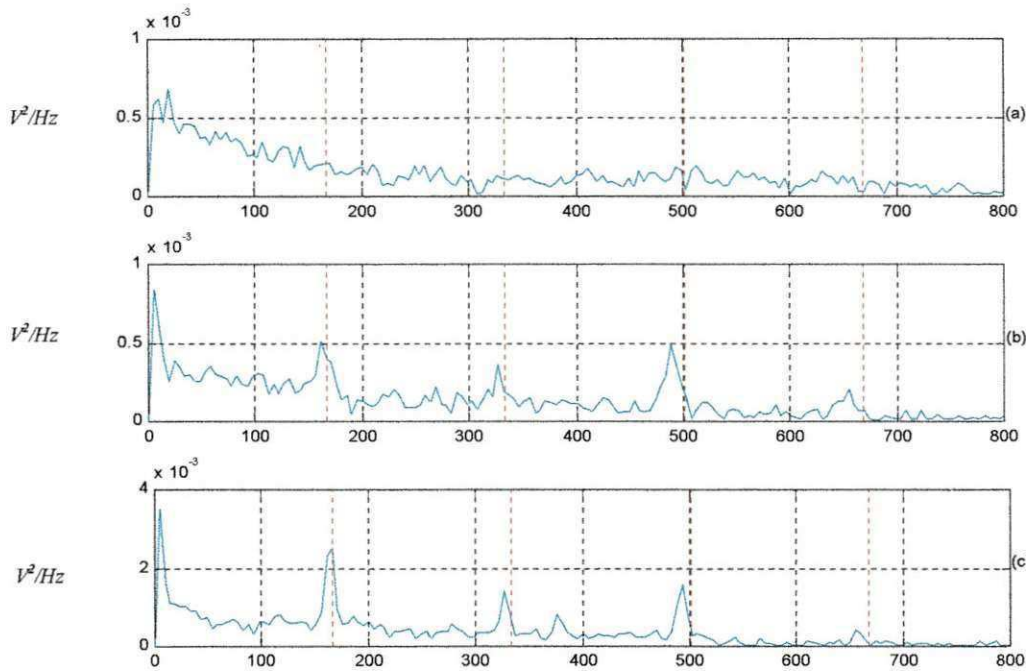


Figura 5.14 - Envelope dos sinais de vibração do rolamento de rolos com rotação 25 Hz carga 2000 N filtrado na região entre 800 Hz e 2000 Hz (com severidade de defeito baixa (a), média (b) e alta (c))

A Figura 5.15 mostra os envelopes dos sinais aplicados na região filtrada entre 2000 Hz e 3200 Hz do sinal de vibração com severidade de defeito baixa (a), média (b) e alta (c), 25 Hz de rotação do eixo e 1000 N de carga aplicada ao rolamento de teste. Os espectros da Figura 5.15 mostram claramente a frequência característica de defeito na pista externa do rolamento e suas harmônicas, bastante visíveis até a terceira harmônica.

A Figura 5.16 mostra os envelopes dos sinais aplicados na região filtrada entre 1000 Hz e 3200 Hz do sinal de vibração com severidade de defeito baixa (a), média (b) e alta (c), 25 Hz de rotação do eixo e 2000 N de carga aplicada ao rolamento de teste. Os espectros da Figura 5.16 mostram que a frequência característica de defeito é claramente identificada com duas harmônicas bem visíveis no espectro do envelope, para os três graus de severidade de defeito.

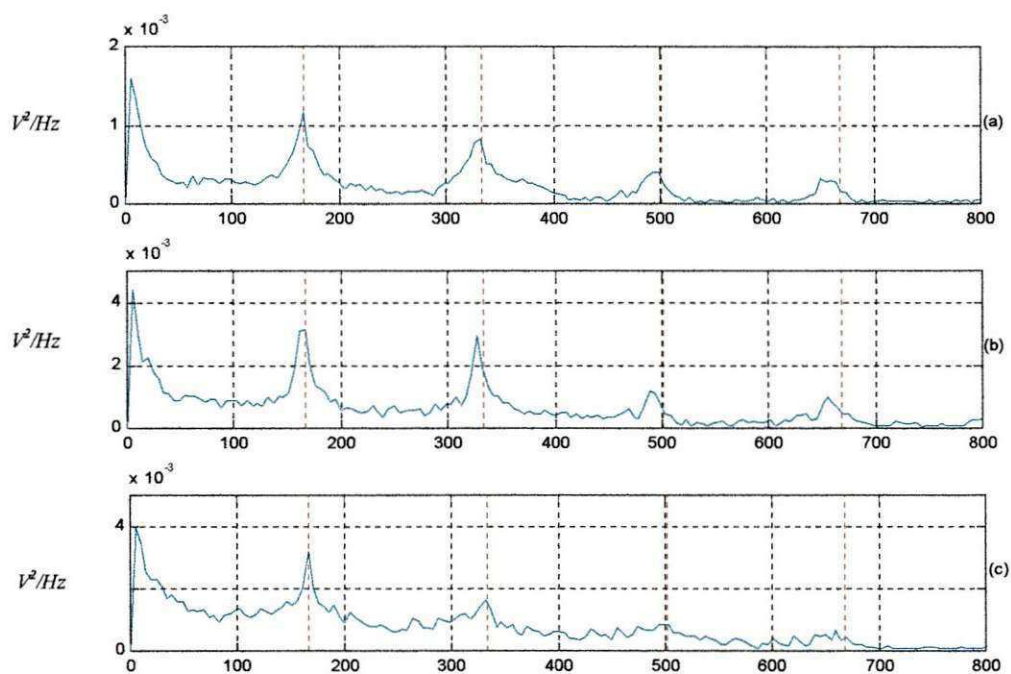


Figura 5.15 - Envelope dos sinais de vibração do rolamento de rolos com rotação 25 Hz carga 1000 N filtrado na região entre 2000 Hz e 3200 Hz (com severidade de defeito baixa (a), média (b) e alta (c))

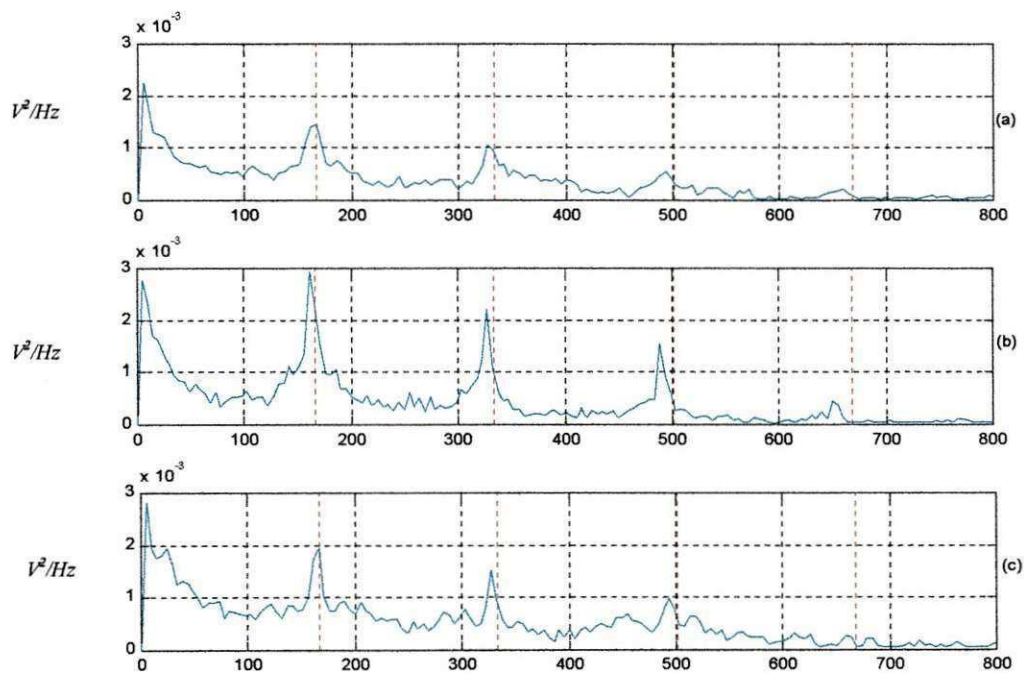


Figura 5.16 - Envelope dos sinais de vibração do rolamento de rolos com rotação 25 Hz carga 2000 N filtrado na região entre 2000 Hz e 3200 Hz (com severidade de defeito baixa (a), média (b) e alta (c))

Os espectros mostraram que a técnica do envelope permite a identificação clara da frequência característica do defeito, desde que aplicada em regiões de frequências adequadas (ex. 2000 a 3200 Hz).

Observou-se na análise espectral e no envelope do sinal que a escolha da região de frequência a ser analisada é muito importante pois foram mostrados resultados em que nenhuma das técnicas conseguiram identificar a frequência característica de defeito devido a uma escolha equivocada da faixa de frequência. Léporé e Bovi (1999) mostraram que a escolha conveniente de uma banda de frequência para aplicação da técnica de análise nas altas frequências na determinação de falhas em rolamentos permite um diagnóstico mais preciso do defeito

Comparando-se as duas técnicas aplicadas para as condições de rotação e regiões de frequência escolhidas acima, observa-se que ambas as técnicas identificaram bem a frequência característica de defeito, apresentando linhas espectrais bem evidentes e relacionadas com o defeito.

A análise espectral apresentou com um pouco mais de ruído que os espectros dos envelopes, entretanto isso não impediu a identificação do defeito. Essa vantagem com relação ao envelope era esperada pois no desenvolvimento da técnica do envelope parte do ruído do sinal é eliminado na filtragem deixando o espectro do envelope com menos ruído.

5.2.2 - Resultados com frequência de rotação do eixo 60 Hz

5.2.2.1 Sinais no domínio do tempo e da frequência

Os gráficos a seguir mostraram os resultados dos sinais de vibração gerados pelo defeito na pista externa do rolamento de rolos quando o mesmo está submetido a uma frequência de rotação de eixo de 60 Hz. O objetivo foi de analisar o efeito de uma frequência de rotação de eixo mais alta, para comparação das técnicas. Os parâmetros variáveis foram novamente carga e severidade do defeito.

A Figura 5.17 mostra os sinais de vibração no tempo para o rolamento sem defeito (a), e para o rolamento com defeito e graus de severidades baixa (b), média (c) e alta (d), submetido a uma carga de 1000 N. Nas Figuras 5.17(b), (c), (d) aparecem impactos sucessivos e igualmente espaçados devido a passagem dos rolos sobre a falha na pista. Verifica-se que os espaçamentos entre um impacto e outro são menores que os da Figura 5.1 pois nesse caso a frequência de rotação do eixo é maior que no caso anterior (item 5.2.1).

A Tabela 5.3 mostra os valores dos indicadores valor *RMS*, valor de pico, fator de crista e kurtose dos sinais de vibração apresentados na Figura 5.17. Os níveis são apresentados na ordem do grau de severidade de defeito, considerando como valor de referência o sinal de vibração sem defeito. Observa-se um crescimento dos indicadores a partir dos sinais sem defeito até com defeito e severidade média. Porém, no defeito com severidade alta, os valores dos indicadores diminuem.

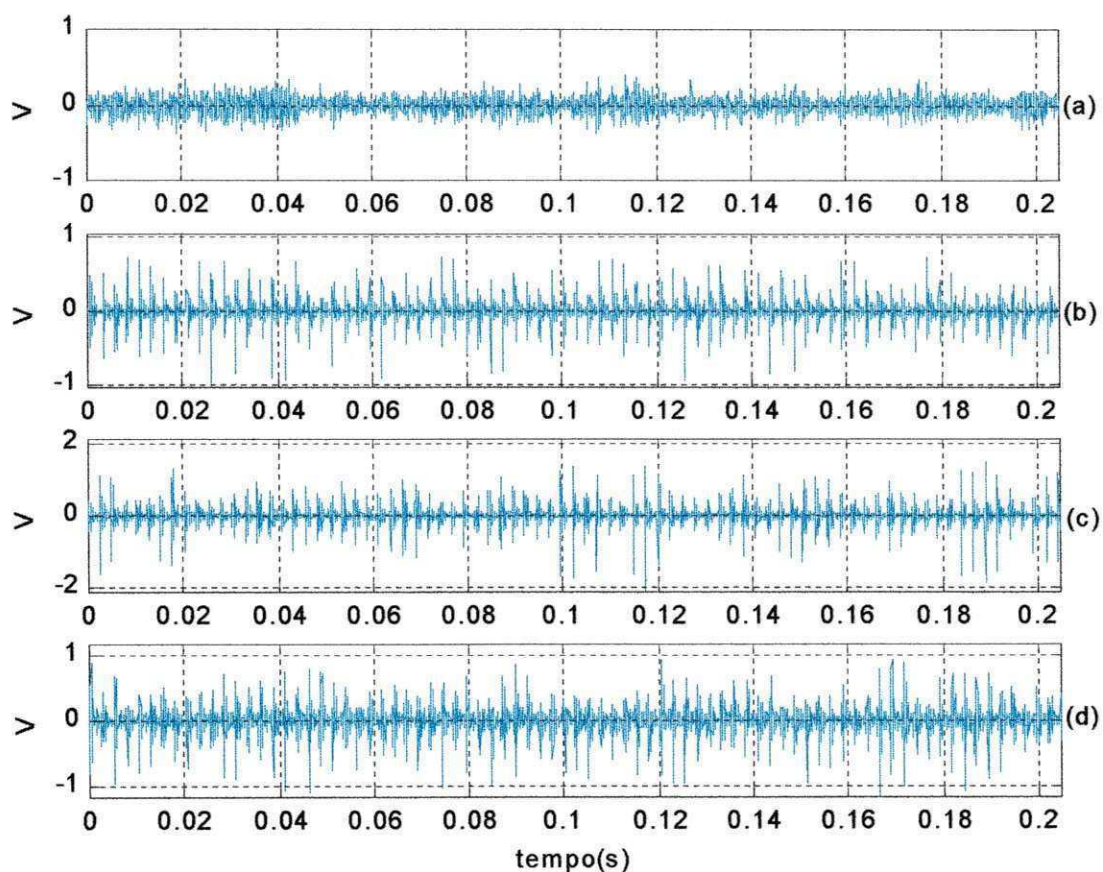


Figura 5.17 - Sinais de vibração do rolamento de rolos com rotação 60 Hz e carga 1000 N (sem defeito (a), com defeito e severidade baixa (b), média (c) e alta (d))

Tabela 5.3 - Níveis globais do sinal de vibração a 60 Hz, 1000 N

INDICADORES DEFEITO	Valor RMS <i>(V)</i>	Valor de Pico <i>(V)</i>	Fator de Crista	Kurtose
Sem Defeito	0,0983	0,4053	4,1253	3,7579
C/ Defeito Sev. Baixa	0,1445	1,0418	7,2083	11,1937
C/ Defeito Sev. Média	0,2518	2,1311	8,4651	13,3621
C/ Defeito Sev. Alta	0,1987	1,1881	5,9804	8,4115

As Figuras 5.18 e 5.19 mostram os valores da Tabela 5.3 em gráficos para melhor visualização e interpretação dos indicadores. Nas Figuras 5.18 e 5.19 são mostrados através de gráficos os indicadores valor pico, valor *RMS*, fator de crista e kurtose.

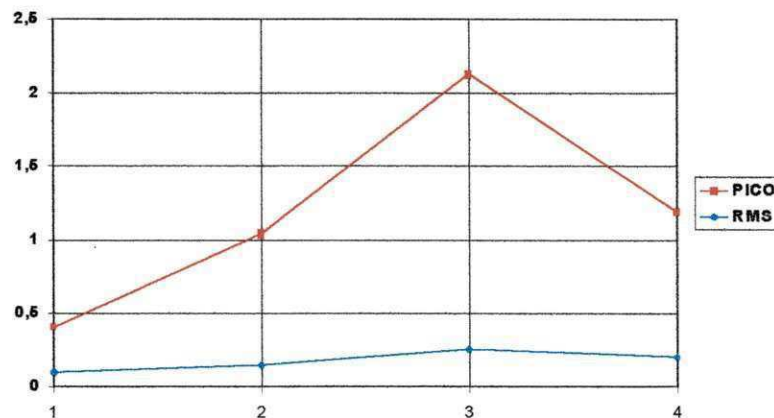


Figura 5.18 - Indicadores valor de pico e valor *RMS* dos sinais de vibração da Figura 5.17 (1=sem defeito, 2=severidade baixa, 3=severidade média, 4=severidade alta)

Observa-se nos gráficos da Figura 5.18 que os níveis dos indicadores crescem a medida que o defeito aumenta e decrescem quando o defeito tem grau de severidade alta. Verifica-se

também que o indicador valor de pico demonstra um aumento mais acentuado que os valores *RMS* com o crescimento da falha.

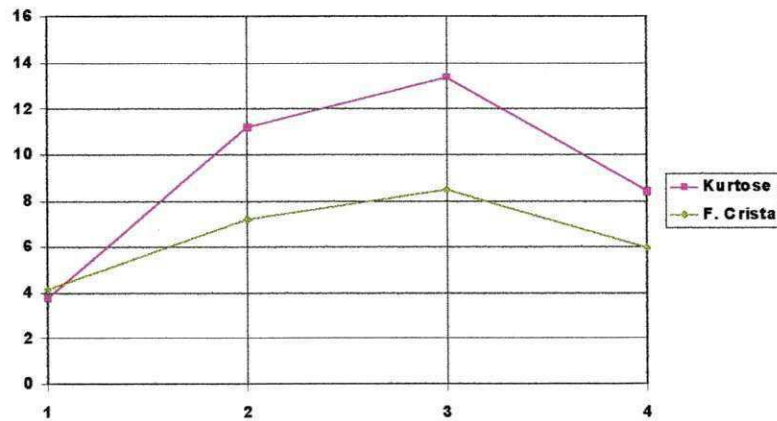


Figura 5.19 - Indicadores fator de crista e kurtose dos sinais de vibração da Figura 5.17 (1=sem defeito, 2=severidade baixa, 3=severidade média, 4=severidade alta)

A Figura 5.19 mostra os valores dos indicadores valor de crista e kurtose. Esses apresentam comportamento semelhante aos anteriores, com aumento até o defeito com grau de severidade média e diminuindo quando o defeito atinge o grau de severidade alta. Isso mostra que esses indicadores são sensíveis ao tipo de defeito existente no rolamento.

A Figura 5.20 apresenta os sinais de vibração no tempo para uma carga aplicada ao rolamento de teste de 2000 N. A Figura 5.20(a) mostra o sinal de vibração de um rolamento sem defeito, enquanto que as demais (b), (c) e (d) mostram os sinais de vibração com defeito e severidade baixa, média e alta respectivamente. Na Figura 5.20 visualiza-se claramente os impactos provocados pelos rolos ao passar pelo defeito. A diferença básica entre os sinais de vibração com graus de severidade de defeito são as amplitudes que parecem aumentar quando o defeito passa de baixa severidade para média severidade e diminuir quando o defeito passa de média para alta severidade.

A Tabela 5.4 apresenta os valores dos níveis globais valor *RMS*, valor de pico, fator de crista e kurtose de cada sinal da Figura 5.20. É possível observar que os indicadores valor *RMS*, valor de pico e kurtose aumentam a partir do sinal sem defeito até o sinal com defeito e grau de severidade média e decrescem com o defeito com grau de severidade alta. Já o fator de crista aumenta para todos os graus de severidades de defeito.

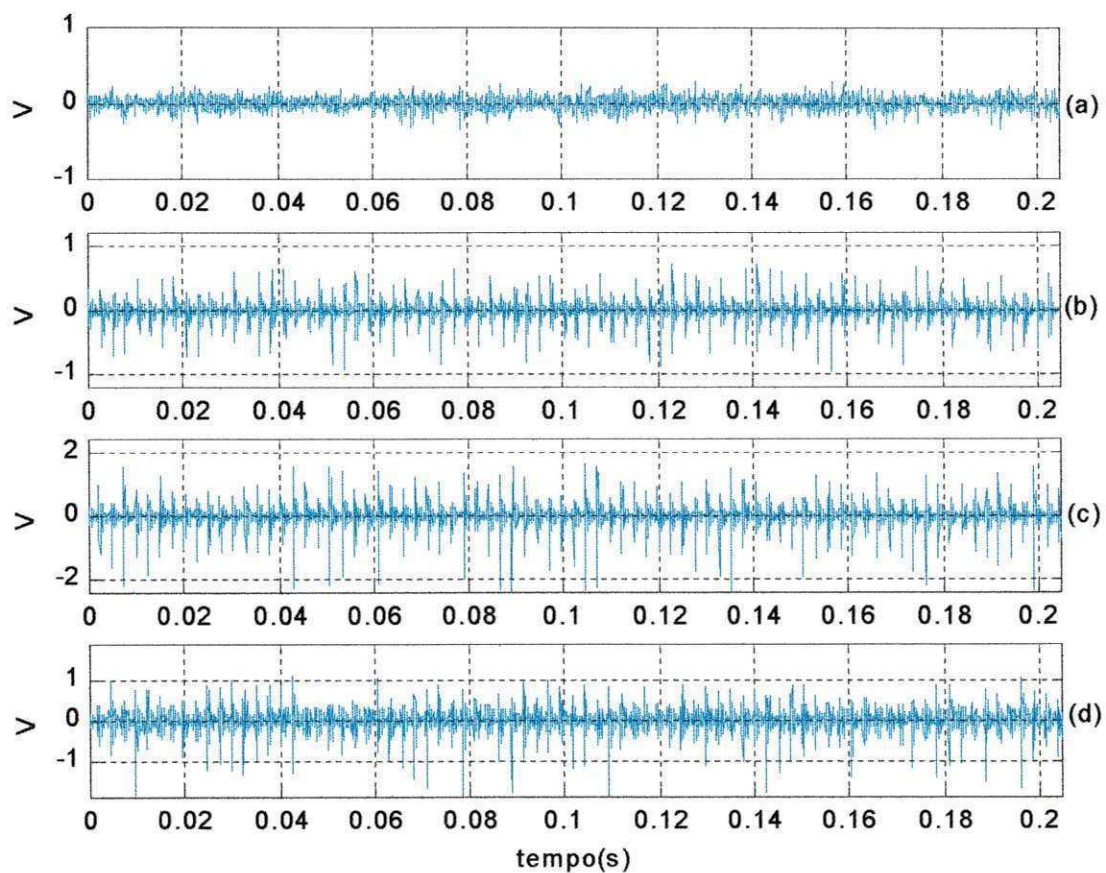


Figura 5.20 - Sinais de vibração do rolamento de rolos com rotação 60 Hz e carga 2000 N (sem defeito (a), com defeito e severidade baixa (b), média (c) e alta (d))

Tabela 5.4 - Níveis globais do sinal de vibração a 60 Hz, 2000 N

INDICADORES DEFEITO	Valor RMS (V)	Valor de Pico (V)	Fator de Crista	Kurtose
Sem Defeito	0,0804	0,3511	4,3662	3,5977
C/ Defeito Sev. Baixa	0,1403	0,9459	6,7413	11,1766
C/ Defeito Sev. Média	0,3380	2,4721	7,3146	14,3678
C/ Defeito Sev. Alta	0,2590	1,9258	7,4365	10,6315

As Figuras 5.21 e 5.22 apresentam os valores da Tabela 5.4 plotados para melhor visualização.

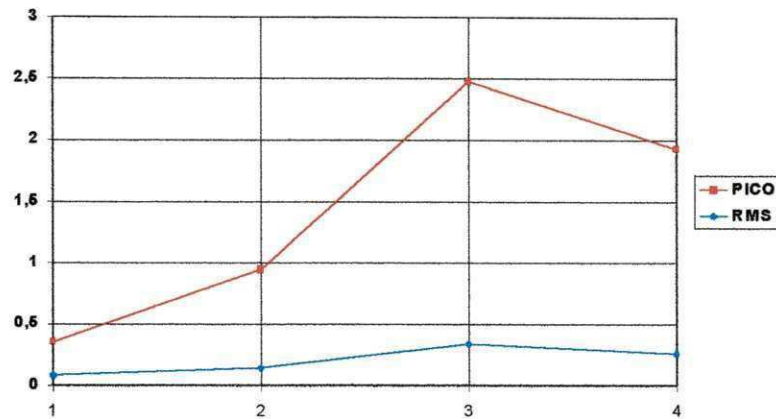


Figura 5.21 - Indicadores valor de pico e valor *RMS* dos sinais de vibração da Figura 5.20 (1=sem defeito, 2=severidade baixa, 3=severidade média, 4=severidade alta)

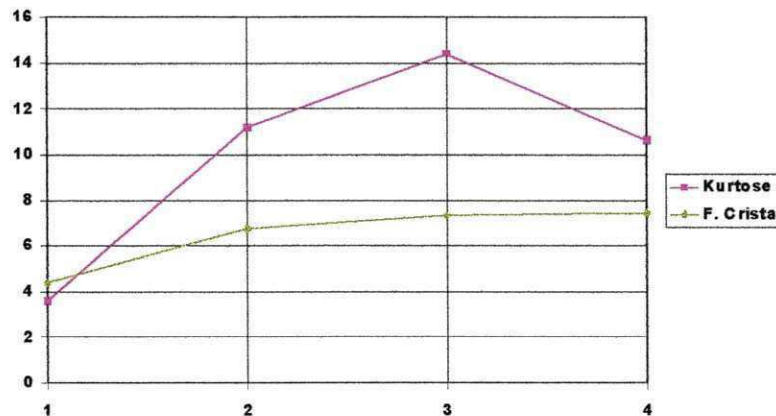


Figura 5.22 - Indicadores fator de crista e kurtose dos sinais de vibração da Figura 5.20 (1=sem defeito, 2=severidade baixa, 3=severidade média, 4=severidade alta)

A Figura 5.23 mostra o espectro de potência dos sinais de vibração para um rolamento de rolos sem defeito (a), com defeito e graus de severidades de defeito baixo (b), médio (c), alto (d), sobre carregamento de 1000 N e rotação de eixo 60 Hz. Semelhante aos espectros apresentados para os sinais com rotação de eixo 25 Hz, os sinais da Figura 5.23 mostram a assinatura do rolamento sem defeito e com três tipos de defeitos seguindo um grau de

severidade onde o sinal sem defeito será usado para ser comparado com os demais. Essa comparação indicará qual região do espectro de frequência foi mais ou menos excitada com o aparecimento do defeito. Além disso, o espectro sem defeito poderá mostrar algum desbalanceamento ou desalinhamento que possa existir no eixo. Caso existam, apareceram linhas espectrais na frequência de rotação do eixo ou em algumas de suas harmônicas.

Tomando-se a Figura 5.23(a) como referência e comparando-a com as demais observa-se que a Figura 5.23 (b) apresentou aumento de energia do sinal na região de frequência que começa desde 5800 Hz até 9000 Hz, aproximadamente. Nessa região é possível visualizar linhas espectrais com amplitudes discretas e aparentemente igualmente espaçadas. A Figura 5.23(c) mostra a região anterior também excitada, porém com linhas espectrais de amplitudes maiores. Além disso, mostra que o espectro teve aumento de energia desde 2000 Hz até 9000 Hz, aproximadamente. Por fim, a Figura 5.23(d) revela, que foi excitado na mesma região que os anteriores, com as amplitudes nas baixas frequências (entre 2200 Hz e 3400 Hz aproximadamente).

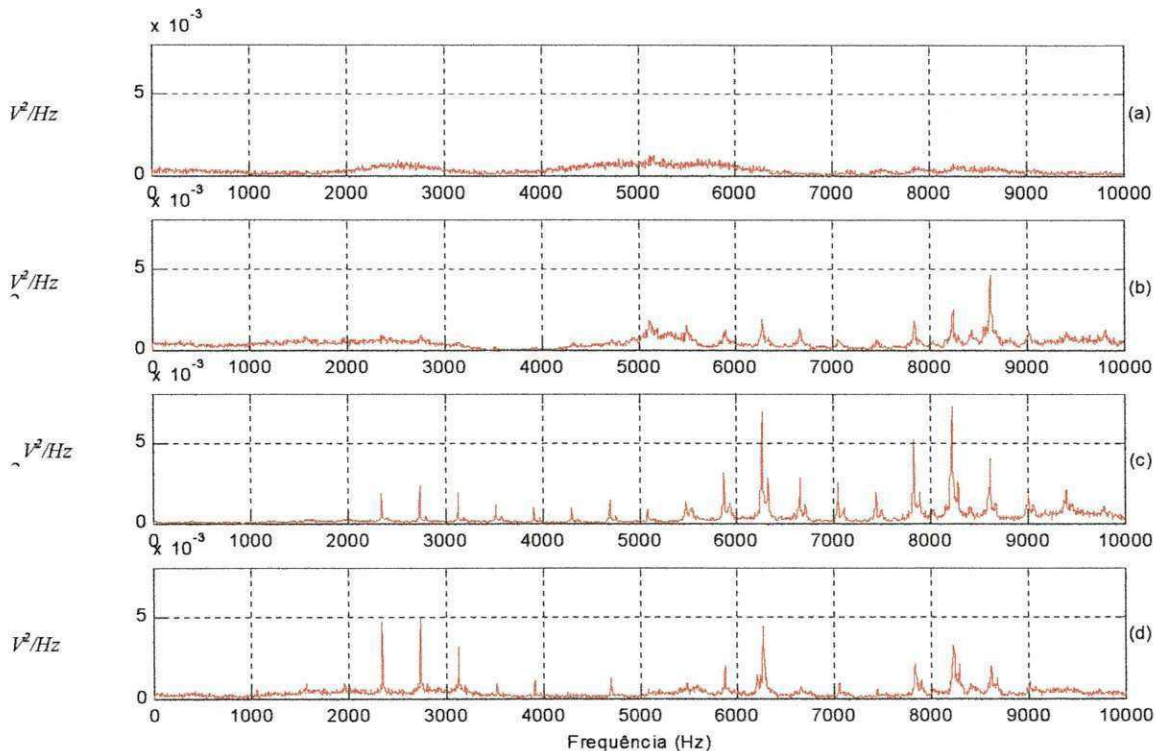


Figura 5.23 - Espectro do sinal de vibração do rolamento de rolos com rotação 60 Hz e carga 1000 N (sem defeito (a), com defeito e grau de severidade baixa (b), média (c), alta (d))

A Figura 5.24 mostra o espectro de potência dos sinais de vibração para um rolamento de rolos sem defeito (a), com defeito e graus de severidades de defeito baixo (b), médio (c), alto (d), sobre carregamento de 2000 N e rotação de eixo 60 Hz.

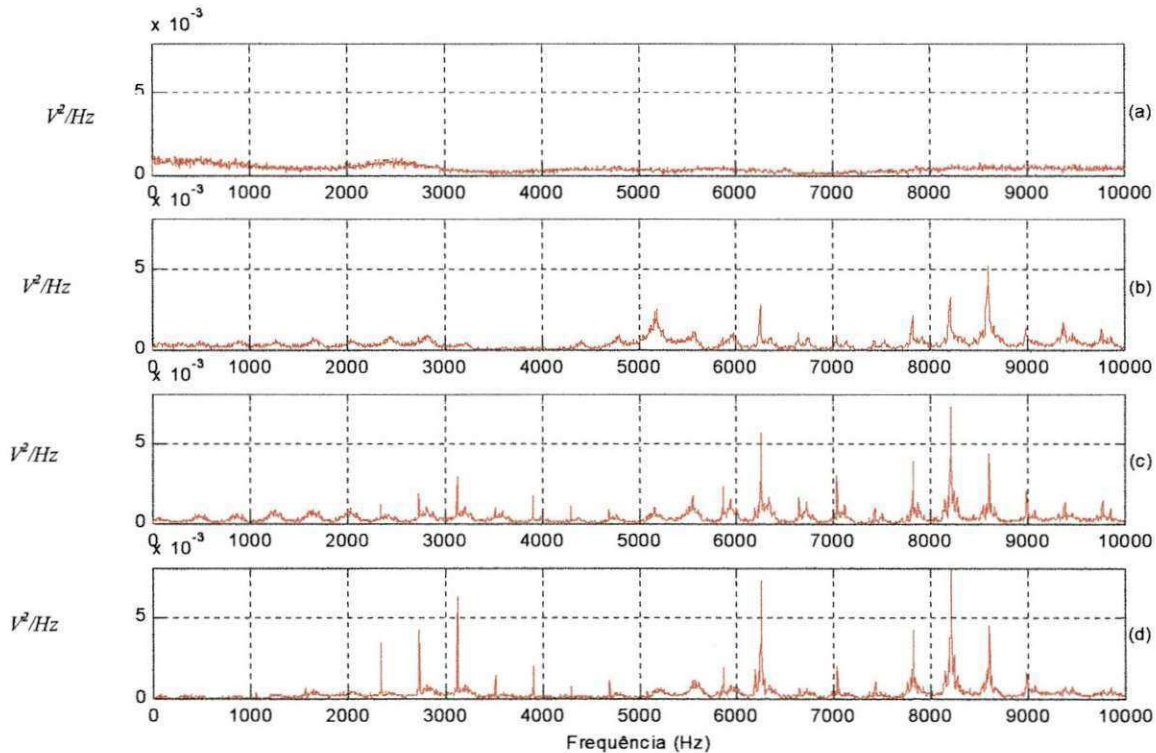


Figura 5.24 - Espectro do sinal de vibração do rolamento de rolos com rotação 60 Hz e carga 2000 N (sem defeito (a), com defeito e grau de severidade baixa (b), média (c), alta (d))

Analisando-se os espectros da Figura 5.24, observa-se que estes são semelhantes aos da Figura 5.23, não mostrando diferenças sensíveis para as duas condições testadas de carregamento.

Comparando-se os espectros dos sinais de vibração com rotação de eixo 60 Hz com os espectros dos sinais de vibração com rotação de eixo 25 Hz, nota-se que quando aumenta-se a frequência de rotação do eixo as frequências naturais mais altas da estrutura (bancada) são mais excitadas, e devido à maior separação entre linhas espectrais características do defeito estas se apresentam de forma mais discreta e visíveis.

5.2.2.2 - Aplicação do zoom nos espectros de frequência

Como visto anteriormente, o zoom é aplicado as regiões mais excitadas do espectro de potência do sinal de vibração na intenção de melhorar visualmente a identificação das frequências que se relacionem com o defeito.

A frequência característica de defeito calculada da equação 3.23 no capítulo 3 para rotação de 60 Hz, considerando as características do rolamento relacionadas na Tabela 4.3 no capítulo 4 é de aproximadamente 402 Hz. Nos gráficos apresentados a seguir as linhas espectrais referentes ao defeito apresentam um distanciamento de aproximadamente 391 Hz. A diferença entre o valor calculado e o valor encontrado nos ensaios pode estar relacionada com diversos fatores de cálculo ou de ensaios. Como exemplo, tomando-se 59 Hz como rotação de eixo e calculando-se a frequência característica de defeito encontra-se um valor 391 Hz, coincidindo com o que foi mostrado no espectro. Isso significa que se o medidor de velocidade (tacômetro) tiver uma tolerância de 1,7% para medida dessa rotação de eixo, pode ocorrer essa diferença. Outro fator importante é que no cálculo não é levado em consideração efeitos como deslizamento de rolos, deformação de rolos e de pistas que podem afastar a frequência característica de defeito do valor medido. Outros fatores como desbalanceamento, desalinhamento, podem fazer aparecer componentes de cargas no sentido axial do eixo, modificando também o valor da frequência característica do defeito medido.

Dos espectros escolheu-se as regiões de frequências para análise de 2200 Hz a 3400 Hz e 7600 Hz a 8800 Hz. A primeira é próxima da região analisada com rotação de eixo 25 Hz.

As Figuras 5.25 e 5.26 mostram os espectros de frequência com o zoom para a região de frequência entre 2200 Hz e 3400 Hz e sinais de vibração mecânica com defeito e graus de severidades baixa (a), média (b) e alta (c) e carregamentos 1000 N e 2000 N, respectivamente.

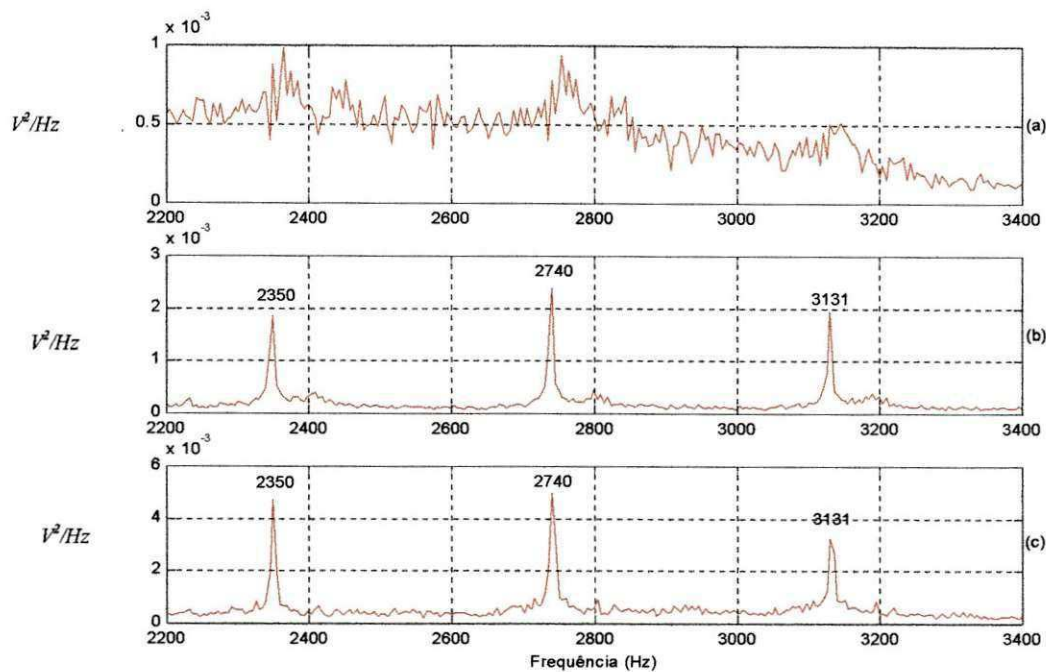


Figura 5.25 - Zoom nos espectros de frequências dos sinais de vibração do rolamento de rolos com rotação 60 Hz e carga 1000 N (com defeito e grau de severidade baixa (a), média (b) alta (c))

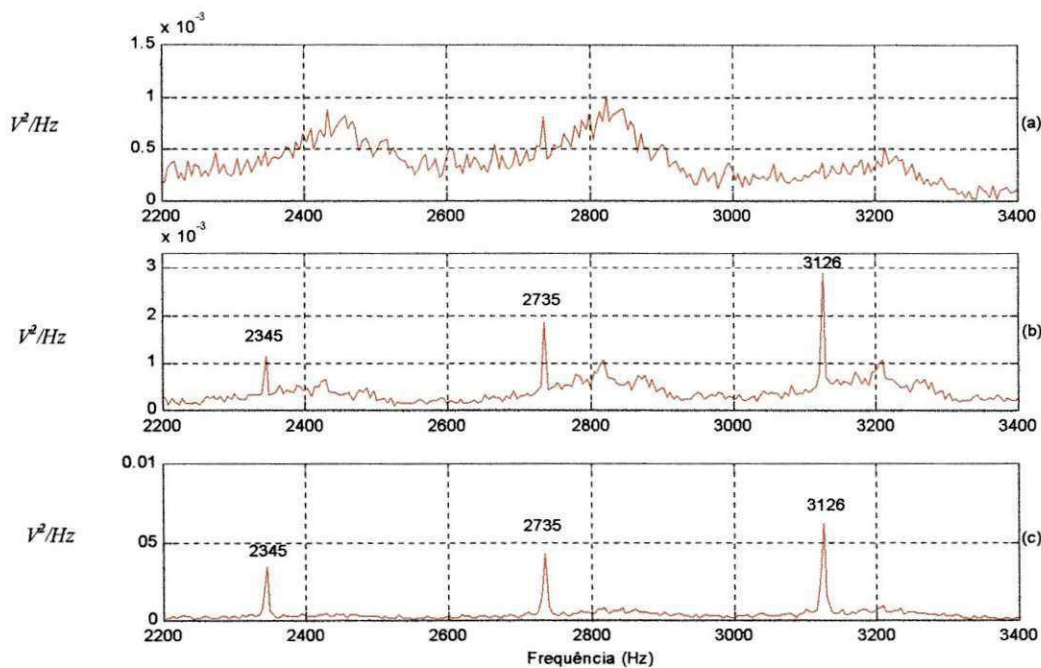


Figura 5.26 - Zoom nos espectros de frequências dos sinais de vibração do rolamento de rolos com rotação 60 Hz e carga 2000 N (com defeito e grau de severidade baixa (a), média (b), alta (c))

Os espectros de frequência para os sinais com defeito e graus de severidade média (b) e alta (c) das Figuras 5.25 e 5.26 apresentam claramente linhas espectrais bem evidentes espaçadas da frequência característica de defeito (391 Hz aproximadamente). Já os espectros (a) das mesmas figuras onde o defeito tem grau de severidade baixa não mostram evidências de defeito ou escondem as frequências que estão relacionadas com o defeito devido o ruído ter níveis mais elevados que o sinal.

As Figuras 5.27 e 5.28 mostram os espectros de frequências dos sinais de vibração com defeito e graus de severidades de defeito baixo (a), médio (b) e alto (c), para região de frequência entre 7600 e 8800 Hz com carregamentos de 1000 N e 2000 N respectivamente e rotação do eixo 60 Hz.

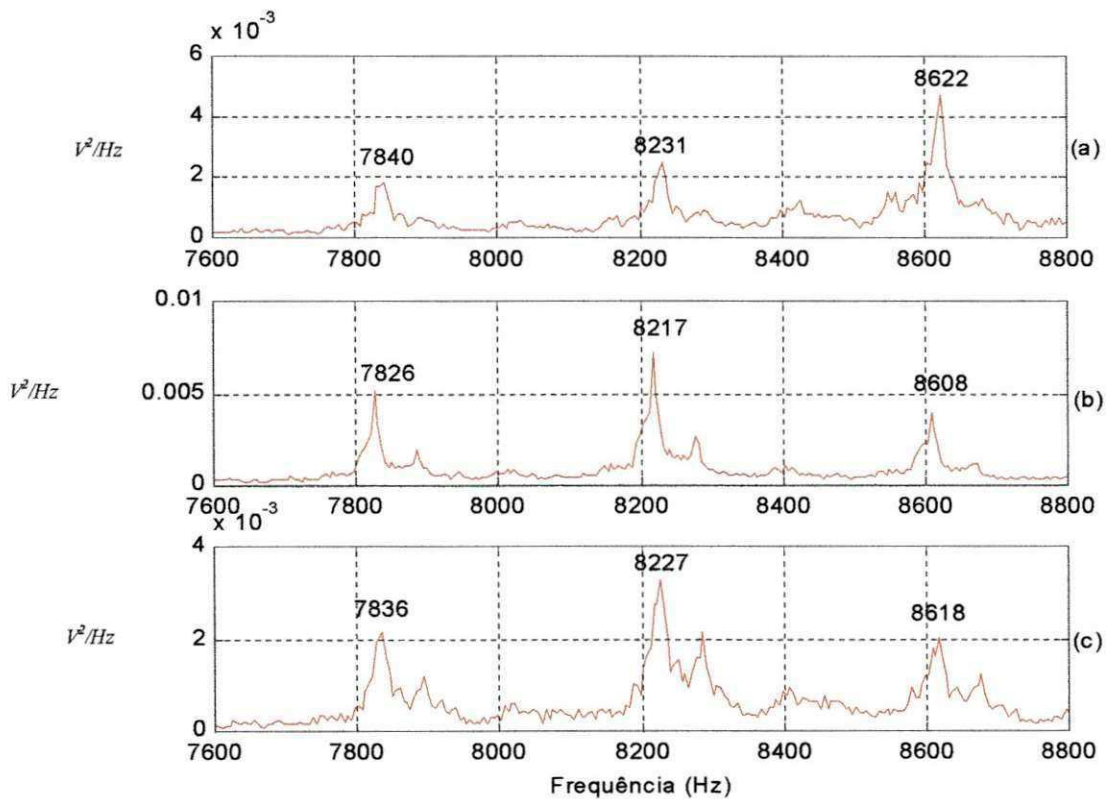


Figura 5.27 - Zoom nos espectros de frequências dos sinal de vibração do rolamento de rolos com rotação 60 Hz e carga 1000 N (com defeito e grau de severidade baixa (a), média (b), alta (c))

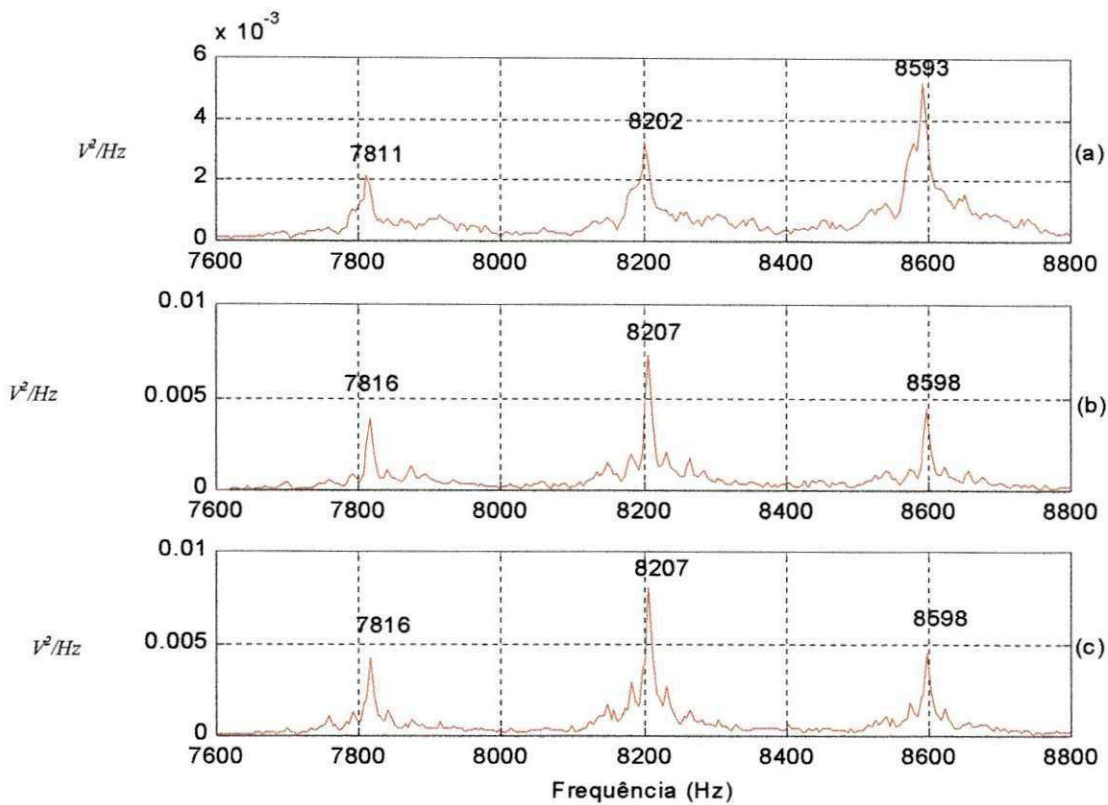


Figura 5.28 - Zoom nos espectros de frequências dos sinal de vibração do rolamento de rolos com rotação 60 Hz e carga 2000 N (com defeito e grau de severidade baixa (a), média (b), alta (c))

A região de frequência entre 7600 Hz e 8800 Hz mostrou-se muito boa para aplicação do zoom pois em todos os espectros das Figuras 5.27 e 5.28 apareceram linhas espectrais espaçadas da frequência característica do defeito.

5.2.2.3 - Aplicação da técnica do Envelope

As figuras a seguir mostram a técnica do envelope sendo aplicada as regiões de frequência que foram mais excitadas pelo defeito e escolhidas na análise espectral sendo utilizada para identificação da frequência característica de defeito. As linhas verticais vermelhas localizam nos gráficos a frequência característica do defeito e suas harmônicas calculadas.

A Figura 5.29 apresenta a técnica do envelope aplicada ao sinal de vibração filtrado na região de frequência entre 2200 Hz e 3400 Hz do sinal de vibração do rolamento com defeito e severidade baixa (a), média (b) e alta (c) respectivamente, com eixo girando a 60 Hz e carregamento 1000 N no rolamento de teste.

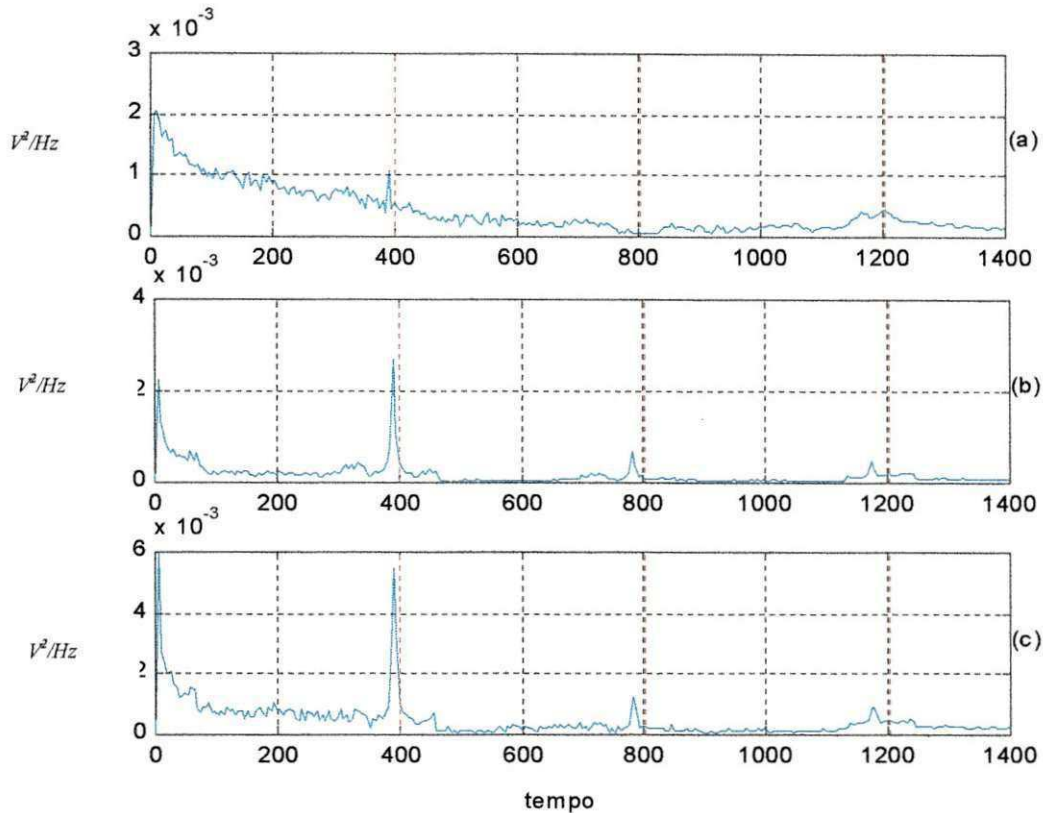


Figura 5.29 - Envelope dos sinais de vibração do rolamento de rolos com rotação 60 Hz carga 1000 N filtrado na região entre 2200 Hz e 3400 Hz (com severidade de defeito baixa (a), média (b) e alta (c))

Os espectros apresentam linhas demoduladas do espectro geral do sinal de vibração que coincidem com a frequência característica do defeito, identificando o defeito na pista externa do rolamento de rolos.

No espectro da Figura 5.29(a) a frequência característica de defeito aparece de forma pouco evidente, podendo até ser confundida com ruído. Já os outros espectros da mesma figura, além da frequência fundamental, apresentam linhas espectrais próxima da 1ª e 2ª harmônica da frequências característica de defeito. Observa-se também que com o

crescimento do defeito as amplitudes das linhas espectrais referentes a frequência de defeito aumentam também.

A Figura 5.30 mostra a técnica do envelope aplicada ao sinal de vibração filtrado na região de frequência entre 2200 Hz e 3400 Hz do sinal de vibração do rolamento com defeito e severidade baixa, média, alta respectivamente, com eixo girando a 60 Hz e carregamento 2000 N no rolamento de teste.

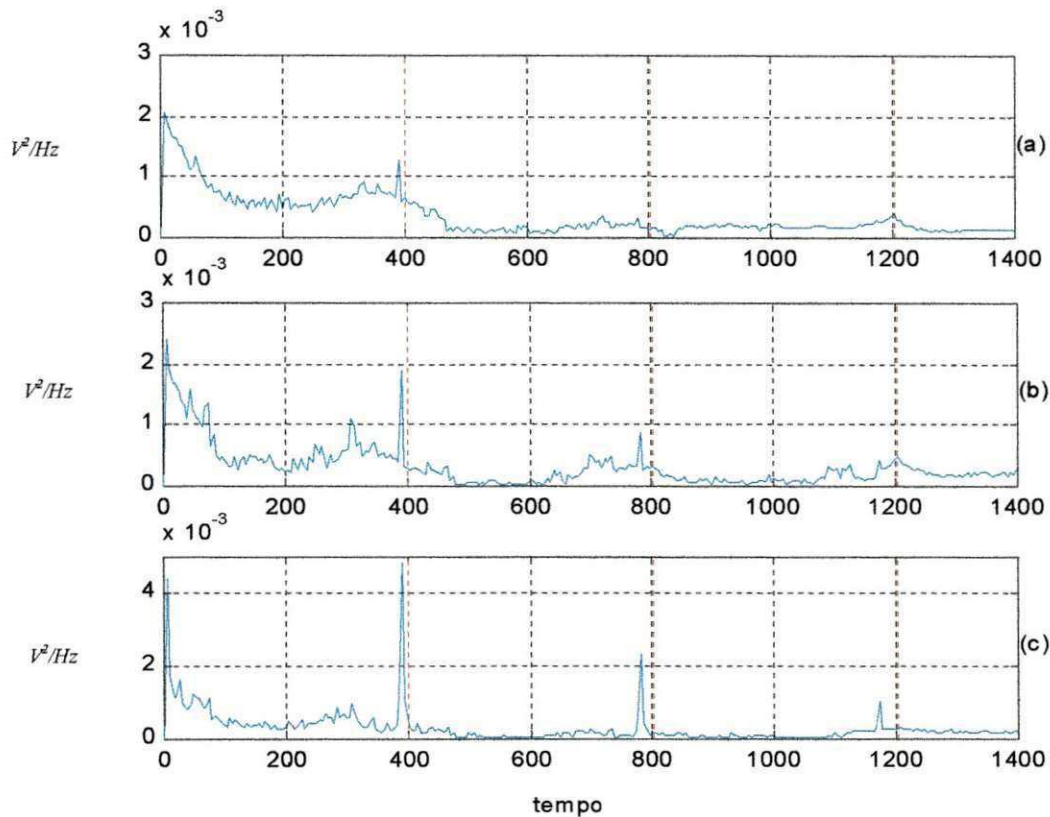


Figura 5.30 - Envelope dos sinais de vibração do rolamento de rolos com rotação 60 Hz carga 2000 N filtrado na região entre 2200 Hz e 3400 Hz (com severidade de defeito baixa (a), média (b) e alta (c))

A Figura 5.30(a) mostra que, para o defeito com grau de severidade baixa a frequência característica do defeito aparece de forma isolada e com pequena amplitude. Já na Figura 5.30(b) e (c) aparecem linhas espectrais bem evidentes na frequência característica do defeito e em duas frequências múltiplas associadas a 1ª e 2ª harmônica.

A Figura 5.31 mostra os espectros do envelope dos sinais de vibração filtrado na região entre 7600 Hz e 8800 Hz com defeito e graus de severidades baixo (a), médio (b) e alto (c) girando a uma rotação de 60 Hz com carregamentos de 1000 N .

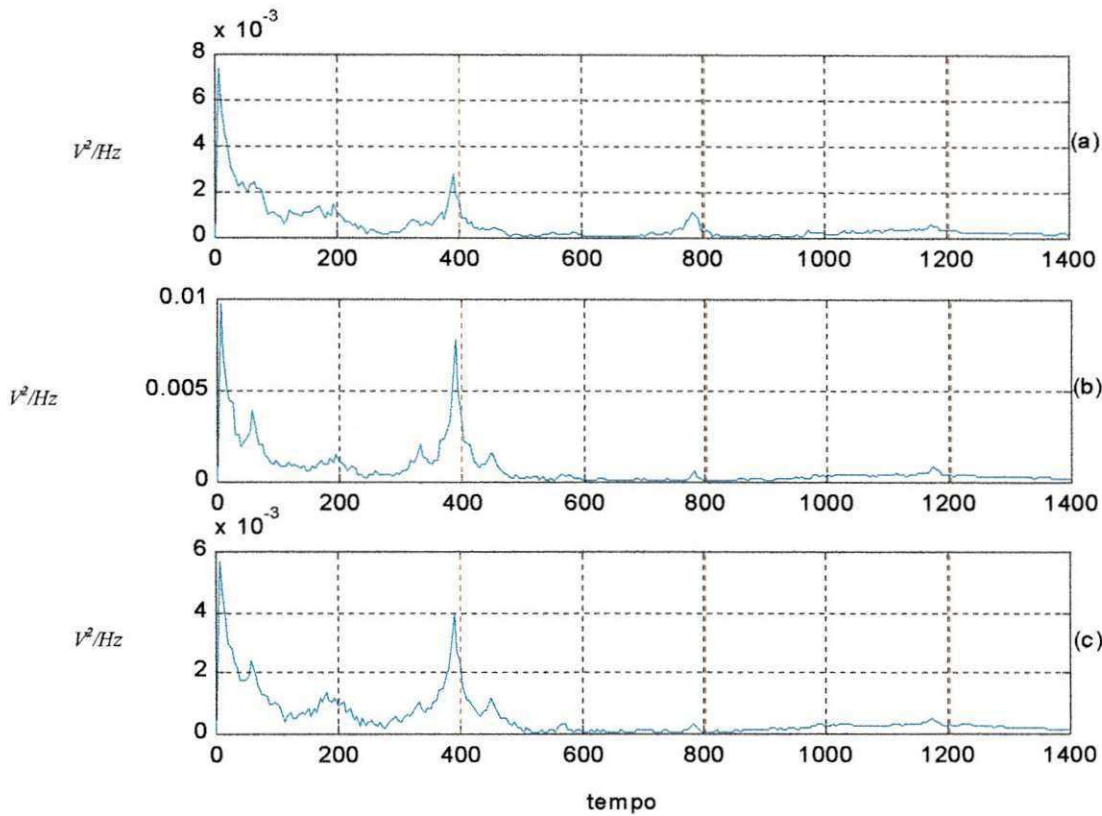


Figura 5.31 - Envelope dos sinais de vibração do rolamento de rolos com rotação 60 Hz carga 1000 N filtrado na região entre 7600 Hz e 8800 Hz (com severidade de defeito baixa (a), média (b) e alta (c))

A Figura 5.32 mostra os espectros do envelope dos sinais de vibração filtrado na região entre 7600 Hz e 8800 Hz com defeito e graus de severidades baixo (a), médio (b) e alto (c) girando a uma rotação de 60 Hz com carregamentos de 2000 N .

Analisando espectros de frequências das Figuras 5.31 e 5.32, obtem-se uma linhas espectrais mais evidente na frequência característica de defeito que identificam os defeitos com graus de severidade baixa (a), média (b) e alta (c).

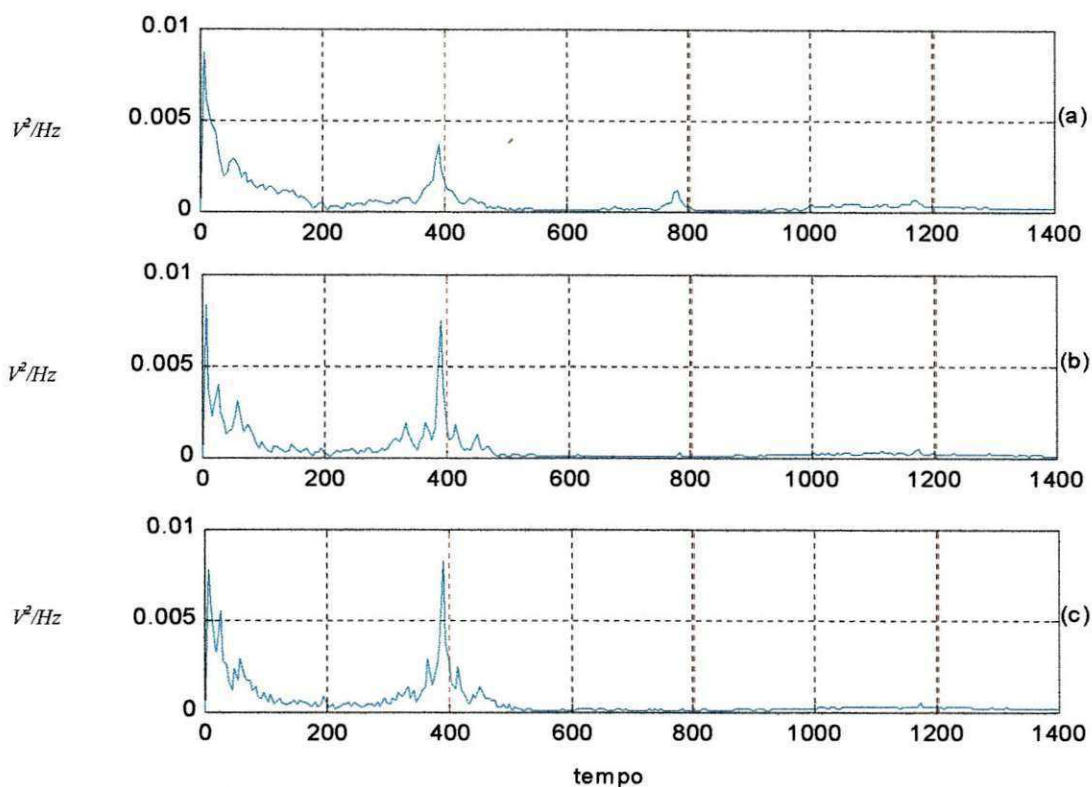


Figura 5.32 - Envelope dos sinais de vibração do rolamento de rolos com rotação 60 Hz carga 2000 N filtrado na região entre 7600 Hz e 8800 Hz (com severidade de defeito baixa (a), média (b) e alta (c))

Observa-se que utilizando-se a técnica do envelope foi possível identificar as frequências característica do defeito na pista externa do rolamento, especialmente quando escolhe-se faixas de filtragem adequada (ex. 7600 a 8800 Hz).

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1 Comentários

Os indicadores de níveis globais apresentados mostraram-se, para a maioria dos casos, coerentes com os resultados encontrados na literatura. Os valores de pico e *RMS* quase sempre cresceram com o aumento da falha e decresceram com a falha mais grave. O fator de crista acompanhou o comportamento dos indicadores anteriores. Porém, a kurtose apresentou valores não esperados quando o sinal de vibração era de um rolamento sem defeito. Segundo Pachaud (1997), na prática, a kurtose como um indicador de defeitos induzidos por choques é capaz de identificar um defeito quando seu valor é maior ou igual a 3,5. Silva (1999) comprovou essa afirmação calculando a kurtose dos sinais de vibração mecânica de rolamentos de esferas. Os valores apresentados nesse trabalho desse indicador foram sempre maiores que 3,5 para o sinal de vibração do rolamento de rolos sem defeito. Isso levaria a acreditar que já existia o defeito no rolamento. Entretanto, analisando-se o sinal de vibração do rolamento sem defeito através das análises espectral e envelope, não foram encontradas frequências no espectro que caracterizavam algum defeito existente no rolamento. Diante disso acredita-se que não necessariamente um rolamento apresentará defeito quando a kurtose for maior que 3,5. Tendo em vista o objetivo deste trabalho não foi estudar os indicadores de níveis globais, não foi aprofundado o estudo no sentido de descobrir porque os valores da

kurtose estavam um pouco acima do que era esperado. Mas, para garantir a credibilidade dos ensaios e da bancada de testes, o rolamento de rolos foi substituído por um rolamento de esferas e com esse último foram encontrados valores para kurtose de no máximo 3,57, coerentes com a literatura.

Tanto a técnica de análise espectral quanto a técnica do envelope mostraram-se capazes de identificar o defeito na pista externa do rolamento de rolos, evidenciando com linhas espectrais a frequência característica do defeito para as duas rotações 25 Hz e 60 Hz. A técnica do envelope apresentou a frequência característica do defeito com uma linha espectral e algumas vezes frequências múltiplas da frequência de defeito. Isso facilita a identificação da falha. Já com a técnica de análise espectral encontrou-se a frequência característica de defeito através da diferença entre linhas espectrais sucessivas nas regiões que foram excitadas pela presença do defeito.

A técnica do envelope comprovou bem os resultados esperados, porém foi necessário implementar uma rotina de programação para encontrar o envelope do sinal. Isso requer um pouco mais de tempo de processamento de dados e conhecimento específico da técnica. A análise espectral é bem mais simples de ser implementada, basta que seja expandida a região de frequência desejada. Considerando que muitos equipamentos dedicados a análise de sinais de vibração atualmente implementam automaticamente a técnica do envelope está seria mais uma opção para análise.

6.2 Conclusões

De acordo com os resultados encontrados, conclui-se que a partir dos sinais de vibração mecânica é possível identificar e caracterizar o defeito na pista externa do rolamento de rolos para todas as situações de rotação, carregamento e grau de severidade de defeito ao qual foi submetido os ensaios em bancada

Analisando-se os aspectos de variação da rotação do eixo, observou-se que com a presença do defeito as regiões de altas frequência nos espectros dos sinais de vibração, para uma rotação mais alta, são mais excitadas. E, naturalmente, para rotações de eixo mais baixas

as regiões mais excitadas são as de médias frequências. Notou-se também que as regiões excitadas com rotação de eixo maior (60 Hz) tinham amplitudes maiores que com rotação menor (25 Hz) e conseqüentemente melhor relação sinal-ruído.

A variação de carregamento não resultou em mudanças consideráveis nos espectros dos sinais de vibração. Dessa forma não foi possível concluir, com esses ensaios, qual a influência que o aumento de carga apresentaria no espectro de potência do sinal. Provavelmente seria necessário aplicar carregamentos maiores para que fosse observado esta influência.

Com o aumento do grau de severidade de defeito observou-se que aparecem mais regiões de frequências excitadas no sentido das altas para as baixas frequências. As amplitudes nas baixas frequências começam a crescer enquanto que nas regiões de frequências mais altas as amplitudes decrescem.

Observando as técnicas de análise aplicadas notou-se que tanto com a técnica de análise espectral como com a técnica do Envelope foi possível identificar e caracterizar a falha na pista externa do rolamento para as três situações de graus de severidades de defeito.

A técnica de análise espectral apresentou maior facilidade na sua obtenção. Entretanto, observa-se que as linhas espectrais na região escolhida nem sempre são bem visíveis e poderão confundir a identificação da frequência de defeito devido o ruído presente no sinal.

A técnica do envelope embora exija um pouco mais de conhecimento para sua implementação e requeira mais tempo para processamento dos dados, apresentou menor sensibilidade ao ruído. Pois como a técnica faz a demodulação de um sinal tendo como base uma frequência central essa apresentará no seu espectro apenas as frequências que excitaram a frequência central e o ruído existente na mesma.

6.3 Sugestões

Estudo sobre os indicadores de níveis globais comparando sinais de vibração de rolamentos de esferas com sinais de vibração de rolamentos de rolos.

Estudo sobre a influência do ruído introduzido por outras fontes na identificação da falha em rolamentos utilizando as técnicas apresentadas.

Estudo sobre a influência de falhas combinadas, em diferentes componentes do rolamento, na identificação de cada uma delas.

Estudo comparativo entre defeitos introduzidos artificialmente e defeitos provocados por desgaste e fadiga no ambiente natural de funcionamento do rolamento.

Estudo da técnica do Zoom Real com resoluções espectrais variadas

Estudo sobre aplicação de outras técnicas de análise que possam identificar o defeito em rolamento de rolos (ex: tempo-frequência, wavelets, etc.) .

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLAN, R. K. **Rolling Bearings**. London: Sir. Isaac Pitman & Sons Ltd., 1954, 401 p.

ALVES, M. A. O.; LIMA, A. C. C. Diagnóstico de Severidade em máquinas rotativas utilizando-se redes neurais. In: XII Brazilian Automatic Conference, 5, 1998, Uberlândia. **Proceedings...** Uberlândia, 1998.

ÂNGELO, M. **Vibration Monitoring of Machines - Technical Review**. Brüel & Kjaer, Naerum, n. 1, p 1-36, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISSO 9002: Sistema da Qualidade - Modelo para garantia da qualidade em produção e instalação e serviços associados**. São Paulo, SP, 1998, 30 p.

BRAUN S. **Mechanical Signature Analysis - Theory and practice**. London, 1986.

BRÜEL & KJAER. **Machine Diagnosis**. Schenck. Condition Monitoring Systems :Manual. 298 p. Seminar C 40 e, 2001.

ESTUPIÑAN, E.; SAAVEDRA, P. Técnicas de Diagnostico para el analisis de vibraciones de rodamientos. In: 9º Congreso Chileno de Ingeniería Mecánica / IV Congreso Nacional de Energía (COCIM/CONAE), 7, 2000, Chile. **Proceedings...** Concepción, 2000, CD-ROM.

GERGES, N. Y. S.; NUNES, A. C. M. Diagnóstico dos defeitos em rolamentos por medições de vibrações. In 13º Congresso Chileno de Ingeniería Mecánica / XIII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, 1996, Chile.

GOMES, A. T. **Telecomunicações: Transmissão e recepção AM-FM: Sistemas Pulsados.** São Paulo: Érica, 1985, 457 p.

GUIMARÃES, T. A.; DUARTE, M. A. V. Detecção de Falhas em caixas de câmbio via análise tempo-frequência de sinais de vibração. In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM), 9, 2000, Natal. **Proceedings...** Natal: UFRN, 2000. CD-ROM.

HANSELMAN, D.; LITTLEFIELD, B. **MATLAB 5 - Guia do usuário - Versão do estudante.** São Paulo: MAKRON Books do Brasil Editora Ltda., 1999, 413 p.

HARRIS, T. A; **Rolling Bearing Analysis.** New York: John Wiley and Sons, 1966, p.146-150.

ISO9002

HAYKIN, S; VEEN, B. V. **Sinais e Sistemas.** Porto Alegre: Bookman, 2001, 659 p.

LÉPORE, F. P. N.; BOVI, H. Análises das Bandas de altas frequências utilizadas na detecção de defeitos em rolamentos. In: XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica (COBEM), 8, 1999, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo, 1999, CD-ROM.

LÉPORE, F. P. N.; SANTOS, M. B.; BOVI, H. Estudo comparativo entre o método de detecção de Envelopes e o uso e Wavelets para avaliação das condições de operação de rolamentos. In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM), 9, 2000, Natal. **Proceedings...** Natal: UFRN, 2000. CD-ROM.

MARRA, J. L. Medida de Vibração – Uma ferramenta para a manutenção, In: Feira Internacional da Mecânica, 16, 2000. São Paulo. São Paulo, Stand TEKNIKAO, 2000.

MARTIN, H. R. Statistical moment analysis as a means of surface damage detection. Imac - International Modal Analysis Conference, 1989. - vol II

McCONNELL, K. G. **Vibration Testing - Theory and Practice**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1995, 606 p.

NATIONAL INSTRUMENT (United States). **LabVIEW Data Acquisition Basics Manual - United States**: Manual. United States, 1998. 29 capítulos.

NATIONAL INSTRUMENT (United States). **LabVIEW User Manual - United States**: Manual. United States, 1998. 29 capítulos.

NATIONAL INSTRUMENT (United States). **LabVIEW Function and VI Reference Manual - United States**: Manual. United States, 1998. 53 capítulos.

NSK DO BRASIL INDÚSTRIA E COMÉRCIO DE ROLAMENTOS LTDA (São Paulo, SP). - **NSK Rolamentos S. Paulo**: catálogo. São Paulo, 2000. 535 p.

NUNES, M. A. C. **Diagnóstico de defeitos em rolamentos pela Técnica do Envelope**. 1989. 110 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

OLIVEIRA, M. E. Redes neurais artificiais. Disponível em: <<http://geocities.com/CapeCanaveral/Runway/4303/index2.html>>. Acesso em: 05 mai. 2001.

PACHAUD, C.; SALVETAT, R.; FRAY, C. Crest factor and Kurtosis contributions to identify defects inducing periodical impulsive forces. **Mechanical Systems and Signal Processing**, p. 903-916, Jun 1997.

PADOVESE, L. R. Comparison between probabilistic and multilayer perceptron neural networks for rolling bearing fault classification. P. 1- 14, 2000.

RUSH, A. A. Kurtosis a crystal ball for maintenance engineers. Iron and Steel International, p 23 - 27, 1997.

SHIGLEY, J. E. **Elementos de máquinas**. 2v. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 1984, 690 p.

SILVA A. A.; MUCHERONI, M. F. Monitoramento de condição de rolamentos através da análise conjunta Tempo-Frequência de sinais de Vibração. In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM), 9, 2000, Natal. **Proceedings...** Natal: UFRN, 2000. CD-ROM.

SILVA, A. A. **Deteccção e análise dinâmica de falhas em rolamentos**. 1999. 208 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

SILVA, A. A.; SOUTO, C. R. Métodos de detección y análisis de señales de las vibraciones utilizando factor de cresta y curtose para defectos em los rodamientos. In: 9º Congreso Chileno de Ingeniería Mecánica (COCIN), 5, 2000, Valparaíso - Chile. **Proceedings...** Universidad Técnica Federico Santa Maria, 2000, CD-ROM.

VARGAS, R. T. **Um estudo experimental sobre deteção e diagnóstico de falha em rolamento por medição e análise de sinais acústicos e vibratórios**. 1996. 175 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

ANEXOS

ANEXO A - Unidades de medidas para vibração mecânica

Três tipos de unidades de medidas são comumente utilizadas para vibrações mecânicas

Deslocamento (s)

É a divergência medida de um ponto da sua posição inicial. A unidade de medida é mm.

Velocidade (v)

É a velocidade com que um ponto se move de posição na sua trajetória. A unidade de medida é mm/s.

Aceleração (a)

É a aceleração com que um ponto se move de posição na sua trajetória. A unidade de medida é m/s^2 ou g.

Tabela 1.A - Tabela de conversão de deslocamento, velocidade e aceleração

Conversão	Deslocamento s (mm)	Velocidade v (mm/s)	Aceleração a (m/s^2)
Deslocamento $s =$	1	v/w	a/w^2
Velocidade $v =$	$s * w$	1	a/w
Aceleração $a =$	$s * w^2$	$v * w$	1

Fonte: Bruel & Kjaer (2001)

ANEXO B - Definições [Haykin e Veen, 2001]

Sinal periódico

Diz-se que um sinal $x(t)$ é periódico se $x(t) = x(t + T)$ para todo t em que T é uma constante positiva.

Sinal não periódico

Diz-se que um sinal $x(t)$ não é periódico quando não houver nenhum T que satisfaça a equação $x(t) = x(t + T)$.

Função par

Diz-se que uma função contínua é par se $x(-t) = x(t)$ par todo t .

Função ímpar

Diz-se que uma função contínua é ímpar se $x(-t) = -x(t)$ par todo t .

ANEXO C - Teoremas

Teorema de Nyquist

$$f_a > 2f_{\max}$$

onde: f_a = frequência de amostragem

f_{\max} = frequência máxima do sinal

Resolução espectral

$$\Delta f = \frac{1}{D}$$

ou

$$D = \frac{(N-1)}{f_a}$$

onde: Δf = relação espectral

N = número de pontos

Resolução frequencial

$$d_f = \frac{f_a}{N-1}$$