

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL - UFRGS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA,
DE MINAS E DOS MATERIAIS - PPGEM

TESE

apresentada ao PPGEM

para a obtenção do título de

DOUTOR EM ENGENHARIA

por

RUI FRANCISCO MARTINS MARÇAL, M. Sc.

**UM MÉTODO PARA DETECTAR FALHAS INCIPIENTES EM
MÁQUINAS ROTATIVAS BASEADO EM
ANÁLISE DE VIBRAÇÕES E LÓGICA *FUZZY***

Banca Examinadora:

Presidente e Orientador:

Prof. Dr. ALTAMIRO AMADEU SUSIN - PPGEM-CPGEE, UFRGS

Membros da Banca:

Prof. Dr. JOÃO LUIZ KOVALESKI - CPGEI, CEFET/PR.

Prof. Dr. ALBERTO TAMAGNA - PROMEC, UFRGS.

Prof. Dr. RENATO MACHADO BRITO - PPGEM-CPGEE, UFRGS.

Prof. Dr. ILDON GUILHERME BORCHARDT - PPGEM-CPGEE, UFRGS

Porto Alegre

Dezembro / 2000

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL - UFRGS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA,
DE MINAS E DOS MATERIAIS - PPGEM

**UM MÉTODO PARA DETECTAR FALHAS INCIPIENTES EM
MÁQUINAS ROTATIVAS BASEADO EM
ANÁLISE DE VIBRAÇÕES E LÓGICA *FUZZY***

por

RUI FRANCISCO MARTINS MARÇAL, M. Sc.

Orientador: Prof. Dr. ALTAMIRO AMADEU SUSIN - PPGEM-CPGEE, UFRGS

Trabalho realizado no Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, de Minas e dos Materiais como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia.

Área de concentração: Ciências dos Materiais e Instrumentação Eletro-Eletrônica

Porto Alegre
Dezembro / 2000

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VI
LISTA DE TABELAS	IX
RESUMO	XII
ABSTRACT	XIII
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. MANUTENÇÃO DE EQUIPAMENTOS	5
2.1. Manutenção corretiva.....	5
2.2. Manutenção preventiva	5
2.3. Manutenção preditiva.....	6
2.3.1. Objetivos da manutenção preditiva	7
2.3.2. Aplicação da manutenção preditiva.....	7
2.3.3. Parâmetros medidos em manutenção preditiva.....	8
2.3.4. Periodicidade das medições	9
3. VIBRAÇÕES	11
3.1. Movimento Harmônico (deslocamento).....	11
3.2. Parâmetros velocidade e aceleração.....	12
3.3. Amplitude	15
4. ANÁLISE VIBRACIONAL NA MONITORAÇÃO DE MÁQUINAS	18
4.1. Frequência da vibração.....	19
4.1.1. Análise espectral.....	19
4.1.2. Determinação da variável a ser medida.....	20
5. TRANSDUTORES DE VIBRAÇÃO.....	21
5.1. Medidores de deslocamento	21

5.1.1. Limitações dos medidores de deslocamento.....	24
5.1.2. Cuidados a serem observados na instalação	25
5.2. Sensores de velocidade.....	27
5.2.1. Sensor de velocidade eletromecânico.....	27
5.2.1.1. Funcionamento do sensor de velocidade eletromecânico.....	27
5.2.1.2. Limitações do sensor de velocidade eletromecânico	28
5.2.2. Sensor de velocidade piezoelétrico	28
5.3. Acelerômetros.....	29
5.3.1. Tecnologia empregada na construção de acelerômetros	31
5.3.1.1. Acelerômetros piezoelétricos.....	32
5.3.1.2. Acelerômetros usando filmes de polímeros piezoelétricos.....	37
5.3.1.2.1. Vantagens dos Polímeros em relação às Cerâmicas	39
5.3.1.3. Acelerômetros utilizando potenciômetro resistivo.....	40
5.3.1.4. Acelerômetros empregando extensômetro (“ <i>strain-gage</i> ”)	41
5.3.1.5. Acelerômetros usando transformador diferencial.....	41
5.3.1.6. Acelerômetro de estado sólido	42
5.3.1.6.1. Características do ADXL 202 (acel. usado no método)	42
5.3.1.6.2. Teoria de operação do ADXL 202	43
5.3.1.6.3. Interfaces com o Microcomputador	44
6. O MÉTODO PROPOSTO	46
6.1. Detecção de falha.....	46
6.2. O Sistema Rotativo	51
6.3. A assinatura espectral do sistema.....	53
6.4. O processamento com o Matlab.....	55
6.5. A aquisição de dados.....	56
6.6. O sistema de aquisição Psi25.....	57
6.7. O processamento dos sinais adquiridos.....	58
6.8. O sistema especialista <i>Fuzzy</i>	58
6.8.1. O universo de discurso	62
6.8.2. As variáveis lingüísticas	63
6.8.3. Regras de inferência	63

6.8.4. Funções de pertinência <i>fuzzy</i>	64
6.8.5. Fuzzificação	65
6.8.6. Defuzzificação.....	66
6.9. O diagnóstico <i>Fuzzy</i>	67
7. SIMULAÇÕES DE FALHAS E AQUISIÇÕES NO SISTEMA ROTATIVO	71
7.1. Desbalanceamento	71
7.2. Desalinhamento das polias (mantendo-as fixas).....	74
7.3. Desalinhamento das polias (solta a do eixo-volante).....	75
7.4. Correia de transmissão frouxa	76
7.5. Eixo-volante frouxo	77
7.6. Retirada da superfície amortecedora que sustenta o Sistema Rotativo.....	78
8. O ESPECTRO DE CADA SITUAÇÃO DE ANORMALIDADE.....	79
9. HISTÓRICO E CONCLUSÕES BASEADAS NOS EXPERIMENTOS	88
10. CONTINUIDADE DO TRABALHO.....	91
BIBLIOGRAFIA.....	93
ANEXO 01 - O sistema de aquisição Psi25	103

LISTA DE FIGURAS

3.1 - Movimento harmônico simples	12
3.2 - Relação entre deslocamento, velocidade e aceleração	13
3.3 - Balanço exemplificando a relação entre deslocamento, velocidade e aceleração.....	14
3.4 - Formas de expressar a amplitude de um movimento harmônico	15
3.5 - Sinal de vibração complexo	16
5.1 - Curva de calibração de um sistema de monitoração por proximidade	23
5.2 - Sensor de velocidade	27
5.3 - Configuração básica de um acelerômetro	30
5.4 - Princípio de funcionamento de um Acelerômetro piezoelétrico típico	33
5.5 - Acelerômetro de compressão	35
5.6 - Elemento piezoelétrico sísmico usado em um acelerômetro sob o princípio de flexão	36
5.7 - Um acelerômetro fletor com duas saídas	37
5.8 - Diagrama esquemático do acelerômetro ADXL 202.....	44
5.9 - Sinal “ <i>Duty Cycle</i> ” com a informação de aceleração.....	45
6.1 - Especificação do método em proposição	49
6.2 - Especificação da etapa referente a estrutura	49
6.3 - Especificação da etapa referente ao acelerômetro.....	49
6.4 - Especificação da etapa referente a aquisição e processamento.....	50
6.5 - Especificação da etapa referente ao sistema <i>Fuzzy</i>	50
6.6 - O Sistema Rotativo	52
6.7 - O eixo-volante	52
6.8 - Assinatura espectral do Sistema Rotativo.....	54
6.9 - Espectrograma com o grupo de 30 aquisições	54
6.10 - O método em ambiente Matlab	55
6.11 - Detalhe da peça e o transdutor acoplado.....	56
6.12 - Regras de inferência do sistema <i>Fuzzy</i>	68

6.13 - As declarações antecedentes e conseqüentes do sistema <i>Fuzzy</i>	68
6.14 - A variável antecedente freqüência.....	69
6.15 - A variável antecedente amplitude.....	69
6.16 - A variável conseqüente diagnóstico	70
6.17 - O diagnóstico <i>Fuzzy</i>	70
7.1 - Escolha do furo no eixo-volante que desbalancea o sistema	72
7.2 - A variação de amplitude da vibração devido a inserção de elementos desbalanceadores no eixo-volante	73
7.3 - Resultado da falha polias desalinhadas fixas com o detalhe da influência no eixo do motor	74
7.4 - Variação da amplitude da falha polias desalinhadas	75
7.5 - Variação da amplitude de vibração ocasionada pelo afrouxamento da correia de transmissão	76
7.6 - Variação da amplitude de vibração ocasionada pela soltura do eixo-volante.....	77
7.7 - Variação da amplitude de vibração ocasionada pela retirada da superfície de borracha que amortece o Sistema Rotativo	78
8.1a - Aquisições do sistema em condição normal de operação durante 30 dias de funcionamento mostrando a freqüência do eixo-volante	79
8.1b - Aquisições do sistema em condição normal de operação durante 30 dias de funcionamento mostrando a amplitude de vibração na f_{vol}	79
8.2a - Aquisições do desbalanceamento ocasionado pela inserção do peso de 0,1 g. no eixo-volante, mostrando a concordância de freqüências	80
8.2b - Aquisições do desbalanceamento ocasionado pela inserção do peso de 0,1 g. no eixo-volante, mostrando a diferença de amplitudes	80
8.3a - Aquisições do desbalanceamento ocasionado pela inserção do peso de 5,1 g. no eixo-volante, mostrando a concordância de freqüências	81
8.3b - Aquisições do desbalanceamento ocasionado pela inserção do peso de 5,1 g. no eixo-volante, mostrando a diferença de amplitudes	81
8.4a - Aquisições do desbalanceamento ocasionado pela inserção do peso de 7,2 g. no eixo-volante, mostrando a concordância de freqüências	82

8.4b - Aquisições do desbalanceamento ocasionado pela inserção do peso de 7,2 g. no eixo-volante, mostrando a diferença de amplitudes	82
8.5a - Aquisições ocasionadas pelo desalinhamento das polias mostrando a concordância de frequências	83
8.5b - Aquisições ocasionadas pelo desalinhamento das polias mostrando a diferença de amplitudes	83
8.6a - Aquisições ocasionadas pelo afrouxamento das polias mostrando a concordância de frequências.....	84
8.6b - Aquisições ocasionadas pelo afrouxamento das polias mostrando a diferença de amplitudes	84
8.7a - Aquisições ocasionadas pela falta de fixação do eixo-volante mostrando a concordância de frequências	85
8.7b - Aquisições ocasionadas pela falta de fixação do eixo-volante mostrando a diferença de amplitudes	85
8.8a - Aquisições ocasionadas pelo afrouxamento da correia de transmissão do eixo-volante mostrando a concordância de frequências	86
8.8b - Aquisições ocasionadas pelo afrouxamento da correia de transmissão do eixo-volante mostrando a diferença de amplitudes	86
8.9a - Aquisições ocasionadas pela retirada da superfície de borracha que amortece o Sistema Rotativo mostrando a concordância de frequências	87
8.9b - Aquisições ocasionadas pela retirada da superfície de borracha que amortece o Sistema Rotativo mostrando a diferença de amplitudes	87

LISTA DE TABELAS

2.1 - Modalidades de manutenção e suas características	6
2.2 - Parâmetros passíveis de medição em manutenção preditiva.....	9
6.1 - Relação entre variáveis e causas de vibração.....	47
6.2 - Mapa de regras com as funções de pertinência do processo.....	66

***Dedico este trabalho
a minha Mãe HELENA (em memória),
que sempre sonhou e acreditou que este dia chegaria.***

Agradecimentos

” O que une as pessoas não são as semelhanças e sim um objetivo em comum”

Um trabalho deste porte só é possível quando muitas pessoas se predispõem a realizá-lo, dando o melhor de si, dedicando horas, noites e se privando de atividades de lazer. Aprendi durante o mestrado e no doutorado que o segredo do sucesso está em se conseguir reunir uma equipe. A equipe que se formou em torno deste trabalho é grande e se compõe de pessoas que atuaram diretamente nas medições, na elaboração de programas, na manutenção e construção do mecanismo utilizado, nas discussões e sugestões, na situação de ouvinte das idéias e desabafos, na ajuda em traduções e revisões de artigos publicados, etc...

Certamente, se mencionasse todas estas pessoas deixaria de citar muitas outras que prestaram sua contribuição em prol desta tese. Desta forma faço um agradecimento a todos e peço permissão para deixar registrado aqui para que se perpetue a minha gratidão à (ao):

DEUS, Senhor supremo, por me ter mantido forte na fé, crente em seu poder me dando discernimento, perseverança e me atendendo em orações;

Professor SUSIN, meu orientador e amigo, com quem pude aprender, além dos ensinamentos técnicos, a forma profissional e humana de se conduzir uma orientação. Muito obrigado pela confiança depositada e pela disponibilidade às minhas confissões e esclarecimentos pessoais.

CEFET/PR, minha instituição de trabalho, nas pessoas dos Professores ATAÍDE M. FERRAZZA e PAULO A. ALÉSSIO, diretores responsáveis pela minha dispensa para cursar o doutorado, pelo crédito profissional e oportunidade oferecida;

Corpo de professores do PPGEM: BRITO, LASCHUK, HAMILTON, LISBOA, LEAL, ALVIN,..., por terem regado a semente plantada e possibilitado a germinação;

Professor KOVALESKI, meu orientador no mestrado e responsável pelo incentivo em continuar a minha carreira acadêmica;

TAZZA, amigo e guru, por me ensinar como é pensar e agir com o coração em situações onde a razão parece ser a solução;

ENEIDA, minha companheira, pelo carinho e sacrifícios pessoais e profissionais pelos meus projetos;

Meus filhos: ROSANE, CARLOS, ANGELA, RHANA e MARIANA e netos: FERNANDO, GABRIELA, ISABELA e CAROLLYNE, por existirem e me fazerem feliz. A lembrança de cada um de vocês me alimentou e empurrou para este final;

AUGUSTO e KOYA, companheiros na fase de créditos, pela troca de conhecimentos. Aprendi muito com vocês e hoje entendo melhor o significado de amizade;

NEGREIROS, pesquisador no LaPsi, pela elaboração dos programas e suporte técnico no desenvolvimento das tarefas. Você merece o meu reconhecimento e respeito pela ajuda e capacidade demonstrada;

CARLO, meu bolsista e escudeiro mor, pela atuação constante e paciência com as minhas explosões;

SOCAL, pesquisador no LaPsi, pelo desenvolvimento e implementação do VBG. O teu conhecimento e ajuda foram essenciais;

SCHUCK, ADÃO, BORIN, RODRIGO, MÁRCIA, ADRIANE e LEUCKERT, amigos que sempre estiveram a disposição para me ouvir falar do trabalho e apresentar com muito entusiasmo o menor resultado obtido;

...OBRIGADO ! A glória é NOSSA ...

RESUMO

Este trabalho apresenta um método para detectar falhas no funcionamento de máquinas rotativas baseado em alterações no padrão de vibração do sistema e no diagnóstico da condição de operação, por Lógica *Fuzzy*. As modificações ocorridas são analisadas e servem como parâmetros para prever falhas incipientes bem como a evolução destas na condição de operação, possibilitando tarefas de manutenção preditiva.

Utiliza-se uma estrutura mecânica denominada de Sistema Rotativo (Figura 1), apropriada para as simulações das falhas. Faz-se a aquisição de dados de vibração da máquina usando-se um acelerômetro em *chip* biaxial de baixa potência. As saídas são lidas diretamente por um contador microprocessador não requerendo um conversor A/D.

Um sistema de desenvolvimento para processamento digital de sinais, baseado no microprocessador TMS320C25, o Psi25, é empregado na aquisição dos sinais de vibração (*.dat), do Sistema Rotativo. Os arquivos *.dat são processados através da ferramenta matemática computacional Matlab 5 e do programa SPTOOL. Estabelece-se o padrão de vibração, denominado assinatura espectral do Sistema Rotativo (Figura 2).

Os dados são analisados pelo sistema especialista *Fuzzy*, devidamente calibrado para o processo em questão. São considerados, como parâmetros para a diferenciação e tomada de decisão no diagnóstico do estado de funcionamento pelo sistema especialista, a frequência de rotação do eixo-volante e as amplitudes de vibração inerentes a cada situação de avaria. As falhas inseridas neste trabalho são desbalanceamentos no eixo-volante (Figura 1), através da inserção de elementos desbalanceadores. A relação de massa entre o volante e o menor elemento desbalanceador é de 1:10000. Tomando-se como alusão o conhecimento de especialistas no que se refere a situações normais de funcionamento e conseqüências danosas, utilizam-se elementos de diferentes massas para inserir falhas e diagnosticar o estado de funcionamento pelo sistema *fuzzy*, que apresenta o diagnóstico de formas qualitativa: **normal; falha incipiente; manutenção e perigo** e quantitativa, sendo desta maneira possível a detecção e o acompanhamento da evolução da falha.

ABSTRACT

This work provides a detection method for faults in the operation of rotating machines based on a change of system vibration standard and in the operation status diagnosis by *fuzzy* logic. These changes are analyzed and used as parameters for predicting incipient faults, as well as their evolution in operation condition allowing predictive maintenance tasks. A mechanic structure (developed to insert the faults) called Rotating System has been used.

The data acquisition of structure vibration has been made by a biaxial solid state accelerometer in a low-power chip. The accelerometer outputs (axis x and y) provide digital signals whose acceleration information is the duty cycle variation.

The outputs are directly measured by a microprocessor-based system without needing an A/D converter. This system, based on a TMS320C25 microprocessor (the Psi25), has been used for acquisition of vibration signals of the Rotating System. The acquired data (stored in *.dat files) are computed and analyzed in frequency domain with a signal processing tool (called SPTOOL) of the Matlab5 package.

The vibration standard of the Rotating System, called the spectral signature, has been obtained based on the mean of ten *.dat files. The faults analyzed in this work are due to the unbalancing of axle_wheel by insertion of unbalanced elements. The relation of mass between the wheel and the smallest unbalanced element is 1: 10,000. Based on the knowledge of specialists about the operation of a generic machine, unbalanced elements of different masses have been used to insert the faults and to diagnose the operation status.

The *fuzzy* system was calibrated to detect and diagnose the normal, incipient fault, maintenance, and danger conditions of the Rotating System using linguistic variables. The rotation frequency and vibration amplitudes of the axle_wheel are considered in each situation as parameters for analysis, diagnostic, and decision by the specialist system (*fuzzy* logic).

1. INTRODUÇÃO

O crescimento da indústria e o emprego de técnicas científicas aprimoradas no desenvolvimento das plantas industriais têm aumentado a exigência do nível de conhecimento tecnológico e demandado qualidade nos serviços de manutenção. Atualmente, tem-se contabilizado todos os custos envolvidos em uma linha de produção. Despesas com manutenção de equipamentos, perdas de produção, interrupções freqüentes na produção para reparos e falhas que poderiam ter sido evitadas, não podem ser sustentadas pela indústria competitiva dos tempos atuais. Métodos; que visem a minimização de detritos no processo fabril e, como conseqüência, a proteção do meio ambiente e a elevação no lucro final, devem ser considerados. Estes são imperativos para garantir a produtividade e a sobrevivência da empresa.

No âmbito da engenharia, a instrumentação é utilizada para medir, registrar e controlar o comportamento de grandezas físicas (Temperatura, Força, Deslocamento, Torque, Tempo, Velocidade, Aceleração, Pressão, etc...) que intervêm em um determinado processo ou “sistema”. Sistema, neste contexto, é o objeto a ser estudado: um ser vivo, uma planta industrial, uma parte de uma planta industrial, uma máquina ou mesmo uma pequena peça da mesma [Borc 95]. Portanto, pode-se definir instrumentação como: *o conjunto de dispositivos e técnicas utilizadas para aquisição, processamento, indicação, registro e controle de variáveis que definem o comportamento de um sistema termodinâmico*. Ao se construir novas máquinas ou sistemas instrumentados para utilização em qualquer área é muito comum a inclusão de dispositivos dedicados, como computadores de vários portes ou mesmo de microcontroladores integrados. De baixo custo, compactos e poderosos, tanto em “*hardware*” como em “*software*”, os computadores tornaram possível significativos avanços em produtividade, qualidade, eficiência, flexibilidade e segurança. Embora os computadores desempenhem uma função importante no processo, não são os componentes mais críticos de um sistema que envolve instrumentação. Deve-se dedicar especial cuidado aos elementos externos ao computador: os sensores e os atuadores. Estes elementos respondem pela qualidade da informação trocada com o processo. Os atuadores que respondem aos comandos oriundos do computador e controlam variáveis do processo. Da mesma forma, os sensores detectam as variáveis do processo a serem avaliadas, transformando-as em sinais adequados ao posterior processamento suprindo o computador com informações essenciais do processo [Borc 95]. Na sociedade industrial

atual, a teoria e a aplicação de controle têm sido uma das mais importantes tecnologias, desde os primários níveis de processos movidos por motores a vapor, ao estado atual onde há uma interação profunda com sistemas de informação e processos de fabricação. Durante toda a revolução industrial, promovida pela teoria de controles, a modelagem matemática de plantas e processos foi baseada em linearização. Contudo, o sucesso desta transformação depende da metodologia de modelagem matemática empregada, e no caso da teoria de controles, chegou-se a um estágio em que a precisão tornou-se tarefa árdua ou até impossível

A Natureza é completamente indiferente aos nossos esforços em modelar matematicamente seus processos, e freqüentemente, é impossível que um operador humano seja capaz de controlar diversos sistemas se compreender a matemática ou todos os detalhes físicos envolvidos. Este operador é no entanto, capaz de manejar variáveis de entrada que influenciem as saídas do processo. Essa realização fundamental levou a um novo enfoque na teoria de processos (complexos) industriais onde o conceito de “inteligência artificial”, através da emulação de características do comportamento humano no controle de processos surgiu como uma alternativa de controle e modelagem. Um fato importante nesse enfoque é que a tarefa de modelagem matemática de plantas ou processos industriais deu lugar ao favorecimento a uma modelagem que possibilitasse a manipulação das variáveis de controle de forma a alcançar as saídas desejadas.

A inteligência artificial compreende uma família de ferramentas para experimentação nesses problemas complexos e as técnicas *fuzzy* e *neurofuzzy* têm se mostrado, e se firmado, como enfoques bem fundamentados e desenvolvidos [Shaw 99]. A característica especial de lógica *fuzzy* (também referida como lógica nebulosa e em alguns casos por teoria de possibilidades), é a de representar uma forma inovadora no manuseio de informações imprecisas, de forma muito distinta da teoria de probabilidades. A lógica *fuzzy* provê um método de traduzir expressões verbais, vagas, imprecisas e qualitativas, comuns na comunicação humana em valores numéricos. Deste modo, é possível se converter toda a experiência humana em uma forma compreensível pelo computador. Assim, a tecnologia possibilitada pelo enfoque *fuzzy*, tem um imenso valor prático, pela qual se torna possível a inclusão da experiência de operadores humanos, os quais controlam os processos e plantas industriais, em controladores

computadorizados, possibilitando estratégias de tomadas de decisão em problemas complexos ou que exijam tempo de solução reduzido.

O sucesso atualmente reconhecido, de sistemas de modelagem e controle baseados em lógica *fuzzy*, em aplicações industriais, tem comprovado sua utilização como mais uma ferramenta (ou tecnologia) para a resolução de problemas de engenharia de controle industrial, manufatura, comunicação homem-máquina e em sistemas de tomadas de decisão.

A Lógica *Fuzzy* é uma técnica que incorpora a forma humana de pensar em um sistema de controle. Um controlador *fuzzy* típico pode ser projetado para comportar-se conforme o raciocínio *dedutivo*, isto é, o processo que as pessoas utilizam para inferir conclusões baseadas em informações que elas já conhecem. Por exemplo, operadores humanos podem controlar processos industriais e plantas com características não-lineares e até com comportamento dinâmico pouco conhecido, através de experiência e inferência de relações entre as variáveis do processo. A Lógica *Fuzzy* pode capturar esse conhecimento em um controlador *fuzzy*, possibilitando a implementação de um controlador computacional com o desempenho equivalente ao do operador humano.

Outra forma de raciocínio é o *indutivo*, que também pode ser utilizado no projeto de controladores *fuzzy*, onde seria possível o aprendizado e generalização através de exemplos particulares provenientes da observação do comportamento do processo numa situação dinâmica, ou variante no tempo. Controladores que combinam técnicas convencionais e inteligentes são geralmente utilizados no controle inteligente de sistemas dinâmicos complexos. Controladores *fuzzy* operacionais ou supervisórios representam um típico exemplo onde apenas uma função de controle da estratégia global utiliza o enfoque *fuzzy*. Estes controladores automatizam apenas o que tem sido tradicionalmente legado aos seres humanos como tarefa. Por exemplo, os sistemas supervisórios de controle industriais, onde o valor de referência (“*set-point*”) de muitos controladores PID podem ser controlados por uma estratégia *fuzzy*, representam uma aplicação bem sucedida na área industrial. Nesses casos a experiência de um operador humano pode ser capturada em um controlador *fuzzy*, providenciando uma técnica heurística para se projetar os algoritmos de supervisão.

Este trabalho desenvolve-se em 10 capítulos assim divididos: o Capítulo 2 aborda sobre as 3 modalidades de manutenção implementadas em rotinas de manutenção. Cita os objetivos de cada modalidade e suas características através de um

quadro comparativo. Damos ênfase a modalidade preditiva por ser esta a técnica preterida no método proposto nesta tese. O Capítulo 3 traz o conceito de vibrações, movimento harmônico, deslocamento, velocidade, aceleração, frequência e amplitude, visando o entendimento de tais grandezas no estudo de vibrações de corpos. O Capítulo 4 trata da análise vibracional no que diz respeito à monitoração de máquinas rotativas. Explana sobre o conceito de espectro de frequências e enfatiza a recomendação básica sobre as variáveis a serem medidas nos casos de monitoração por vibração. No capítulo 5 temos uma descrição dos transdutores de vibração normalmente empregados em análise de vibração, as suas vantagens, limitações e características que os diferenciam e os recomendam para cada caso de investigação. No Capítulo 6 encontra-se a proposta desta tese. O método proposto é apresentado e os passos seguidos que procuram validá-lo são enunciados. Neste Capítulo temos a fundamentação do uso do sistema especialista *Fuzzy* que através de suas variáveis lingüísticas e regras de inferência fornecem o diagnóstico do estado de funcionamento do Sistema Rotativo empregado nas experiências. Também apresenta o mecanismo empregado e denominado de Sistema Rotativo. O Capítulo 7 apresenta as simulações práticas de algumas falhas que serviram para obtermos dados, pelo sistema de desenvolvimento para processamento digital de sinais Psi25. O espectro de cada situação de anormalidade é demonstrado no Capítulo 8 através de Figuras. As conclusões chegadas e as dificuldades encontradas no decorrer das pesquisas e experiências práticas são descritas no capítulo 9. Finalizando temos, no capítulo 10, as intenções de prosseguimento do trabalho visando a melhoria do método proposto e a transformação deste trabalho acadêmico em um produto industrial.

2. MANUTENÇÃO DE EQUIPAMENTOS

O processo de manutenção inclui todas as atividades técnicas e organizacionais que garantam que as máquinas e equipamentos em geral operem dentro da confiabilidade esperada. Manutenção e trabalhos de reparo que seguem determinadas diretivas básicas reduzem as chances de falhas inesperadas e conseqüente perda de produção, tempo e gastos desnecessários. Em casos mais críticos, as falhas de um processo podem trazer prejuízos graves e, até mesmo, colocar em risco vidas humanas. Os custos de manutenção são influenciados pelas características particulares de cada máquina e de sua importância dentro da planta industrial. Pode-se citar três formas de manutenção:[Yá`C 83]

- a) Manutenção corretiva.
- b) Manutenção preventiva.
- c) Manutenção preditiva.

2.1. Manutenção corretiva

A *Manutenção corretiva* é a que se realiza sobre uma máquina que esteja com o funcionamento comprometido ou tenha parado de funcionar, devido a alguma falha. Esta máquina sofrerá uma intervenção com a finalidade de ser consertada e ser colocada novamente em serviço.

2.2. Manutenção preventiva

A *Manutenção preventiva* é aquela que se efetua retirando a máquina de serviço, obedecendo a um programa de manutenção preestabelecido, com a finalidade de inspeções e trocas de componentes, garantindo seu funcionamento por um determinado período. Este período representa a confiabilidade da máquina, baseado em fundamentos técnicos.

2.3. Manutenção preditiva

A *Manutenção preditiva* consiste no controle da máquina em serviço, efetuado com instrumentos de medição, para predizer irregularidade ou detectar variações na condição de operação que demandem tarefas de manutenção.

Basicamente, a manutenção preditiva se realiza sobre uma máquina em serviço normal de produção, sendo que as tarefas de inspeção são feitas através de medições que não interfiram no funcionamento da máquina ou equipamento. A vantagem que esta modalidade pode representar não significa, entretanto, que a sua adoção elimine a aplicação das outras modalidades de manutenção. A escolha desta ou daquela dependerá do tipo do serviço a ser executado pela máquina, do seu grau de importância no processo de produção, de suas características construtivas, etc. Resumindo, existem razões técnicas e econômicas que justificam a adoção de uma destas três modalidades para cada máquina ou sinalizam para uma mescla das mesmas.

A Tabela 2.1.evidencia as diferenças básicas entre as modalidades de manutenção e suas características fundamentais.

Tabela 2.1 - Modalidades de manutenção e suas características

	Manutenção Corretiva	Manutenção Preventiva	Manutenção Preditiva
Estado de funcionamento da máquina	fora de serviço	fora de serviço	em serviço ou fora
Motivo da intervenção	Falha	inspeção programada	controle programado ou contínuo
Tarefas a serem realizadas na máquina	troca de componentes	desmontagem para inspeção e troca de componentes	medições
Objetivo da intervenção	retorno ao serviço	garantir o funcionamento por um determinado período	predizer e detectar falhas

Destaca-se aqui a manutenção preditiva por ser a modalidade de atuação escolhida, junto ao método proposto neste trabalho de pesquisa e desenvolvimento.

“... em decorrência da monitoração e da análise das alterações de comportamento que estão acontecendo, prediz-se o estado de funcionamento futuro e pode-se programar uma ação no presente.”

2.3.1. Objetivos da manutenção preditiva

Pode se descrever como objetivos da manutenção preditiva:

- A determinação do momento em que deve ser efetuado um trabalho de manutenção em alguma peça específica de uma máquina em operação.
- A eliminação da desmontagem para inspeções de rotina.
- O aumento do período de disponibilidade da máquina.
- A redução das intervenções de emergências e não planejadas.
- A prevenção do crescimento de danos na máquina e ao sistema.
- O aproveitamento dos componentes da máquina durante toda a sua vida útil.
- O aumento da confiabilidade da máquina dentro do processo.
- A programação antecipada de paralização dos equipamentos.

O que se pode esperar na adoção da modalidade é uma operação confiável, a redução dos danos provocados por falhas e a minimização dos custos que a manutenção agrega.

2.3.2. Aplicação da manutenção preditiva

A adoção de um programa de aplicação de manutenção preditiva, com o intuito de selecionar qual máquina será incluída, deve obedecer critérios definidos considerando a relevância da mesma no processo de produção. Em uma planta nem todos os equipamentos necessitam participar de um plano de manutenção preditiva. A

seleção pode seguir, dentre vários critérios, aqueles que melhor atendem às particularidades da empresa, através de uma classificação dos equipamentos: [Ya`C 83]

a) Críticos: aqueles que em caso de falha causam considerável perda de produção, elevado custo de reparo e risco para a segurança.

b) Não críticos: aqueles que em caso de falha a perda de produção é aceitável ou nula, o custo de manutenção resultante é moderado e não apresentam risco à segurança.

c) Auxiliares: são os equipamentos duplicados (“*stand-by*”) ou que podem ser substituídos por equipamentos similares já instalados, capazes de absorver, eventualmente, mais carga sem comprometer o processo ou ocasionar perda de produção, até que se resolva a falha.

d) De falha periódica: são aqueles que apresentam desgaste progressivo, cuja falha é previsível ou ocorre em intervalos regulares diretamente proporcional ao tempo de operação.

e) Com elevado custo de inspeção: aqueles cuja a desmontagem para inspeção interna exigem altos gastos com tempo e mão de obra.

2.3.3. Parâmetros medidos em manutenção preditiva

Os parâmetros a serem medidos devem fornecer informações que permitam a inspeção de elementos específicos da máquina ou do tipo de falha. A opção pelo parâmetro e a forma de investigação mais adequada, que retrate com maior acuidade o que se investiga, são fatores relevantes e determinantes (pequenos mecanismos podem ter alteração de vibração ao serem colocados em contato com sensores). Através dos dados conseguidos pode-se ter uma análise técnica, onde os resultados desta análise indicaram a natureza da falha; que se pode esperar; e estabelecer quais são os elementos críticos do sistema. Pode-se, ainda, montar um histórico do equipamento, que permitirá estabelecer quais são os elementos de falha mais freqüentes.

A Tabela 2.2, a seguir exemplifica alguns parâmetros passíveis de serem medidos:

Tabela 2.2 - Parâmetros passíveis de medição em manutenção preditiva [Ya`C 83]

PARÂMETRO A SER MEDIDO	NATUREZA DA FALHA OU DEFEITO A SER DETECTADO
Amplitude de deslocamento da vibração	Desbalanceamento, desalinhamento, jogo excessivo, falta de rigidez, acoplamento defeituoso, correias frouxas ou gastas, eixos deformados, desajustes, turbulência,...
Amplitude de velocidade da vibração	Mancais ou engrenagens deterioradas,...
Amplitude de aceleração da vibração	Estado mecânico dos rolamentos, atrito excessivo entre componentes, falta de lubrificação, instabilidade do filme de óleo em mancais de deslizamento,...
Frequência da vibração	Dado complementar à medição de qualquer característica da vibração, indispensável na determinação de qualquer problema detectado,...
Fase da vibração	Desbalanceamento dinâmico, folga excessiva, partes frouxas ou soltas,...
Nível de ruído	Rolamentos ou engrenagens deterioradas, desgastes, cavitação, turbulência, aumento do atrito,...
Fugas	Deterioramento de selos, juntas e gaxetas, perdas de pressão,...
Espessura	Corrosão ou erosão em tanques e tubulações,...
Temperatura	Lubrificação inadequada, engrenamento, aumento do atrito, sobrecarga, desalinhamento de mancais, produção excessiva de calor em componentes elétricos,...
Pressão	Deterioramento de rotores, bloqueio de tubulações, válvulas travadas,...

2.3.4. Periodicidade das medições

A frequência das medições pode ser fixada considerando-se alguns fatores:

- a) Medição normal ou de rotina; sendo determinada em função da:
- a.1) Experiência acumulada sobre falhas anteriores e histórico do equipamento.
 - a.2) Frequência de manutenção preventiva já estabelecidas.
 - a.3) Existência de monitores do tipo (instrumentos com painel para controle intermitente) que garantam um controle permanente da máquina.
 - a.4) Recomendação do fabricante da máquina.

b) Medição excepcional ou especial; terá lugar nos casos de:

- b.1) Iminência de uma falha ou mudança nas características físicas do equipamento que exijam um controle maior de seu funcionamento.
- b.2) Modificações nas condições de serviço ou sobrecarga do equipamento.
- b.3) Falta de informações sobre o histórico do equipamento.
- b.4) Verificações efetuadas antes e depois de um reparo com o propósito de determinar níveis de comparação para futuras medições.

Em geral, a probabilidade de falha e o quão rapidamente ela se desenvolve são as primeiras considerações na seleção de um ótimo intervalo entre as medições. Esse intervalo é, então, altamente dependente do tipo de equipamento e aplicação. A maioria das organizações tem padronizado o intervalo entre as medições em um mês. Entretanto, conhecendo-se as condições do equipamento e a sua criticidade para a planta, o intervalo pode ser reduzido, até mesmo para uma semana. Como exemplo, pode-se citar o plano de manutenção preditiva da Refinaria Alberto Pasqualini - REFAP. O critério adotado foi a criticidade do equipamento, ou seja, equipamentos não duplicados ou que sua parada implicaria em perda de produção. Para estes, o período de monitoramento adotado é a cada 15 dias. As leituras nos demais equipamentos são feitas em intervalos de 30 dias. Para aqueles, de baixa taxa de utilização e baixa criticidade é adotada uma rotina de medição a cada 90 dias.

Concluindo, um plano de manutenção pode ser elaborado e implantado de forma a atender as exigências operacionais da organização. Pode conter particularidades específicas de periodicidade e de métodos de investigação. Do ponto de vista qualitativo, pode utilizar-se de várias técnicas de medição, sendo a medição de vibração uma das tantas possíveis de aplicação. Comprovadamente, a utilização da análise vibratória no setor industrial tem possibilitado que esta modalidade de manutenção se apresente como um eficiente programa de controle de funcionamento de máquinas industriais.

3. VIBRAÇÕES

Vibrações mecânicas são, em geral, movimentos oscilatórios de uma massa (ou massas) em torno de uma posição de referência. Em uma máquina, vibração é o resultado de forças dinâmicas internas não compensadas, criadas por elementos rotativos, oscilantes ou de deslocamento aleatório. Os movimentos podem ser caracterizados em termos de:

1. Deslocamento: é a distância do afastamento da massa de sua posição natural em metros (m).

2. Velocidade: é a derivada (taxa de variação da distância) com que a massa se movimenta, em metros por segundo (m/s).

3. Aceleração: a taxa de mudança de velocidade da massa, em metros por segundo ao quadrado (m/s²).

3.1. Movimento Harmônico (deslocamento)

Movimento harmônico, expresso em termos de **deslocamento**, é a forma de vibração mais simples. Quando analisado em função do tempo, é representada por uma função senoidal como apresentada na Fig. 3.1. O movimento instantâneo de um corpo vibrando em torno de uma posição de referência pode ser descrito matematicamente pela equação:

$$x(t) = X \text{ sen } \omega t \quad (3.1)$$

onde: $x(t)$ é o valor instantâneo do movimento;

X é a amplitude máxima do movimento e

ω é a velocidade angular.

Considerando-se que X representa o máximo valor que a função $x(t)$ pode alcançar em qualquer intervalo de tempo é conveniente chamar X de amplitude de pico.

O movimento, expresso em termos de deslocamento, pode ser escrito como:

$$x(t) = x_{\text{pico}} \text{ sen } \omega t \quad (3.2)$$

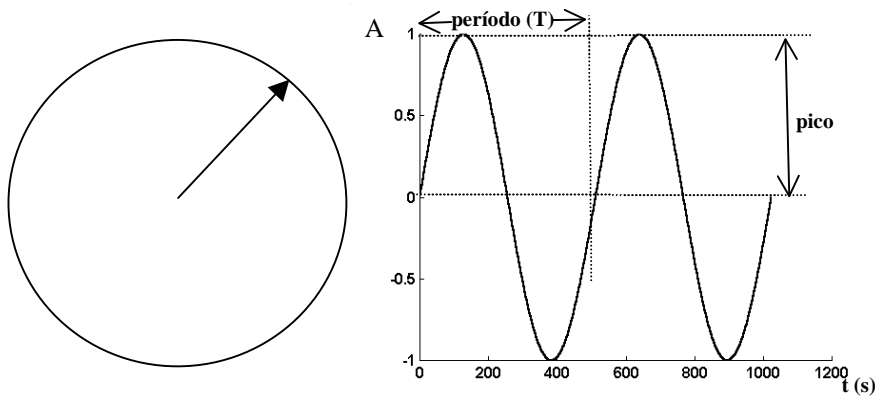


Figura 3.1 - Movimento harmônico simples

Pela Figura. 3.1 pode-se definir os seguintes termos:

T é chamado período e é o tempo entre dois pontos consecutivos e repetitivos na forma de onda.

f é a frequência e é igual ao inverso do período ($1/T$), que também é igual a $\omega/2\pi$; tem-se, portanto:

$$f = 1/T = \omega/2\pi$$

Como exemplo, se cada divisão horizontal na Figura 3.1 representa 5 ms, então o período do movimento harmônico será de 20 ms. Tomando-se o inverso do período encontra-se uma frequência de 50 Hz ou uma frequência angular $kT = 2\pi \cdot 50 = 100\pi = 314,16 \text{ rad/seg}$

3.2. Parâmetros velocidade e aceleração

Na Figura 3.1, o movimento harmônico foi descrito em termos de movimento ou deslocamento. De fato, o movimento harmônico tem outras duas propriedades usadas na análise vibracional de máquinas: *velocidade* e *aceleração*, conforme mostra a Figura 3.2.

Velocidade é a taxa de variação do deslocamento em relação ao tempo.

$$v(t) = dx(t) / dt \quad (3.3)$$

Aceleração é a taxa de variação da velocidade em relação ao tempo ou a segunda derivada no tempo do deslocamento.

$$a(t) = dv(t) / dt = d^2x(t) / dt^2 \quad (3.4)$$

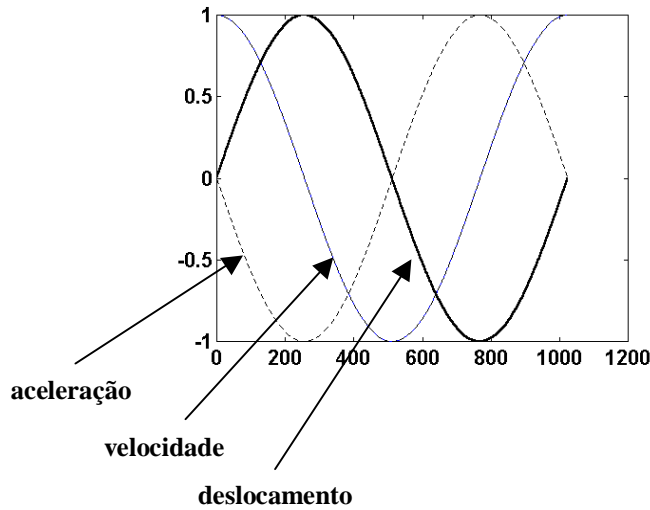


Figura 3.2 - Relação entre deslocamento, velocidade e aceleração

As equações 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4 representam a definição geral de velocidade e aceleração. No caso específico do movimento harmônico, e somente neste caso, a relação entre deslocamento, velocidade e aceleração é simplificada conforme as equações abaixo:

$$x(t) = x_{pico} \text{ sen } \omega t \quad (3.5)$$

$$v(t) = (\omega x_{pico}) \text{ cos } \omega t = v_{pico} \text{ sen } (\omega t + \pi/2) \quad (3.6)$$

$$a(t) = -(\omega^2 x_{pico}) \text{ sen } \omega t = a_{pico} \text{ sen } (\omega t + \pi) \quad (3.7)$$

Como indicado na Figura 3.2, a velocidade conduz ao deslocamento por um ângulo de fase de 90°. A aceleração conduz à velocidade por um ângulo de fase de 90° e ao deslocamento por um ângulo de 180°. Para ilustrar estas relações, suponha-se um balanço, como na Figura 3.3.

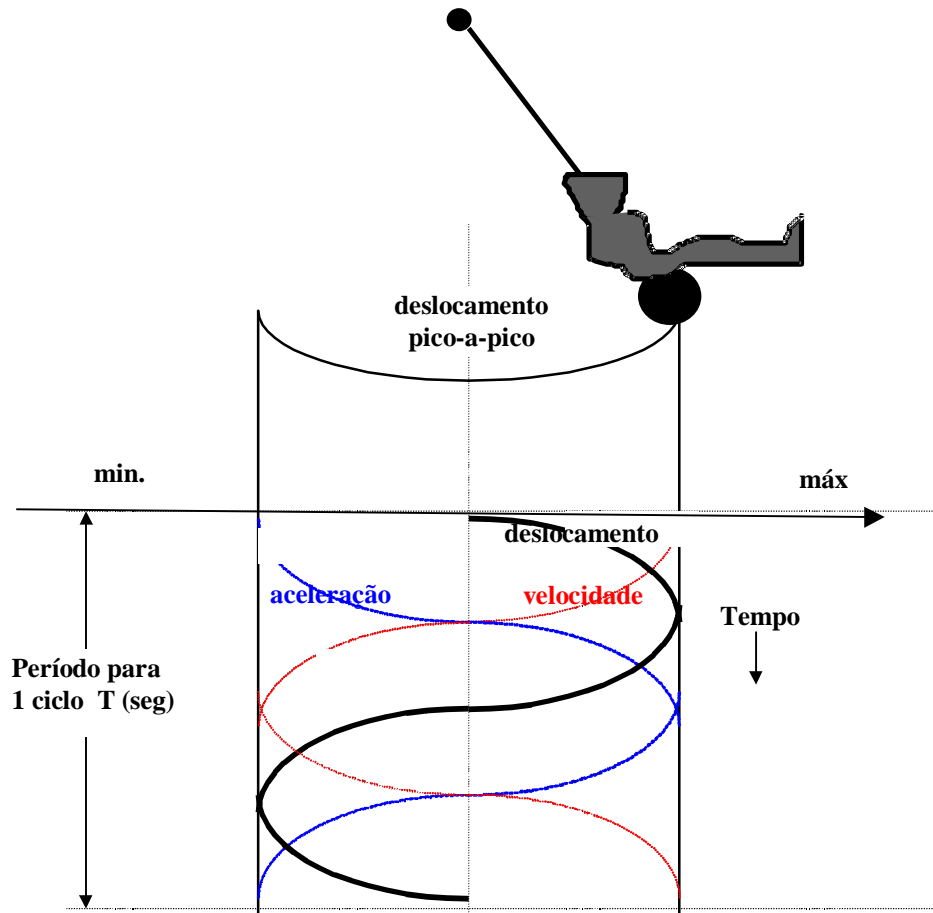


Figura 3.3 - Balanço exemplificando a relação entre deslocamento, velocidade e aceleração

Esta variação nos valores de velocidade e aceleração com a frequência é extremamente importante para formar as bases para critérios mais rigorosos de análise vibracional. Serve, também, para balizar a seleção da variável que será mais representativa para detecção e análise de uma determinada falha. Entretanto, cabe ressaltar que falhas em equipamentos podem ocorrer sem que nenhum sinal de vibração anormal tenha sido detectado.

3.3. Amplitude

Diferentes valores numéricos podem ser usados para caracterizar o movimento, conforme ilustra a Figura 3.4.

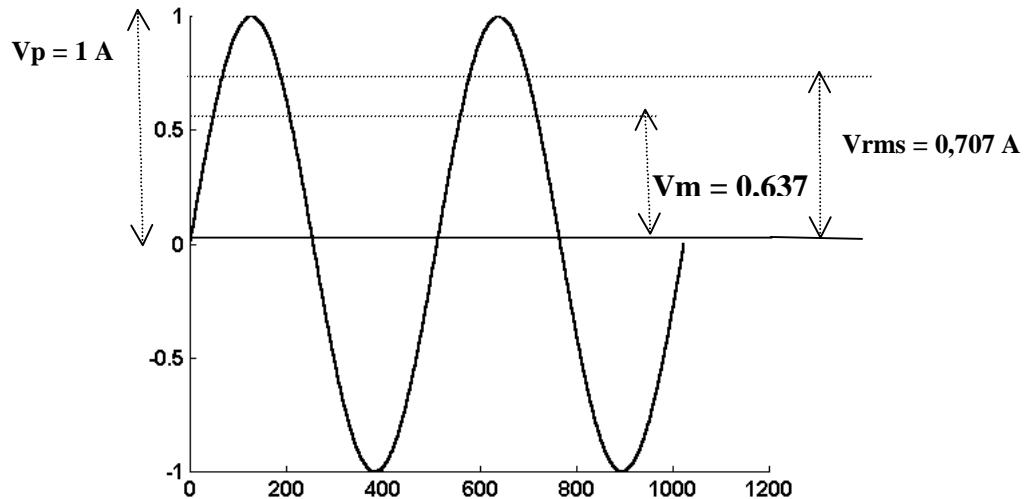


Figura. 3.4 - Formas de expressar a amplitude de um movimento harmônico

sendo:

V_{pico} : o valor da amplitude do movimento;

$V_{\text{pico-a-pico}}$: a diferença entre os valores máximos positivo e negativo do movimento;

$V_{\text{médio}}$: o valor médio que é definido por:

$$V_m = 1/T \cdot \int_0^T x(t) dt \quad (3.8)$$

V_{rms} : o valor *rms* (“*root mean square*”) ou eficaz o qual é definido por:

$$V_{\text{rms}} = \sqrt{1/T \cdot \int_0^T x^2(t) dt} \quad (3.9)$$

Para movimento harmônico puro todos estes valores estão relacionados pela amplitude e podem ser determinados um a partir do outro.

Vibrações reais encontradas na análise de máquinas raramente são puramente harmônicas. A vibração é normalmente uma combinação de vários movimentos harmônicos, de diferentes amplitudes e frequências, e movimentos aleatórios (aqueles cujos valores instantâneos não podem ser descritos por uma equação matemática e onde somente suas propriedades estatísticas são conhecidas).

A Figura 3.5 ilustra um movimento vibratório genérico. Em um sinal desta natureza, a escolha do valor numérico a ser utilizado para determinar as suas características pode implicar em grandes diferenças. Por exemplo, o valor de pico do sinal (V_p) não considera o histórico da onda naquele intervalo de tempo que gerou tal pico. Por outro lado, o valor médio (V_m) e o valor eficaz (V_{rms}), ambos consideram o histórico da onda.

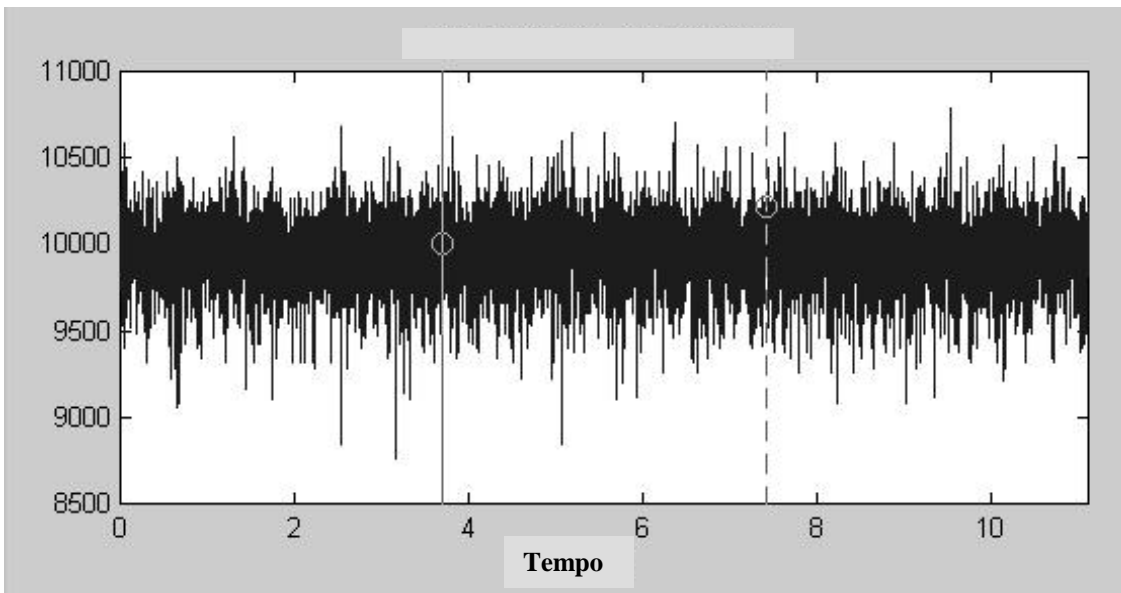


Figura 3.5 - Sinal de vibração complexo

O valor eficaz (ou valor rms) do sinal oferece uma estimativa da energia contida na vibração, por isso, é preferido em relação ao valor médio. É um parâmetro largamente utilizado para a estimativa da gravidade da vibração em carcaças de máquinas ou medidas externas. O valor eficaz exige um detector de valor eficaz. A simples conversão partindo-se do resultado obtido através de um detector de valor

médio (ou seja, multiplicando-se por 1,11), conduz a resultados errôneos, quando o sinal de entrada não for uma onda senoidal.

O valor de pico tem vantagens quando for necessário determinar se a vibração é de natureza impulsiva, tal como, a originada de engrenagens ou mancais de elementos rolantes. O valor de pico deve ser medido com um detector de valor pico, também evitando-se, através do escalonamento do resultado obtido por um detector de valor eficaz (multiplicando-se por $\sqrt{2}$), que se subestime ou se obtenha uma análise errada do verdadeiro valor.

O valor pico-a-pico pode ser utilizado quando for medido o deslocamento relativo de um eixo dentro de um mancal. Neste caso, o valor pico-a-pico representa o percurso do eixo e pode ser diretamente comparado com a folga do mancal [Ritt 96]. Mais uma vez, deve se ter cuidado na obtenção do valor pico-a-pico, não bastando multiplicar um dos valores de pico por 2. Uma boa regra é sempre graficar um valor de amplitude em função do seu tipo de detector, seja este rms, pico ou pico-a-pico.

4. ANÁLISE VIBRACIONAL NA MONITORAÇÃO DE MÁQUINAS

As máquinas são elementos mecânicos complexos, articulados. As peças que sofrem excitação podem oscilar e as oscilações transmitem-se pelas articulações aos demais elementos acoplados. O resultado é um complexo de frequências que caracteriza o sistema.

Cada vez que uma peça altera suas características mecânicas por desgaste ou trinca, uma componente de frequência do sistema será alterada. Havendo alteração no acoplamento entre as peças altera o coeficiente de transmissão do sinal entre as peças e, em consequência, a forma de frequência global do sistema.

Folgas, defeitos ou desalinhamentos de rolamentos ou mancais de máquinas rotativas refletem-se na alteração de frequências ou no surgimento de novas frequências. O desbalanceamento do rotor é transmitido pelo rolamento.

Considerando os graus de liberdade dos acoplamentos, os movimentos complexos (no espaço - três eixos) podem ser parcialmente transmitidos. A detecção da vibração no tempo e no espaço, por outro lado, pode trazer uma informação adicional. Isso exige, entretanto, a decomposição dos movimentos através de sensores que detectem as grandezas físicas em direções específicas.

A premissa fundamental sobre a qual se baseia a análise de vibração como técnica aplicada à manutenção industrial é: **“Cada componente ou cada tipo de deficiência mecânica de uma máquina em operação produz uma vibração de frequência específica que em condições normais de funcionamento, alcança uma amplitude máxima determinada”**. Desta feita, é possível medindo-se e analisando-se a vibração, se estabelecer sua origem, identificar cada componente da máquina e o tipo de falha que a está gerando, além, de avaliar o estado mecânico do componente que a produz ou a gravidade da deficiência detectada.

A metodologia básica recomenda a:

1) Medição de frequência para identificar a origem da vibração;

O conhecimento da frequência permite identificar o componente da máquina ou a natureza da falha que produz a vibração

2) Medição da amplitude para avaliar a vibração e conseqüentemente o funcionamento normal ou anormal do sistema;

A medição da amplitude permite avaliar por comparação com valores limites previamente estabelecidos se a vibração corresponde a um funcionamento normal ou anormal e o grau de importância da falha detectada.

4.1 Freqüência da vibração

Freqüência é a razão de repetição de um evento periódico, geralmente expressa em rotações (ou ciclos) por segundo, **Hz**; rotações por minuto, **rpm**; ciclos por segundos, **cpm** ou múltiplos da velocidade de rotação, **harmônicas**. Harmônicas são comumente referidas como sendo 1x a rotação, 2x a rotação, 3x a rotação e assim sucessivamente.

Todo equipamento rotativo que possui um sistema rotor-mancal pode ser avaliado através das forças dinâmicas que estão atuando sobre ele quando o mesmo se encontra em operação. Condições tais como instabilidade, desbalanceamento, desalinhamento, mudanças no ajuste, desgaste e até mesmo fadiga em seus componentes, geram vibrações específicas e características. A vibração característica mais comum ocorre na freqüência de rotação da máquina. A vibração na freqüência de rotação da máquina é geralmente a componente com a maior amplitude na medida em velocidade ou deslocamento. As próximas são as harmônicas da freqüência de rotação. Estas podem ser geradas de pelo menos dois modos. Primeiro, por um evento que se repete várias vezes durante cada revolução, como a ação de ajuste de um acoplamento desalinhado. Segundo, pela distorção ou afastamento de uma onda senoidal pura na freqüência fundamental ou de rotação da máquina.

4.1.1. Análise espectral

O método de análise de freqüências, baseado no teorema de Fourier, estabelece que qualquer função periódica pode ser decomposta por uma série de ondas sinusoidais puras com freqüências distintas e múltiplas harmônicas da freqüência fundamental. Estas componentes constituem o espectro de freqüência da vibração. Ao se utilizar de transdutores sensores (acelerômetros) para a aquisição de tal parâmetro e posterior

análise, o espectro de vibração de um “sistema” pode ser levantado passando-se o sinal coletado por um filtro passa - banda estreito e sintonizável. Com tal filtro pode-se varrer uma faixa de frequências, observando-se a amplitude dos picos em determinadas frequências. Relacionando-se as amplitudes observadas com as da frequência fundamental do sistema (rotativo), pode-se chegar a um diagnóstico do estado de funcionamento ou alterabilidade em curso do sistema.

4.1.2. Determinação da variável a ser medida

Cada força excitadora existente em diferentes pontos da máquina gerará uma harmônica da vibração determinando um certo deslocamento, uma certa velocidade e uma dada aceleração; a soma de todas as harmônicas para cada variável resultará uma poliharmônica, presente nos mancais.

Pode-se classificar o total das componentes harmônicas da vibração em dois grupos, delineados pelo valor da frequência de rotação do eixo. Assim, se estabelece a divisão [Ya`C 83]:

1) Componentes de baixa frequência (valores de frequência até 5 vezes a rpm do eixo).

2) Componentes de alta frequência (valores de frequência maiores que 5 vezes a rpm do eixo).

Convém esclarecer que os valores acima seguem uma divisão orientativa.

5. TRANSDUTORES DE VIBRAÇÃO

A escolha do parâmetro para uma medição particular depende da natureza da vibração e do propósito da medida. Considerando que, deslocamento é usualmente preferido para medições de vibrações em baixa frequência, tais como, desbalanceamento de máquinas e vibrações de suportes estruturais, aceleração é escolhida para medição de choques e vibrações em alta frequência onde os primeiros sinais de desgaste e fadiga da máquina geralmente aparecem. Velocidade, por outro lado, oferece uma indicação da vibração, sendo o parâmetro indicado em monitoração da condição de máquinas e em programas de manutenção preventiva [Allo 84].

Transdutores de vibração são dispositivos que convertem movimento mecânico em um sinal elétrico (AC) dinâmico. Geralmente, necessitam de um condicionamento eletrônico que adapta o sinal elétrico para transmissão ou uso por instrumentos de monitoração, analisadores, monitores e aparelhos de gravação. Os transdutores tradicionalmente usados para investigação de vibração são: os Medidores de deslocamento sem contato (como o “*eddy current probe*”); os Sensores de velocidade (eletromecânicos ou piezoelétricos) e os Acelerômetros.

5.1. Medidores de deslocamento

O medidor de deslocamento é um sistema compreendido de um transdutor de deslocamento (“*probe*”), um cabo de extensão e um oscilador/demodulador. O transdutor de deslocamento consiste de uma bobina de cobre montada em um material não condutor, plástico ou cerâmica, acoplado a um corpo cilíndrico rosqueado, para que possa ser fixado a um suporte. Em operação, o transdutor é excitado com uma frequência em torno de 1500 Hz, gerada pelo oscilador e transmitida pelo cabo de extensão. Quando a extremidade do transdutor é posicionada próximo de um material condutor (superfície da máquina a ser monitorada), correntes de “*eddy*” são induzidas na superfície do material, extraindo energia da excitação do “*probe*” e modificando a amplitude do sinal, isto é, modulando em amplitude o sinal de 1500 Hz. Como a distância entre a extremidade do transdutor e a superfície observada, conhecida como

“*gap*”, é variável (por estar vibrando) o sinal modulante representa a vibração, que é expressa na saída do demodulador como uma tensão DC proporcional.

Todo o conjunto: transdutor de deslocamento, cabo de extensão, oscilador e demodulador constituem um circuito ressonante em harmonia. Para estabelecer e manter uma razão entre o “*gap*” (afastamento) e a tensão, todo o conjunto deve estar devidamente combinado e calibrado. A *American Petroleum Institute (API) Standard 670* traz especificações sobre a extremidade dos sensores, diâmetro do corpo, tipos de roscas, comprimento do “*probe*” e dos cabos de extensão. Estes padrões são seguidos pela maioria dos fabricantes dos transdutores de deslocamento utilizados no monitoramento das condições das máquinas. Desta forma, eles garantem o intercâmbio de componentes, dispensando a recalibração.

Os transdutores de deslocamento sem contato (“*noncontact displacement transducer*”) têm alcançado grande aceitação no monitoramento e proteção de máquinas industriais. São efetivos para o monitoramento de máquinas com mancais de rolamento ou deslizamento. Indicam o movimento do eixo e a posição relativa do mesmo ao mancal. O deslocamento radial do eixo (valor pico-a-pico) pode ser relacionado diretamente com a folga radial no mancal. A componente estática (DC) de um sistema de medição de vibração de proximidade representa a posição média do eixo em relação ao transdutor de deslocamento. Normalmente, utilizada para monitorar a posição axial do eixo, a componente estática, também é importante, para o monitoramento radial. Neste caso, esta pode localizar a posição média da linha de centro longitudinal do eixo dentro do mancal. O monitoramento da posição axial serve, ainda, para acompanhar a posição relativa do rotor em relação aos componentes estacionários da máquina.

Uma curva de calibração típica pode ser vista na Figura 5.1 para este tipo de sistema de medição de proximidade.

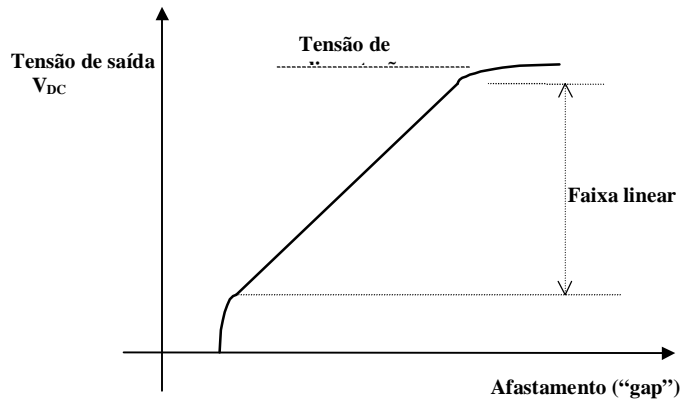


Figura 5.1 - Curva de calibração de um sistema de monitoração por proximidade

Pode-se fazer algumas considerações em função da curva de calibração:

a) A *sensibilidade* do sistema é dada pela relação: *variação tensão de saída / variação do afastamento “gap”*.

b) O sensor em contato ou muito próximo do eixo a ser investigado não produz sinal de saída do demodulador.

c) Há uma região linear na qual o afastamento do sensor da superfície monitorada produz uma tensão de saída proporcional. A região linear, baseada nos padrões industriais atuais, pode variar de 250 μm até 2250 μm em média. Tais padrões exibem uma proporcionalidade entre afastamento (“gap”) e a tensão de saída de 8 mV/ μm . Isto significa que uma variação de 250 μm no afastamento produz uma variação de 2 V na tensão.

d) Além da extremidade superior da região linear, o sistema perde a constante de proporcionalidade entre a tensão de saída e o afastamento. A tensão de saída se aproxima da tensão de alimentação do conjunto.

A inclinação da curva, a faixa linear e a saída V_{DC} correspondente a um dado afastamento irão variar conforme a mudança da condutividade e permeabilidade do material. Se um sensor e um demodulador forem calibrados para um aço 4140 e forem utilizados sem a devida recalibração em outro material, tal como o aço inoxidável ou inconel, a curva se deslocará para a esquerda. Este deslocamento produzirá uma tensão de saída maior para um dado afastamento. Portanto, é recomendável se checar a calibração do sistema com o material que será utilizado [Varg 90].

5.1.1. Limitações dos medidores de deslocamento

Pode-se apontar como uma limitação do uso do transdutor de movimento a dificuldade que este tem em monitorar um eixo que apresente irregularidade na superfície do material, como a periferia de um eixo. Este sistema não consegue distinguir entre o movimento do eixo (a vibração) e as imperfeições na superfície deste (“*runout*”). As imperfeições podem ser crateras, dentes, excentricidade do eixo, variações de propriedades eletromagnéticas ou variações na condutividade e permeabilidade do material. Como conseqüência, o sinal de saída é o vetor da soma da vibração e de todas as imperfeições da superfície observada pelo sensor. Considerando que o campo magnético produzido pelo sensor penetra a superfície do material monitorado qualquer heterogeneidade produzirá uma certa distorção no sinal de saída. Isto pode alterar a configuração da forma de onda como pode aumentar a amplitude da vibração das harmônicas da frequência (velocidade) de giro da máquina.

O “*runout*” total é tipicamente medido em máquinas de alta velocidade (maior que 2500 rpm), pela observação do deslocamento do eixo em velocidade de 300 a 600 rpm. Nesta velocidade, toda vibração do eixo é considerada como sendo provocada pelas imperfeições.

Como o “*runout*” é um vetor não pode ser subtraído como um valor absoluto. Deve a todo custo ser reduzido ao mínimo. Via de regra o “*runout*” total medido não deve ser exceder 10 % do deslocamento do eixo quando em operação.

É difícil reduzir o valor para menos de 5 μm (0,2 mils). O valor aceito para máquinas de alta velocidade (até 12000 rpm) é de 6 μm (0,25 mils). As normas API 612 e API 617 recomendam que o “*runout*” seja inferior ao menor valor entre:

- 0,25 mils. $\sqrt{12000 \text{ rpm} / \text{rotação (rpm)}}$
- 6 μm (0,25 mils)

A preocupação com a minimização do problema exige cuidados na fabricação ou preparação da superfície a ser medida. Além deste detalhe, sabe-se que forças eletromagnéticas podem gerar “*runout*”. Portanto, pode ter dois tipos: mecânico e eletromagnético. A eliminação pode ser feita eletronicamente, isto é, com um

compensador de “*runout*”. Este compensador memoriza o movimento de uma volta completa do eixo em relação a uma dada posição de referência indicada por outro sensor. Este sensor serve apenas para indicar a posição do eixo durante uma revolução. O sinal de vibração, tomado com o eixo em baixa rotação, é assumido como sendo devido a tais defeitos ou imperfeições. Esta forma de onda ou o espectro de vibração é subtraída automaticamente da forma de onda do sensor de deslocamento quando o eixo se encontra em operação. Este procedimento gera uma forma de onda e correspondente espectro de vibração mais representativos do real movimento do eixo. Para tornar efetivo o processo o sensor deve observar a mesma superfície usada para captar o “*runout*”. A qualidade da medida passa a depender destes cuidados. A operação de subtração pode ser efetuada analogicamente ou digitalmente se um sistema digital estiver sendo utilizado.

5.1.2. Cuidados a serem observados na instalação

Visando acuidade das medições alguns cuidados devem ser observados.

Como o objetivo da medida é monitorar vibrações é necessário que o sensor esteja rígido e protegido para que possa funcionar satisfatoriamente. Um dispositivo de sustentação dos sensores de deslocamento que apresente falta de rigidez pode ser uma fonte de erros. Se o suporte vibra ocorre uma leitura errada de vibração. Antes de se instalar o suporte é importante que a sua frequência de ressonância seja conhecida. Por medida de prevenção é recomendado que a frequência deve ser pelo menos dez (10) vezes a velocidade de operação do equipamento.

A interferência de campo magnético entre dois sensores instalados próximos pode ser uma outra fonte de interferência. As correntes de Foucault geradas pelo “*probe*” irradiam um campo magnético, que pode interferir na operação de um “*probe*” adjacente.

Cada tipo de demodulador é projetado para usar um específico comprimento de cabo e diâmetro da ponta do sensor (“*probe tip*”). A impedância do cabo influi no comportamento do circuito. Comprimentos de cabos menores que o especificado aumentam os fatores de escala que, por conseqüência, indicam leituras de vibração

superiores à vibração real. Cabos de conexão extensos também causam uma redução no fator de escala e indicações errôneas de vibração ou posição.

Conexões intermitentes são outra fonte de vibração que comprometem o processo de medição. Este problema pode ser originado por fiação ou conectores de cabos soltos.

Um sensor colocado excessivamente perto do eixo e com um afastamento (“*gap*”) fora da escala linear ocasionará indicações de vibração elevada para um determinado tipo de curva de calibração (Figura 5.1). Em contra partida, uma indicação inferior à existente pode conduzir à situações de alto risco. Nesta situação, o monitor indicará um nível de vibração aceitável e baixo enquanto a vibração real é mais elevada, podendo até atingir níveis críticos. A curva de calibração do sensor deve ser sempre consultada e seguida para que se evite tais situações.

Outro detalhe a ser observado é o conhecido como visão lateral (“*sideview*”). O sensor de deslocamento irradia um campo magnético tanto para a frente como para os lados. Um material condutor junto à superfície lateral do mesmo restringe sua sensibilidade em relação ao afastamento do material na sua frente. Isto reduz o fator de escala e, conseqüentemente, há uma indicação de vibração abaixo da real. “Não deve haver material condutor num raio de duas vezes o diâmetro da ponta de *probe* em torno de sua superfície” [Ritt 96].

Portanto, pode-se distinguir três pontos críticos quando da utilização de um sistema de medição de proximidade:

- a) Afastamento inadequado.
- b) Interferência lateral.
- c) Comprimento de cabo incompatível.

Todos estes problemas causam indicações excessivas ou erradas nos monitores. Estes podem conduzir a alarmes falsos e perdas de confiança no sistema de monitorização.

5.2. Sensores de velocidade

Existem dois tipos de sensores de velocidade utilizados no monitoramento de máquinas: o eletromecânico e o piezoelétrico.

5.2.1. Sensor de velocidade eletromecânico

Este sensor consiste de um ímã permanente e uma bobina de cobre, conforme é mostrado na Figura 5.2. No interior do sensor uma bobina cilíndrica, fixada ao seu corpo, envolve um ímã permanente suspenso por molas. O sistema de sustentação das molas é projetado para uma frequência natural baixa, de forma que o ímã permaneça estacionário (massa inercial) no espaço para frequências acima de 10 Hz, aproximadamente. Geralmente é colocado um óleo sintético para amortecer a frequência natural do sistema massa mola e para baixar sua resposta para valores inferiores a 10 Hz.

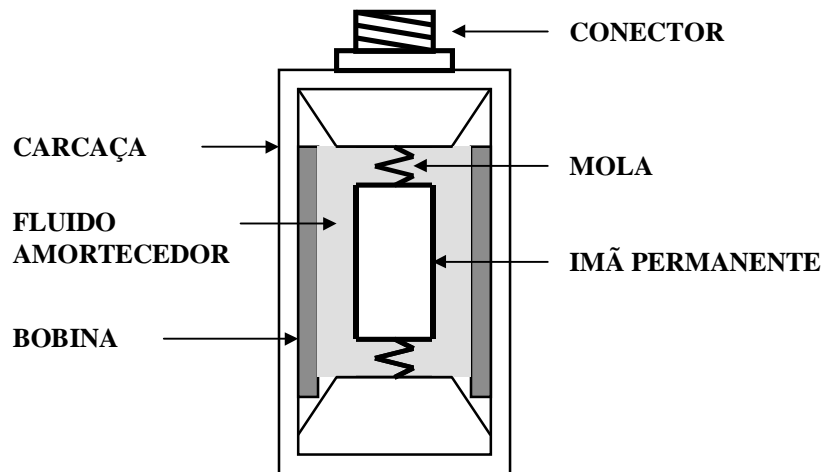


Figura 5.2 - Sensor de velocidade

5.2.1.1. Funcionamento do sensor de velocidade eletromecânico

O sensor é fixado à superfície que se deseja medir vibração. Quando esta vibra o movimento relativo entre o ímã estacionário e a bobina gera um campo magnético variável através da bobina, induzindo uma tensão proporcional à velocidade absoluta da

superfície. Um sensor de velocidade é um mecanismo autogerador que produz um sinal de baixa impedância. Este sinal pode ser usado diretamente em um analisador ou equipamento de monitoração sem necessitar de fonte externa de energia.

O sensor de velocidade eletromecânico possui uma curva de *sensibilidade x frequência de resposta* limitada em baixas frequências pela frequência natural amortecida do sistema. A faixa de operação deste sistema, geralmente, está na ordem de 10 Hz a 1500 Hz.

Em função da existência de um fluido amortecedor em seu interior a temperatura de operação deve ser mantida dentro dos padrões recomendados. Pode-se, contudo, encontrar sensores especiais para operação em temperaturas em torno de 260 °C.

5.2.1.2. Limitações do sensor de velocidade eletromecânico

Acrescentando-se as limitações frequência e temperatura, já mencionadas, pode-se citar como restrições ou cuidados no uso deste tipo de sensor:

a) Confiabilidade mecânica: sendo um dispositivo eletromecânico está sujeito a desgastes e, por conseqüência, a diminuição da precisão pelo uso. Por possuir partes móveis fica sujeito, também pelo uso constante, a falhas dos componentes.

b) Orientação: alguns modelos exigem a montagem em planos específicos, horizontal ou vertical, limitando as posições da instalação na máquina.

c) Utilização em máquinas de baixa rotação: a sensibilidade de um sensor de velocidade decresce significativamente abaixo de 10 Hz (600 rpm), ficando, portanto, desapropriado para monitorar máquinas de rotações inferiores a 500 ~ 600 rpm.

5.2.2. Sensor de velocidade piezoelétrico

O sensor de velocidade piezoelétrico é na verdade um acelerômetro piezoelétrico que possui internamente um circuito que integra o sinal obtido, resultando em uma saída que expressa a velocidade. Comparado com o sensor de velocidade eletromecânico, apresenta algumas vantagens:

a) Maior confiabilidade e vida útil devido a ausência de partes mecânicas móveis.

b) Estabilidade de fase em sua faixa de operação.

c) Faixa de operação maior para baixas frequências. A gama de atuação de sensores de velocidade (acelerômetros) varia de aproximadamente 2 Hz (120 rpm) até 2000 Hz (1200 rpm), dependendo de sua conformação. Desta forma, pode-se monitorar máquinas ou vibrações em baixas frequências.

5.3. Acelerômetros

O mais importante captador (“*pickup*”) para vibração, choques e medição de movimento é o acelerômetro. Este instrumento está disponível comercialmente em uma larga escala de tipos e modelos atendendo as mais variadas particularidades no âmbito de medição. A razão desta popularidade deve-se às características apresentadas: [Doeb 90].

a) A resposta em frequência abrange desde alguns Hz até kHz.

b) Deslocamentos e velocidades podem ser facilmente obtidos por integração elétrica que é mais estável que diferenciação.

c) Medições de movimentos transientes (choques) são melhor obtidas do que com captadores de deslocamentos ou velocidade.

d) Forças destrutivas em máquinas, em geral, são relatadas mais fielmente por aceleração do que por velocidade ou deslocamento.

A configuração básica de um acelerômetro pode ser visto na Figura 5.3. O princípio de operação pode ser descrito como: supondo a aceleração x_i'' a ser medida como sendo uniforme, a massa M estará em repouso em relação à caixa. Desta forma, sua aceleração absoluta, também, será x_i'' . Se a massa M está acelerando em x_i'' , deve existir uma força causando esta aceleração. Porém, se a massa M não está se movimentando em relação à caixa, esta força pode advir apenas da mola. Sendo a deflexão da mola x_0 proporcional à força, que é proporcional à aceleração, x_0 é uma medida da aceleração x_i'' . Então, a medição de aceleração absoluta está reduzida para a

medição da força requerida para acelerar uma massa conhecida. Esta dependência deve considerar a ação de forças gravitacionais, principalmente em sistemas de orientação inercial, ficando sem efeito para sistemas de medição de vibração.

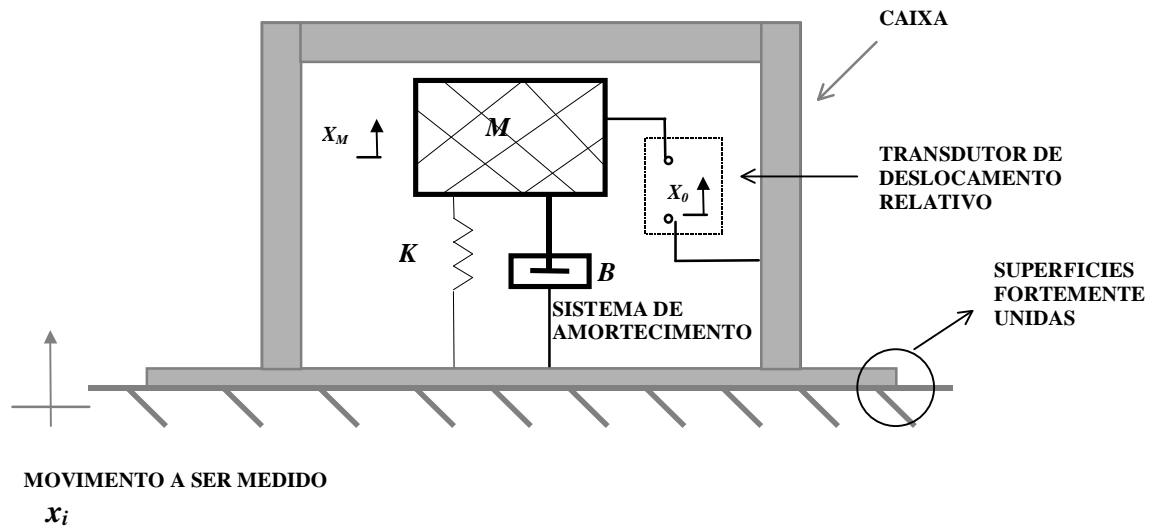


Figura 5.3 - Configuração básica de um acelerômetro

Um grande número de acelerômetros possui a configuração da Figura 5.3, diferenciando-se em detalhes como o elemento de mola usado, o tipo do transdutor empregado para a indicação do movimento relativo e o tipo de amortecimento utilizado. “...um amortecimento intencionado na escala de amortecimento $\zeta = 0,6$ para $0,7$ é geralmente empregado para se minimizar resposta de ressonância em transientes de baixa frequência” [Doeb 90].

Considerando-se que o parâmetro de entrada é a aceleração x_i'' a ser medida: [Doeb90].

$$\frac{x_0}{D^2 x_i} (D) = \frac{x_0}{x_i''} (D) = \frac{K}{D^2 / \omega_n^2 + 2\zeta D / \omega_n + 1} \quad (5.1)$$

onde:

x_0 : é o deslocamento relativo;

x_i : é o deslocamento absoluto;

x_i'' : é a aceleração;

K : constante da mola;

ζ : fator de amortecimento empregado para minimizar a resposta para transientes de baixa frequência;

ω_n ; é a frequência natural do sistema.

Sendo a tensão de saída $e_o = K_e \cdot x_o$, para muitos transdutores de movimento a equação (5.1) presta-se como a função de transferência para *aceleração - tensão*. Pode-se visualizar, também pela equação, que acelerômetros são instrumentos de segunda ordem. A resposta em frequência estende-se de zero até algumas frações de ω_n , dependendo da acuidade desejada e do amortecimento empregado. Como, $K \cong 1 / \omega_n^2$ a resposta em alta frequência deve ser tratada por *sensibilidade* [Doeb 90].

5.3.1. Tecnologia empregada na construção de acelerômetros

Freqüentemente se faz necessário conhecer o desempenho total de um sistema mecânico em termos de aceleração e massa. Isto é particularmente útil em situações onde é impossível determinar a natureza do mecanismo do sistema ou para se medir as forças aplicadas pelas partes constituintes do sistema.

Em aplicações onde acelerações estão para ser medidas, acelerômetros têm sido usados porque dispensam alimentações externas. A saída de um acelerômetro é, também, susceptível para se verificar conexões em cabos de ligação em interligações sujeitas a movimentações como é o caso das conexões para envio de dados de controle em aeronaves. Outra aplicação com grande acuidade é em monitores de abalos sísmicos.

A tecnologia implementada, as especificidades e características advindas do projeto de desenvolvimento podem direcionar os diversos tipos, possibilitar uma maior margem de escolha e atender necessidades de investigação atípicas.

A escolha apropriada do tipo de implementação deve ser baseado em características básicas, porém, importantes e decisivas para que se possa instrumentar um processo de forma a se obter o resultado ótimo. Pode-se considerar, dentre as existentes no campo de acelerômetros, como características básicas: a *sensibilidade* e a *resposta em frequência*.

A *sensibilidade* para um acelerômetro é definida como sendo a relação da saída elétrica pela energia mecânica aplicada à sua entrada. Esta relação é expressa em termos de tensão (V) por unidade de aceleração (g): [Allo 84]

$$\frac{m V (rms)}{g (rms)} \quad \text{ou} \quad \frac{m V (pico)}{g (pico)}$$

ou esta relação pode ser expressa em termos de sensibilidade de cargas, isto é:

$$\frac{p C (pico Coulombs)}{g}$$

A *resposta em frequência* é a mudança da sensibilidade básica de um acelerômetro quando uma aceleração de forma sinusoidal variando em frequência é aplicada na entrada do transdutor.

5.3.1.1. Acelerômetros piezoelétricos

Acelerômetros piezoelétricos são os transdutores de aceleração mais utilizados na proteção e monitoração de máquinas [Doeb 90]. Um acelerômetro piezoelétrico típico contém um ou mais elementos piezoelétricos, os quais podem ser naturais (cristais de quartzo, dentre outros) ou artificiais (polímeros piezoelétricos, por exemplo).

Acelerômetros piezoelétricos estão largamente em uso para medidas de choques e vibrações. Geralmente, tais tipos não fornecem um sinal de saída para acelerações constantes, por causa das características básicas funcionais dos transdutores de movimento piezoelétricos.

O princípio de exploração do efeito piezoelétrico neste tipo de acelerômetro usado em testes de vibrações é mostrado na Figura 5.4.

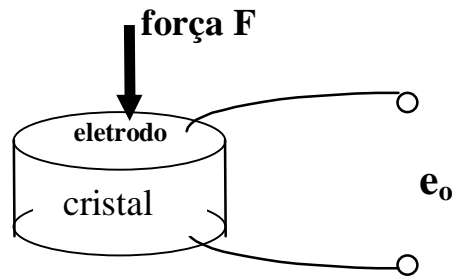


Figura 5.4 - Princípio de funcionamento de um Acelerômetro piezoelétrico típico

Consiste de um material cristalino que gera uma carga q quando uma força F é aplicada. Carga $q = d_{33} \cdot F$. Nestas condições a tensão e_o gerada entre as 2 faces do cristal é:

$$e_o = q / C = d_{33} \cdot F / C \quad (5.2)$$

onde d_{33} é a constante piezoelétrica e C é a capacitância do cristal.

Através da incorporação de uma massa em contato direto com o cristal, um transdutor de aceleração é construído. Quando uma variação de aceleração é aplicada para o conjunto massa-cristal, o cristal experimenta uma variação de força ($F = M \cdot a$), causando uma variação de cargas elétricas sobre o cristal.

$$q = d \cdot F = d \cdot M \cdot a \quad (5.3)$$

onde d a constante piezoelétrica e a carga elétrica q é diretamente proporcional à aceleração experimentada pelo transdutor. Devido à capacitância C do cristal, desenvolve-se uma tensão e entre os eletrodos.

$$e = q/C = dF/C \quad (5.4)$$

Os acelerômetros piezoelétricos, prosseguindo com suas características, provêm sinais de saída altos, podem ter tamanhos reduzidos, fator relevante em alguns casos de investigação dedicada, isto é, em aplicações que incorporam o transdutor ao meio investigado para permanente monitoramento. Podem apresentar frequências

naturais elevadas, que os capacitam para medição de impactos. O amortecimento, nesta categoria de acelerômetros, não é usado de maneira intencional, sendo a histerese do material a fonte de perda de energia a se considerar. O fator de amortecimento não é cotado pelos fabricantes, porém pode ser considerado como zero para muitos propósitos práticos. A característica resposta em frequência - sensibilidade é comumente encontrada como especificação típica para esta casta: um acelerômetro de impacto pode ter $0,004 \text{ pC} / \text{g}$ e frequência natural de 250 kHz, enquanto que, uma unidade projetada para medidas sísmicas de baixo nível tem $1000 \text{ pC} / \text{g}$ e 7 kHz. Encontra-se unidades pequenas, cerca de $3 \times 3 \text{ mm}$ de tamanho e $0,5 \text{ g}$ de massa incluindo cabos de interligação. Dispositivos sem dissipadores (“*uncooled*”) são encontrados para operarem sobre uma faixa de temperatura de $-268 \text{ }^\circ\text{C}$ a $+815 \text{ }^\circ\text{C}$ ($-450 \text{ }^\circ\text{F}$ a $+1500 \text{ }^\circ\text{F}$), exibindo tipicamente uma mudança de sensibilidade de $\pm 10 \%$ na faixa de $-73 \text{ }^\circ\text{C}$ a $+815 \text{ }^\circ\text{C}$ ($-100 \text{ }^\circ\text{F}$ a $+1500 \text{ }^\circ\text{F}$) e podem ser projetados para trabalharem em ambientes sujeitos à radiações, como em reatores nucleares.[Doeb 90].

Tem-se como função de transferência para acelerômetros piezoelétricos:

$$\frac{e_0}{\ddot{x}_i} (D) = \frac{[K_q / (C \cdot \omega_n^2)] \tau D}{(\tau D + 1) (D^2 / \omega_n^2 + 2\zeta D / \omega_n + 1)} \quad (5.5)$$

A resposta para baixas frequências é limitada pela característica piezoelétrica $\tau D / (\tau D + 1)$, enquanto que a resposta para altas frequências é limitada pela ressonância do mecanismo empregado na construção do acelerômetro. A precisão é de + 5% para altas frequências e - 5% nas mais baixas frequências. A precisão da resposta em frequência para baixa frequência exige grande constante de tempo τ , que é usualmente obtida com o uso de amplificadores de tensão de alta impedância ou de amplificadores de carga. Sistemas desenvolvidos para operarem abaixo de 1 Hz e sujeitos a transientes de temperatura podem exibir erros, pois devido ao efeito piezoelétrico uma saída de cargas ocorre em face de uma variação de temperatura na entrada do transdutor. Estas variações de temperatura na entrada são “entendidas” como transientes de baixa frequência. Devido a isto, são comuns projetos para minimizar os efeitos térmicos.

Projetos de acelerômetros piezoelétricos podem ser encontrados de muitas formas, objetivando atender características selecionadas e performance desejada para aplicações específicas. Pode-se citar como sendo a configuração mais elementar para um acelerômetro piezoelétrico a de compressão de um material.

Um acelerômetro de compressão, na sua forma mais simples, consiste em um disco de material piezoelétrico assentado sobre uma base e uma massa colocada sobre ele, conforme mostra a Figura 5.5.

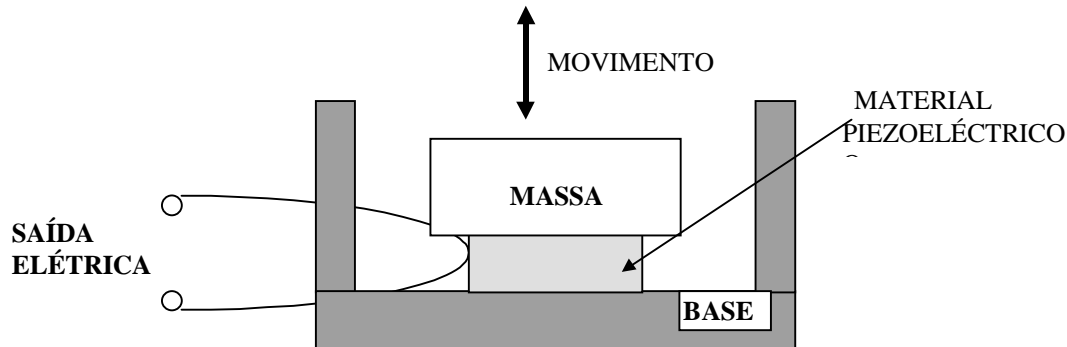


Figura 5.5 - Acelerômetro de compressão

Uma movimentação provoca forças compressivas que agem no elemento piezoelétrico, produzindo uma saída elétrica proporcional à aceleração. Nesta montagem, a massa está cementada (cementar = modificar as propriedades de metal combinado com outra substância sob a ação do calor), ao elemento piezoelétrico com um material condutor e, por sua vez, o elemento piezoelétrico está cementado à base. Os componentes devem estar firmemente cementados para que não se separem quando de uma aceleração aplicada.

O projeto de compressão pode ser considerado como o mais simples, o mais robusto e o que apresenta a melhor relação *sensibilidade/massa*, porém, por causa da sua simplicidade de construção em que o sensor atua como parte integral do sistema *massa/mola* é o mais sensível para interferências espúrias. Para acelerômetros piezoelétricos, estas incluem: temperatura, ruído acústico, deformação da base (tal deformação pode ser causada por esforços na superfície de cementação do elemento piezoelétrico), movimentos desordenados fora do eixo de direção de funcionamento previsto e por campos magnéticos.

A Figura 5.6 mostra outro exemplo de montagem, que é um sistema piezoelétrico sísmico típico que opera sob o princípio de flexão. A construção consiste em modelo no qual a massa é conectada a um balanço que é fixo em uma das suas extremidades. A aceleração faz o balanço fletir. A intensidade da flexão depende da rigidez do balanço e da massa. Em frequências bem abaixo da frequência de ressonância, a deformação de flexão é proporcional à aceleração aplicada ao conjunto. Uma tira de cerâmica piezoelétrica com eletrodos na parte superior e inferior é ligada ao balanço. A flexão para cima causa uma compressão no comprimento da cerâmica e a curvatura para baixo provoca uma tração. A deformação resultante na tira piezoelétrica gera uma tensão de saída elétrica proporcional à aceleração aplicada.

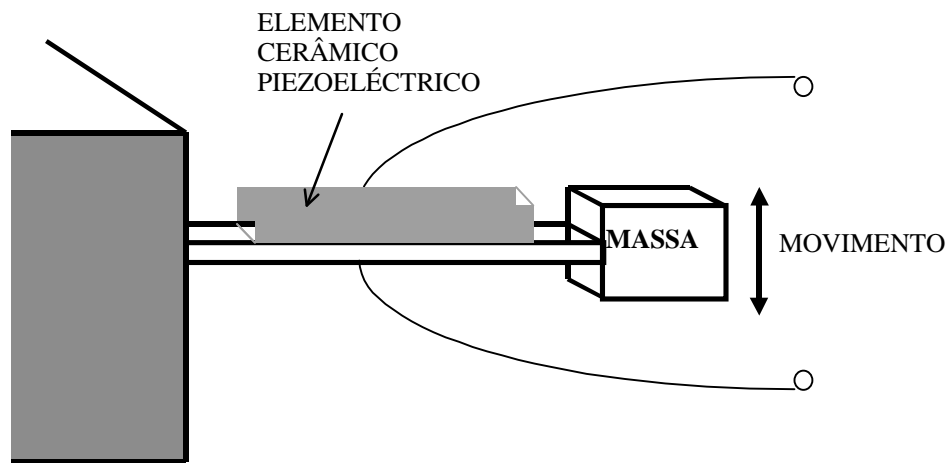


Figura 5.6 - Elemento piezoelétrico sísmico usado em um acelerômetro sob o princípio de flexão

Um outro arranjo para um acelerômetro pode ser visto na Figura 5.7. Este é do tipo fletor com duas saídas. O acelerômetro está apoiado em seu centro e possui uma massa ligada em cada uma das extremidades da tira metálica. Uma tira piezoelétrica é ligada em cada lado da tira metálica entre as massas. O apoio metálico para o elemento é conectado à saída. As duas tiras piezoelétricas externas são recobertas de prata e são orientadas de modo a gerarem cargas elétricas de mesma polaridade quando uma está em compressão e a outra em tração. Desta forma, as cargas se somam. Quando a

aceleração é aplicada ao arranjo, são produzidos simultaneamente esforços de compressão em uma das cerâmicas e de tração na outra.

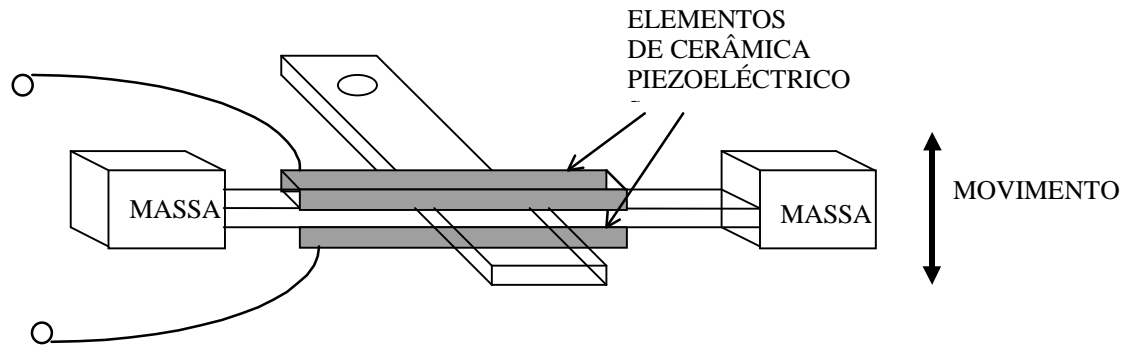


Figura 5.7 - Um acelerômetro fletor com duas saídas

Uma outra característica deste tipo de acelerômetro é que as saídas podem ser ligadas em série em vez de paralelo. Isto dobra a sensibilidade e reduz a capacitância de um fator igual a 4.

5.3.1.2. Acelerômetros usando filmes de polímeros piezoelétricos

As propriedades piezoelétricas do polímero piezoelétrico Poly (Vinylidene Fluoride) PVF_2 foram colocadas em evidência por H. Kawai [Kawa 69] em 1969 considerando filmes estirados (alongados) e polarizados. Os primeiros filmes comerciais apareceram no mercado somente em 1981.

Este polímero rapidamente despertou o interesse dos pesquisadores e da indústria devido aos seus fortes coeficientes piezoelétricos para um polímero. O PVF_2 tornou-se desde então um objeto importante de estudos, tanto no plano da compreensão e da obtenção do material, quanto sobre o plano das aplicações; transdutores de audiofrequência (microfones, hidrofones,...), sondas ultra-sônicas para ecografia, captadores de choque, captadores de pressão, detectores térmicos de presença, infravermelho, etc.

Obtido por polimerização do monômero $\text{CH}_2=\text{CF}_2$, (fluoreto de etileno) que apresenta um momento dipolar particularmente elevado, de ordem de $7,56 \cdot 10^{-30}$ C.m, o PVF_2 é constituído principalmente de correntes lineares e tem por fórmula $(\text{CH}_2-\text{CF}_2)_n$. O PVF_2 é um polímero semi-cristalino, isto é, apresenta uma fase cristalina e uma fase amorfa [Fase amorfa: (Fís/Quí) diz-se de um estado de agregação inteiramente isotrópico]. Como em todo polímero, a fase amorfa é constituída de correntes moleculares desordenadas que representam aproximadamente a metade do material e determinam o essencial de suas propriedades mecânicas. A fase cristalina pode apresentar quatro estruturas distintas sendo três polares (β , γ , δ) e uma não polar (α). A partir da estrutura cristalina centrosimétrica, que não apresenta propriedades piezoeléctricas, pode-se passar para uma estrutura não centrosimétrica (β) por estiramento uniaxial ou biaxial ou por compressão sob alta pressão hidrostática e em seguida por aplicação de um campo eléctrico intenso. Dentre as fases a que tem relevância, neste particular, é a fase β pois ela é a que apresenta a maior atividade piezoeléctrica.

Destaca-se que, independentemente da fase polar obtida, o momento dipolar de cada cristalito é orientado de modo aleatório no material, de forma que sua polarização microscópica é nula. Assim, para haver uma boa atividade piezoeléctrica e piroeléctrica, o PVF_2 orientado, na fase β , deve ser polarizado eletricamente; trata-se de orientar a polarização ferroeléctrica dos cristalitos no sentido do campo aplicado perpendicularmente no plano do filme. Existem vários métodos de polarização. Um dos mais correntes consiste em aplicar uma alta tensão, da ordem de centenas de volts, entre os eletrodos depositados de um lado e de outro do filme polímero.

O PVF_2 na fase β é comercializado sob forma de filmes, de alguns microns de espessura, por fabricantes como SOLVAY, PENNWALT, KUREHA, e THOMSON-CSF. Geralmente, ele é vendido polarizado e recoberto por uma camada metálica de alumínio com uma camada de cromo para fixação.

Deduz-se que, para ser utilizado por seus efeitos piezoeléctricos, o PVF_2 deve ser orientado mecanicamente, polarizado eletricamente e estabilizado termicamente. O tratamento mecânico orienta preferencialmente o eixo das correntes macromoleculares no sentido do estiramento e provoca a transição da fase α para a β . A polarização eléctrica permite obter um alinhamento dos dipolos permanentes da fase cristalina no sentido do campo aplicado. O recozimento garante a estabilização do material, suas

dimensões geométricas e também suas propriedades piezoelétricas por relaxamento das compressões produzidas durante o estiramento e a polarização.

Estas propriedades piezoelétricas (e piroelétricas) dependem fortemente da polarização remanescente do material. Condições apropriadas de preparação (parâmetros de estiramento ou de laminação e polarização elétrica) permitem obter uma forte polarização remanescente e favorecem assim os efeitos piezoelétricos e piroelétricos do polímero.

As origens físicas das propriedades piezoelétricas (e piroelétricas) destes materiais ficaram por muito tempo controvertidas. Numerosos modelos têm sido propostos afim de explicarem estas propriedades. O modelo correntemente admitido é o de cristalitos ferroelétricos mergulhados em uma matriz amorfa. Propõe que a atividade piezoelétricas (e piroelétrica) destes materiais provém ao mesmo tempo das variações:

- de suas dimensões geométricas, devidas à compressão ou à temperatura;
- da polarização dos cristalitos devidas à compressão ou à temperatura (efeitos intrínsecos);
- de permitividade devida à deformação (efeitos de eletrostrição).

5.3.1.2.1. Vantagens dos Polímeros em relação às Cerâmicas

Os sensores cerâmicos apresentam dificuldades para serem produzidos em tamanhos grandes e são impraticáveis para trabalhar em formas complexas. Os sensores cerâmicos são frágeis e rígidos por isso requerem uma superfície plana para serem montados. São susceptíveis a choques mecânicos ou vibrações. Ao contrário, os sensores polímeros são facilmente fabricados em grandes folhas e podem ser cortados ou dobrados em formas atípicas sem prejuízos para o filme sensor.

Em muitas aplicações uma grande quantidade de transdutores complexos é substituído simplesmente colando-se o filme sensor no ponto de investigação, conformando-o na forma desejada. Polímeros tem uma alta tolerância a pressões mecânicas e assim não são danificados tão prontamente como ocorre com sensores cerâmicos. Polímeros, em geral, tem uma banda passante (BW) larga com baixo Q

(fator de ressonância), entretanto transdutores cerâmicos apresentam alto Q. São leves e podem ser produzidos em muitos filmes finos, podendo ser agrupados sem comprometer os movimentos mecânicos dessas montagens. Apresentam baixa impedância acústica em relação às cerâmicas, o que faz deles excelentes transdutores para o meio líquido (hidrofonos). Polímeros piezoelétricos apresentam, também, algumas desvantagens em relação às cerâmicas. As maiores desvantagens são os baixos coeficientes piezoelétricos e fatores de ligações eletromecânicas. Também a constante g piezoelétrica é maior no PVF₂, que nas cerâmicas, sendo mais difícil polarizar uma peça espessa, sendo, então, necessário para se obter uma produção de alta voltagem uma multicamada de filmes.

Materiais polímeros estão sujeitos a fenômenos mecânicos de relaxação quando submetidos a pressão por um longo tempo. Isto pode causar problemas quando medições estáticas são tentadas. O PVF₂ é despolarizado termicamente quando aquecido acima de 90 °C, por longo tempo e pelo uso do polímero acima desta temperatura. Conclui-se que o PVF₂ e seus copolímeros P(VF₂-VF₃) são utilizados em diversos domínios como captadores ou transdutores. Eles se confirmam bem adaptados cada vez que uma, ao menos, de suas propriedades intrínsecas é explorada: grandes superfícies, pequenas espessuras, possibilidades de fundição e de termo-moldagem, funcionamento possível em membranas ativas, forte amortecimento interno, baixa impedância acústica, sensibilidade elevada em tensão, etc.

5.3.1.3. Acelerômetros utilizando potenciômetro resistivo

São recomendados para se medir acelerações que variam lentamente ou para vibrações em baixa frequência. Uma típica família desta tecnologia oferece modelos que cobrem uma faixa desde $1g$ até $50g$ para plena escala. Apresentam opções para a frequência natural de 12 Hz até 86 Hz e ζ de 0,5 a 0,8 para temperaturas dentro da faixa de -53,88 °C e +73,88 °C (-65°F e +165 °F). A resistência dos potenciômetros pode ser selecionada desde 1 k Ω até 10 k Ω , com uma resolução de 0,45 a 0,25 % do fundo de escala. A sensibilidade para a aceleração assegurada pelo fabricante em ângulos retos ao eixo desejado (“*cross-axis-sensitivity*”) é menos que ± 1 % da sensibilidade para a direção desejada. A vida útil é de 2.000.000 ciclos. A incerteza total é de ± 1 % do

fundo de escala e tende a ser menor para operação em ambiente fechado. Pode ocorrer um acréscimo para $\pm 1,8 \%$ se a operação for fora da faixa de temperatura projetada. Oferece-se modelos de 50 mm^2 de área e 450 g de peso [Doeb 90].

5.3.1.4. Acelerômetros empregando extensômetro (“strain-gage”)

É usado um extensômetro colado ao elemento de mola como sendo o transdutor de movimento. São dispositivos de propósitos gerais destinados a medir movimentos e vibrações desde zero até altas frequências. Estão disponíveis em uma grande variedade de características. São valores típicos nesta espécie $5g$ a $200g$ e frequência natural de 17 Hz até 800 Hz. São excitados a partir de tensões de 10 V ou por corrente direta. Produzem como saída tensões de $\pm 20 \text{ mV}$ a $\pm 50 \text{ mV}$. Trazem resoluções menores que $\pm 1 \%$ do fundo de escala ou melhor. A sensibilidade é melhor que 2% e o fator de amortecimento, usando óleo de silicone, é de 0,6 a 0,8 para operação em ambiente fechado. Também dispõe-se de modelos com compensadores de temperatura. Podem ser construídos em tamanhos reduzidos e leves. Um tamanho típico, para exemplo é $\frac{1}{2} \times \frac{1}{2} \times 50 \text{ mm}$ e peso de 26 g.

Geralmente usam uma massa presa a uma fina lâmina flexível, na qual os extensômetros são colados. A massa presa e a espessura da lâmina contribuem para que se obtenha a máxima sensibilidade do conjunto. A distribuição dos extensômetros segue uma configuração que visa compensar possíveis variações de temperatura.

A configuração lâmina flexível com uma massa presa na ponta para facilitar o fletir do conjunto, proporciona saídas altas de tensão de 0,2 a 0,5 V.

5.3.1.5. Acelerômetros usando transformador diferencial

Esta classe de acelerômetros apresenta-se com frequência natural de 35 Hz a 620 Hz, varia de $\pm 2g$ a $\pm 700g$, não linearidade de 1% para fundo de escala, saída em torno de 1 V para excitações de 10 V em 2 kHz, fator de amortecimento de 0,6 a 0,7 em $20 \text{ }^\circ\text{C}$, tensão residual em “null” menor que 1% do fundo de escala e histerese, também menor que 1% de fundo de escala. Quanto as dimensões, possuem aproximadamente 50 mm^2 de tamanho e 100 g de peso.

5.3.1.6 Acelerômetro de estado sólido

Acelerômetro em “*chip*” biaxial de baixa potência. O acelerômetro de estado sólido pode medir acelerações dinâmicas (vibração) e aceleração estática (gravidade). Tem-se nas saídas (eixos x e y) do acelerômetro um sinal digital cuja informação da aceleração é o tempo de duração de um sinal “*duty cycle*”. As saídas podem ser lidas diretamente por um contador microprocessador não requerendo um conversor A/D.

5.3.1.6.1 Características do ADXL 202 da Analog Devices (acelerômetro utilizado no método):

- ✓ Acelerômetro biaxial em um “*chip*”.
- ✓ Mede aceleração estática como também aceleração dinâmica.
- ✓ Saída do “*duty-cycle*” com período ajustável..
- ✓ Baixo consumo <0.6 mA.
- ✓ Sensor de inclinação.
- ✓ Ajuste da banda passante com um capacitor por eixo.
- ✓ 5 m g de Resolução a 60 Hz.
- ✓ Tensão de operação de +3 V a +5.25 V.
- ✓ Resiste a choques de até 1000 g.
- ✓ O período de saída é ajustável de 0.5 ms para 10 ms por um único resistor (RSET).
- ✓ A banda passante do ADXL202 pode ser ajustada de 0.01 Hz para 5 kHz através dos capacitores CX e CY.
- ✓ ADXL202 está disponível em uma hermética 14-lead Surface Mount Cerpak, especificado para temperaturas de 0°C a +70°C comercial ou -40°C a +85°C industrial.

5.3.1.6.2. Teoria de operação do ADXL 202

O ADXL202 é um completo sistema biaxial para medida de aceleração em apenas um “*chip*” monolítico. Possui um “*polysilicon surface-micromachined sensor*” e um circuito de condicionamento de sinal que implementa uma arquitetura de medição de aceleração em “*loop*” aberto. Para cada eixo, um circuito de saída converte o sinal analógico para um “*duty cycle*” modulado DCM (sinal digital que pode ser decodificado com um contador de tempo em um microprocessador).

O ADXL202 é capaz de medir acelerações positiva e negativa para um nível de máximo de ± 2 g. O acelerômetro mede acelerações de forças estáticas, como gravidade, o que permite seu uso como um sensor de inclinação. O sensor é uma estrutura de superfície de polisilício cristalino micro usinado construída no topo do pastilha de silício. Camadas de “*Polysilicon*” suspendem a estrutura em cima da superfície da pastilha produzindo uma resistência contra as forças de aceleração. A deflexão da estrutura é medida usando um capacitor diferencial que consiste de placas independentes fixadas e placas centrais presas à massa móvel. Uma aceleração irá deflexionar a viga e desbalancear o capacitor diferencial, resultando na saída uma onda quadrada cujo tempo de duração é proporcional a aceleração.

Técnicas de modulação em fase são então usadas para retificar o sinal e a direção da aceleração. A saída do demodulador é conduzida para um modulador “*duty cycle*”, através de um resistor de 32k ohms. Nesta etapa um pino está disponível em cada canal para permitir o ajuste da largura de banda do dispositivo através de um capacitor. Esta filtragem melhora a exatidão da medida e ajuda a prevenir “*aliasing*”. Depois de ser filtrado por um filtro passa-baixa, o sinal analógico é convertido em um sinal “*duty cycle*”. Um único resistor ajusta o período do ciclo completo (T_2), que pode ser ajustado entre 0.5 ms e 10 ms (veja Figura 5.9). Uma aceleração de 0 g produz nominalmente 50% do “*duty cycle*”. O sinal de aceleração pode ser determinado medindo a duração dos tempos T_1 e T_2 (Figura 5.10). Uma tensão de saída analógica também pode ser obtida memorizando o sinal dos pinos de XFILT e YFILT, ou passando o sinal do “*duty cycle*” por um filtro RC para reconstruir o valor dc. O ADXL202 opera com tensões de 3 V (mínima) a 5,25 V (máxima).

5.3.1.6.3. Interfaces com o Microcomputador

O ADXL202 foi especificamente projetado para trabalhar com microcontroladores. O projeto considera a performance requerida pelo sistema em termos de:

- Resolução: a menor mudança do sinal precisa detectada.
- Faixa de frequência deve ser detectada.
- Tempo de aquisição: o tempo disponível para adquirir o sinal em cada eixo.
- Estes requisitos ajudarão determinar a banda passante do acelerômetro, a velocidade do oscilador do microcontrolador e a duração do período T2.

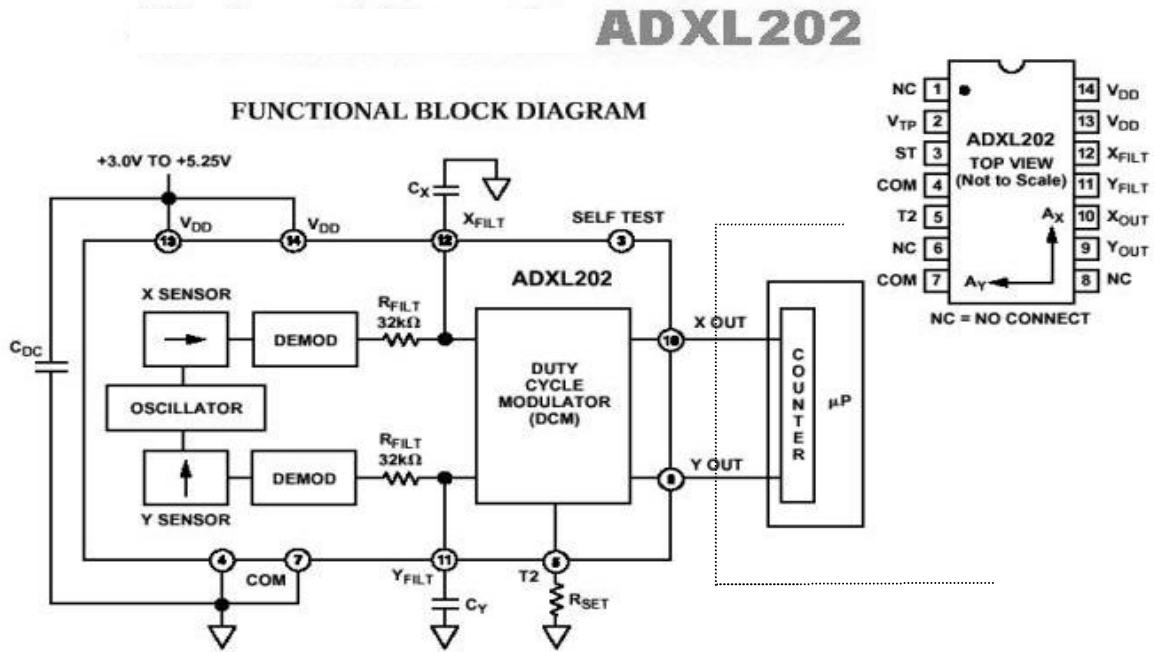
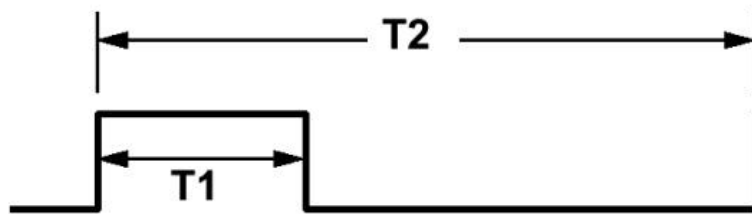


Figura 5.8- Diagrama esquemático do acelerômetro ADXL 202 (extraído do manual da Analog Device)

Sinal PWM



$$A(g) = (T1/T2 - 0.5)/12.5\%$$

$$0g = 50\% \text{ DUTY CYCLE}$$

$$T2 = R_{SET}/125M\Omega$$

*Figura 5.9 – Sinal “Duty Cycle”
com a informação de aceleração*

6. O MÉTODO PROPOSTO

O objetivo do método proposto é monitorar o estado de funcionamento de máquinas rotativas, detectando modificações incipientes. Entende-se como modificação incipiente, mudança do estado de funcionamento nas máquinas rotativas tendo como referência o padrão de normalidade de funcionamento estabelecido para a máquina. No presente trabalho este padrão de normalidade é estabelecido pelo espectro de vibração da máquina. A alteração incipiente não caracteriza ainda um defeito, porém se não tratada poderá desencadear uma falha de funcionamento

Seguindo a concepção da modalidade de manutenção preditiva, na detecção de qualquer alteração e através do acompanhamento desta, será possível prever a evolução e programar uma parada para manutenção ou ajustes, além de se estar poupando demais partes ou componentes da máquina. Pode-se citar como exemplo, vivenciado em uma etapa da pesquisa, aonde se monitorava o desbalanceamento de um eixo. O desbalanceamento causou a ruptura do eixo além de ter comprometido os rolamentos que o suportavam.

O método para a detecção de falhas incipientes e diagnóstico do estado de funcionamento baseia-se na aquisição e análise de vibrações da máquina, através das quais se estabelece um padrão de vibração para a máquina em estado de funcionamento normal, denominado assinatura espectral do sistema.

De acordo com YA' CUBSOHN [Ya`C 83], o desbalanceamento de um sistema rotativo apresenta uma vibração de interesse na frequência de rotação do sistema girante. Um sistema mecânico pode apresentar muitos modos de vibração e muitas frequências principalmente se for complexo, contendo várias partes girantes ou oscilantes. Neste experimento o sistema rotativo usado possui duas partes girantes, com frequências diferentes e aproximadamente constantes.

6.1. Detecção de falha

Não basta medir a frequência de cada um dos componentes da vibração para detectar a falha, deve-se, uma vez conhecido o valor absoluto, relacioná-lo com a velocidade de giro do eixo. Portanto, o conhecimento da velocidade de rotação do eixo ou do sistema rotativo, em questão, se torna necessário para o diagnóstico de falhas.

A velocidade de rotação do eixo pode ser determinada usando-se um tacômetro ou um sistema estroboscópico. No presente trabalho, utiliza-se um tacômetro mecânico (MICROTEST L20) e um tacômetro ótico (RS) para a verificação da frequência de rotação do eixo.

A Tabela 6.1, relaciona as variáveis frequência de rotação, amplitude e a causa das vibrações, sugerindo quais grandezas (**deslocamento, velocidade ou aceleração**) devem ser monitoradas.

Tabela 6.1 : Relação entre variáveis e causas de vibração [Ya`C 83]

CAUSA	FREQÜÊNCIA	VARIÁVEL	AMPLITUDE	OBSERVAÇÃO
Desbalanceamento	1 X rpm	d	Proporcional ao desbalanceamento. Maior no sentido radial	Geralmente aparece no primeiro harmônico
Desalinhamento ou eixo torto	1/2/3/4 X rpm	d	Grande em direção axial (maior que 50% da amplitude, radial)	Desalinhamento entre mancais ou entre ambas metades do "manchón"
Folga nos mancais	½ X rpm	d	Grande no sentido vertical	Como a frequência é menor que ½ rpm a fase pode ser variável
Falta de firmeza mecânica	2 X rpm	d	Instável	Geralmente afeta o alinhamento
Correias frouxas	1 X rpm	d	Instável	
Engrenagens defeituosas	alta, número de dentes X rpm	a/d	"blips"	Frequência entre 15000 e 40000 rpm
Almofadas antifrrição deterioradas	Alta	a	"blips"	A frequência alcança valores maiores do que os registrados para engrenagens ou rolamentos
Rolamentos deteriorados	Alta	a	"blips"	Frequência entre 15000 e 40000 rpm
Lubrificação	Alta	a	-	A amplitude se modifica notadamente em função da lubrificação
Eixo torcido	1 X rpm	d	Grandes valores no sentido axial	A amplitude pode se apresentar de forma pulsátil

Tem-se como objetivos neste trabalho a pesquisa, o desenvolvimento e a proposição de um método para se instrumentar sistemas onde o meio a ser investigado é a vibração de máquinas rotativas. O procedimento permite diagnosticar a operação da máquina com fins de executar uma manutenção preditiva.

O método proposto possibilita a investigação em qualquer sistema rotativo, bastando para isto a correta especificação de cada etapa, como se segue:

1. Estudo das peculiaridades do ambiente (*escala da vibração*), para que: se instrumente de forma ótima e balize a tecnologia adequada para o caso.

2. Especificação do *transdutor de vibração*, visando atender as características sensibilidade e resposta de frequência que o processo exige.

3. *Condicionamento do sinal* gerado pelo transdutor de vibração adequando-o para ser processado, amostrado e registrado, permitindo posteriormente a definição do comportamento do sistema.

4. *Aquisição dos dados* fornecidos pelo transdutor, abrangendo a faixa de frequência desejada e *o processamento* de tal maneira que se meçam e se estabeleçam parâmetros de referência (assinatura espectral do sistema), para um acompanhamento das modificações que possam ocorrer em virtude de alterações do estado operação da máquina. A idéia é *estabelecer padrões de funcionamento* e faixas de operação aceitáveis, sendo que, indicações de vibração fora das faixas estabelecidas indicam que a máquina ou o componente sob investigação está desviando-se do padrão normal de operação (falha incipiente). Evita-se desta maneira a evolução da falha o que poderia resultar em uma avaria.

5. Estabelecimento das *regras Fuzzy* (regras de inferência), correspondentes aos limites de funcionamento e detecção pretendidos para se chegar ao diagnóstico. O sistema *Fuzzy* deve ser calibrado a partir dos valores adquiridos (frequência de rotação e amplitude de vibração na frequência de rotação), e dos limites determinados para cada estado de funcionamento do sistema.

Para modelar o método em proposição, recorre-se ao método sugerido em DOEBELIN [Doeb 90], que descreve o funcionamento de medidores ou sistemas de medição em termos de estágios funcionais e a performance considerando-se as características estáticas e dinâmicas das etapas.

A Figura 6.1 especifica o processo proposto e as Figuras 6.2, 6.3, 6.4 e 6.5 detalham as etapas do mesmo.

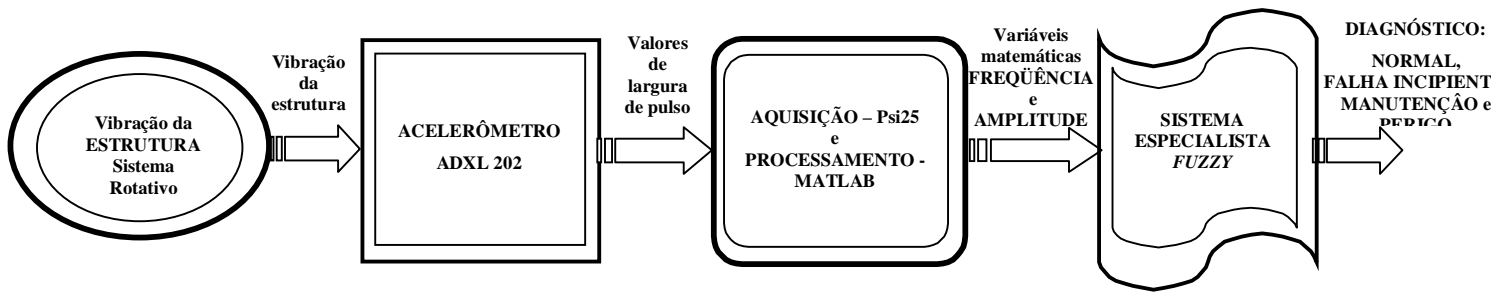


Figura 6.1 – Especificação do método em proposição

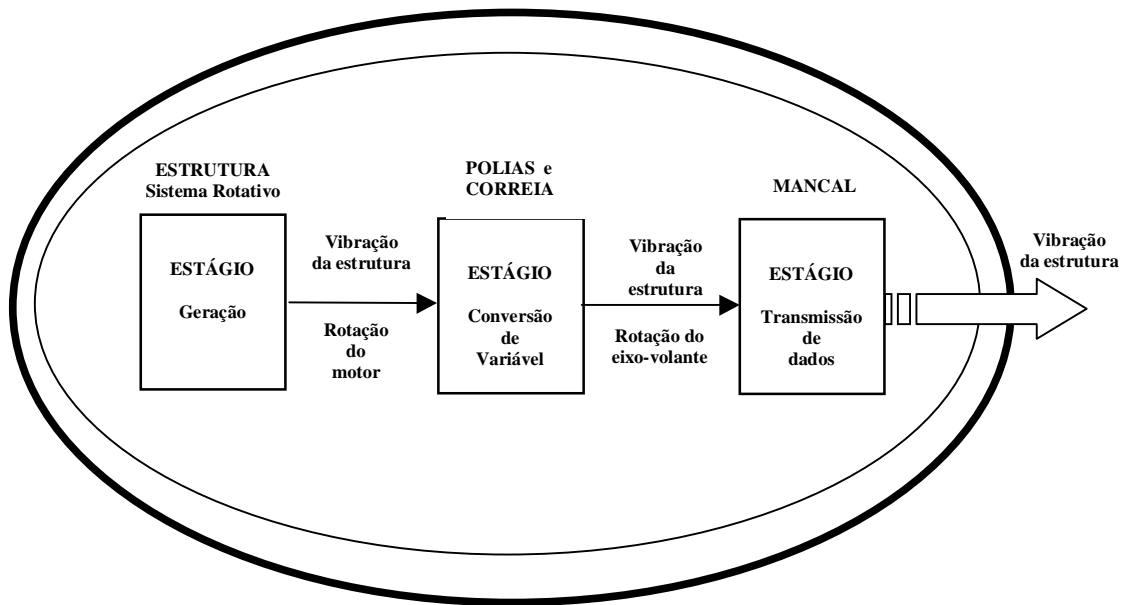


Figura 6.2 – Especificação da etapa referente a estrutura

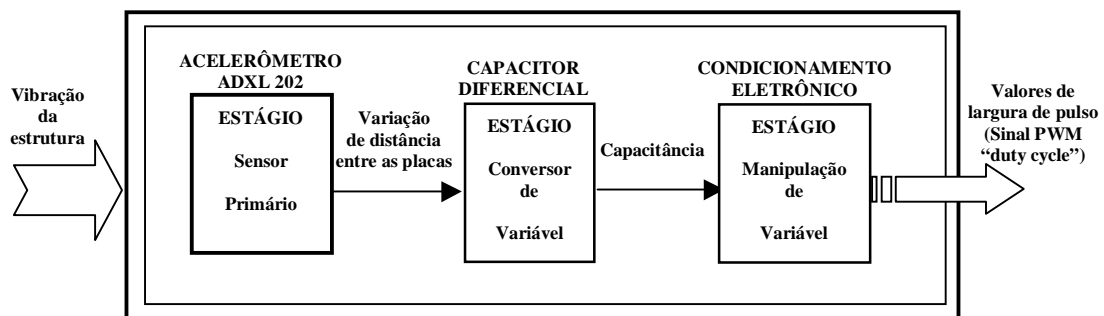


Figura 6.3 – Especificação da etapa referente ao acelerômetro

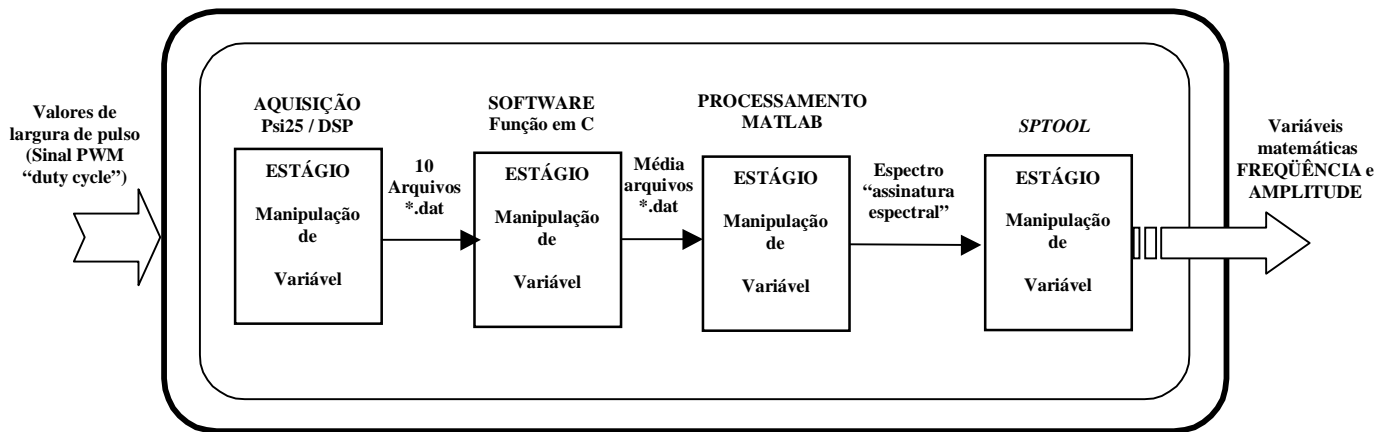


Figura 6.4 – Especificação da etapa referente a aquisição e processamento

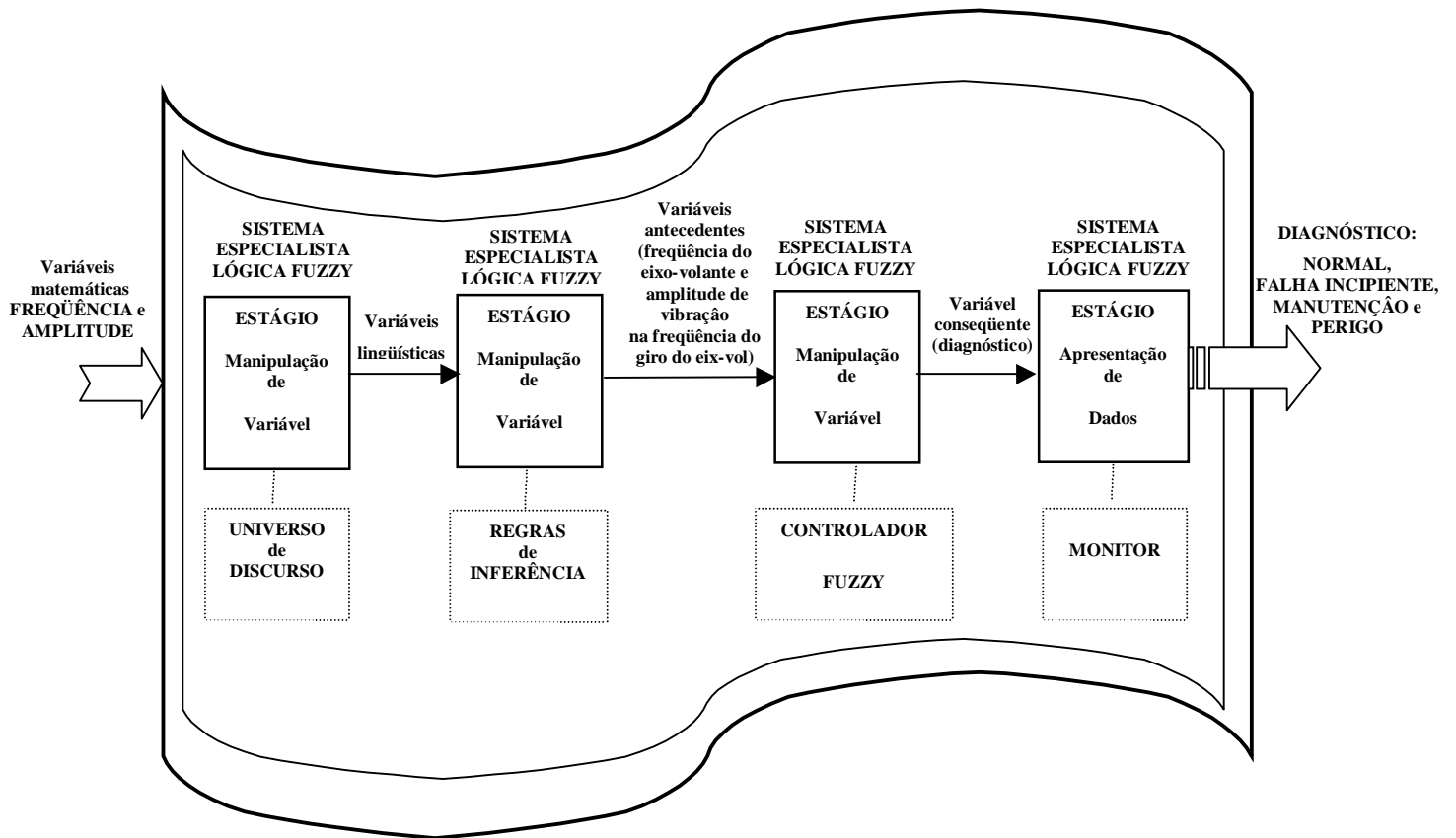


Figura 6.5 – Especificação da etapa referente ao sistema Fuzzy

6.2. O Sistema Rotativo

Utiliza-se um sistema rotativo (Figura 6.6), composto de um motor AC com rotação nominal de 1800 rpm e um par de polias, cuja relação é 1:1,3. As polias e uma correia acionam um eixo que mantém na extremidade oposta à da polia um disco metálico (volante) de 15 cm de diâmetro e 1012 g de massa, aqui denominado eixo-volante. O eixo-volante é sustentado em mancais com buchas de bronze. A rotação do eixo-volante é medida com a utilização de um tacômetro mecânico: MICROTTEST L20 que indica 2365 rpm e por um tacômetro ótico: RS que registra 2390 rpm.

O motor é alimentado por uma tensão de 127 Vac, regulada por um estabilizador de tensão, tentando-se evitar desta forma quaisquer variações de rotação por flutuações na tensão de alimentação.

O Sistema Rotativo é mantido sobre uma superfície de borracha para fins de amortecimento do conjunto. A ausência da superfície amortecedora ocasiona um aumento na vibração de todo o conjunto mecânico e tal aumento é prejudicial para o bom funcionamento do sistema. Isto será discutido no item 7.6. deste trabalho.

Segundo YA`CUBSOHN [Ya`C 83], pode-se dividir as falhas em duas classes genéricas: as de baixa frequência (por exemplo: desbalanceamentos, desalinhamentos, etc.) e as de alta frequência (tais como: rolamentos deteriorados, falta de lubrificação, etc.). O autor considera para fins de classificação falhas de baixa frequências àquelas que apresentam modificações e portanto podem ser observados no espectro, até 5 vezes a frequência de rotação do sistema girante. Temos no presente trabalho como frequência de giro do eixo_volante, o qual é monitorado, 38,5 Hz. Então nos interessa monitorar frequências até aproximadamente 200 Hz.

Tem-se que, quaisquer modificações ocorridas devido a desbalanceamento, desalinhamento, jogo excessivo, falta de rigidez, acoplamento defeituoso, correias frouxas ou gastas, eixos deformados, etc, alterará a amplitude da vibração na frequência de rotação do sistema rotativo em questão [Ya`C 83]. Tais falhas podem ser classificadas como uma família de falhas de baixa frequência e aqui são nomeadas como desajustes.

Uma das dificuldades em detecção de falhas em motores é a grande dimensão física dos motores. Existem muitas variáveis que podem afetar o processo de detecção e identificação de falhas, tais como: condições de carga, efeitos de saturação, condições de operação imprevisível, ruídos de linha e efeitos de temperatura, os quais podem

resultar em diversas hipóteses pelas diferentes possibilidades de combinações destas variáveis [Mech 93].

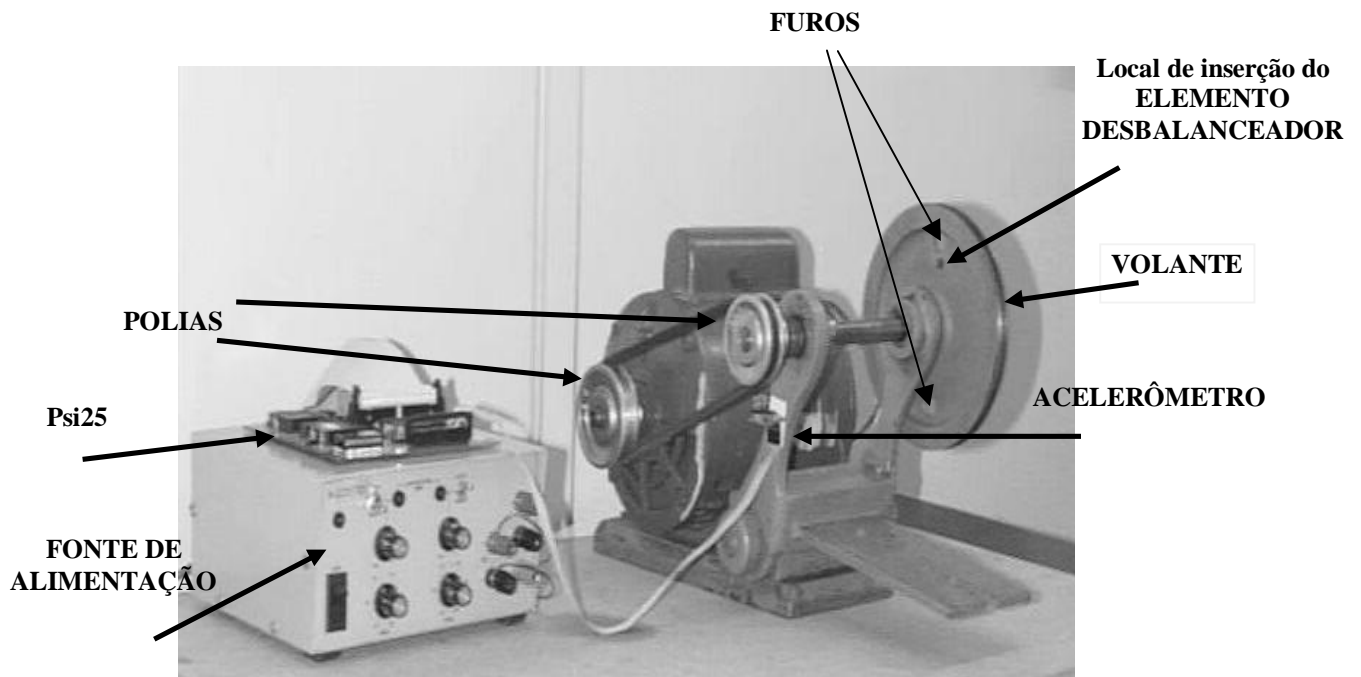


Figura 6.6 - O Sistema Rotativo

O eixo-volante, Figura 6.7 possui um furo no qual se inserem elementos desbalanceadores, ocasionando diferentes graus de desbalanceamento no sistema rotativo. Os elementos desbalanceadores utilizados possuem 0,1; 5,1g e 7,2g. A relação de massa entre o volante e o menor elemento desbalanceador é de 1:10000 (lembrando, o volante pesa 1.012 g e o menor elemento desbalanceador 0,1g).

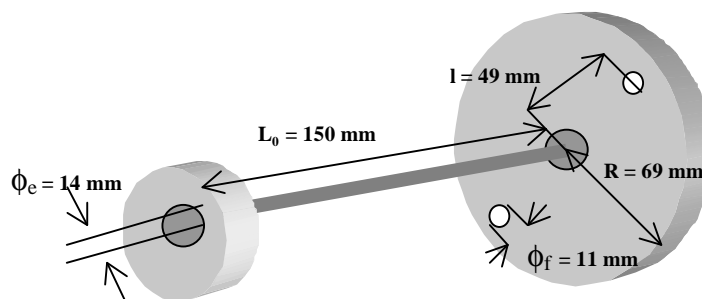


Figura 6.7 - O eixo-volante

Adota-se, baseado na ABNT [NBR 83], que a modificação no estado de funcionamento do Sistema Rotativo, ocasionada pela inserção do elemento desbalanceador de 0,1 g, não caracteriza um defeito de funcionamento e sim uma modificação aceitável dentro dos padrões de normalidade do sistema. Tal modificação entende-se como uma falha incipiente, a qual sinaliza uma alteração no estado de operação da máquina que deverá ser monitorada.

As relações de massa dos demais elementos desbalanceadores são estabelecidas segundo um critério adotado para a classificação do diagnóstico oferecido pelo sistema especialista *Fuzzy*: 0,1 g => **FALHA INCIPIENTE**; 5,1 g => **MANUTENÇÃO**; 7,2 g => **PERIGO**.

Os valores acima citados são específicos para este equipamento. Cada instalação tem seus parâmetros de operação e faixas de tolerância. O método proposto tem uma fase de sintonia do sistema de supervisão, chamada de “calibração do sistema especialista *Fuzzy*”, na qual são estabelecidas as condições de operação.

6.3. A assinatura espectral do sistema

Para se chegar ao padrão de vibração, denominado assinatura espectral do sistema (Figura 6.8), foram feitas aquisições diárias da vibração durante 30 dias (número arbitrado) de funcionamento do sistema (Figura 6.9). Partimos do pressuposto que o referido sistema estava em condições ideais de operação. Para isso o sistema (Sistema Rotativo) passou por um processo de “ajuste”, onde foram substituídos componentes que apresentavam desgastes e folgas, ajustado e lubrificado por um especialista. Uma função desenvolvida em C encontrou a média das aquisições, a qual é considerada a assinatura espectral do sistema. Desta forma, leva-se em conta as possíveis variações que possam ocorrer em um regime constante de funcionamento e até mesmo no desligar e religar o sistema para a inserção das falhas. Não foram inseridas as avarias de desbalanceamento com o sistema em funcionamento. As falhas introduzidas nesta simulação são desbalanceamentos no eixo-volante através da inserção de elementos desbalanceadores.

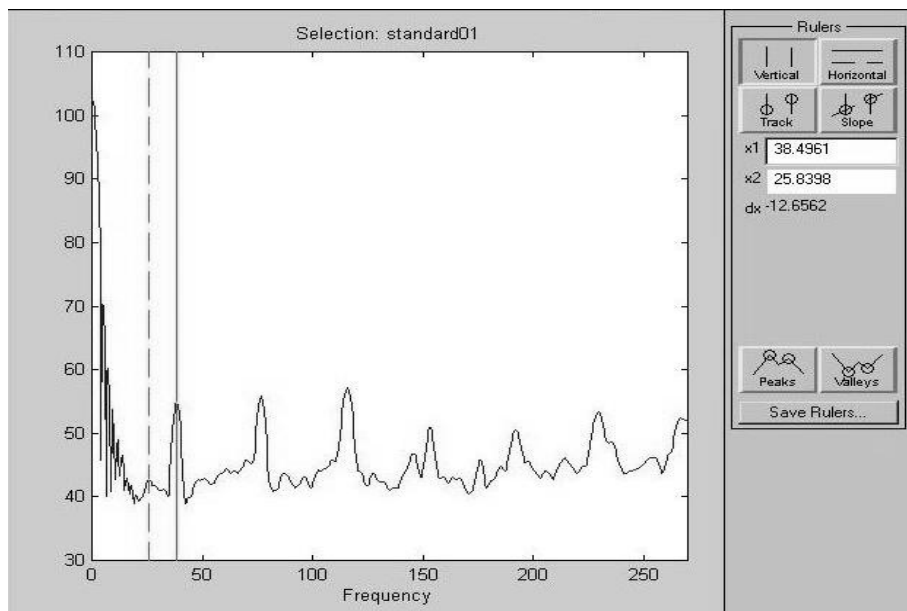


Figura 6.8 – Assinatura espectral do Sistema Rotativo (ordenadas em escala logaritmica)

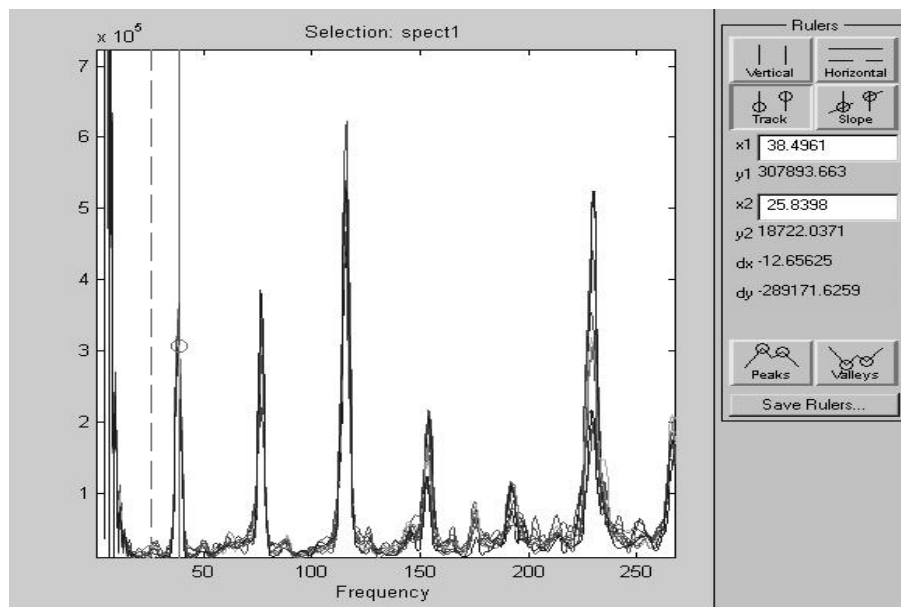


Figura 6.9 – Espectrograma com o grupo de 30 aquisições (ordenadas em escala linear)

6.4. O processamento com Matlab

O método proposto, está separado por estágios e operacional em ambiente Matlab (Figura 6.10). É possível executá-lo por passos:

- ✓ aquisição dos dados (*.dat),
- ✓ média das aquisições,
- ✓ determinação e plotagem da assinatura espectral,
- ✓ busca de valores de amplitude na frequência de giro do sistema rotativo e análise e diagnóstico *fuzzy*.

O sistema permite ainda: execução de todas as etapas a partir de um comando “automático”, seleção do tempo de aquisições, escolha da quantidade de aquisições, determinação da faixa de frequência para análise e calibração de todo o sistema *fuzzy*. O processo no modo automático, desde as aquisições até o diagnóstico, decorre em aproximadamente 2 min numa máquina PENTIUM 100 M Hz com 24 MB de memória RAM.

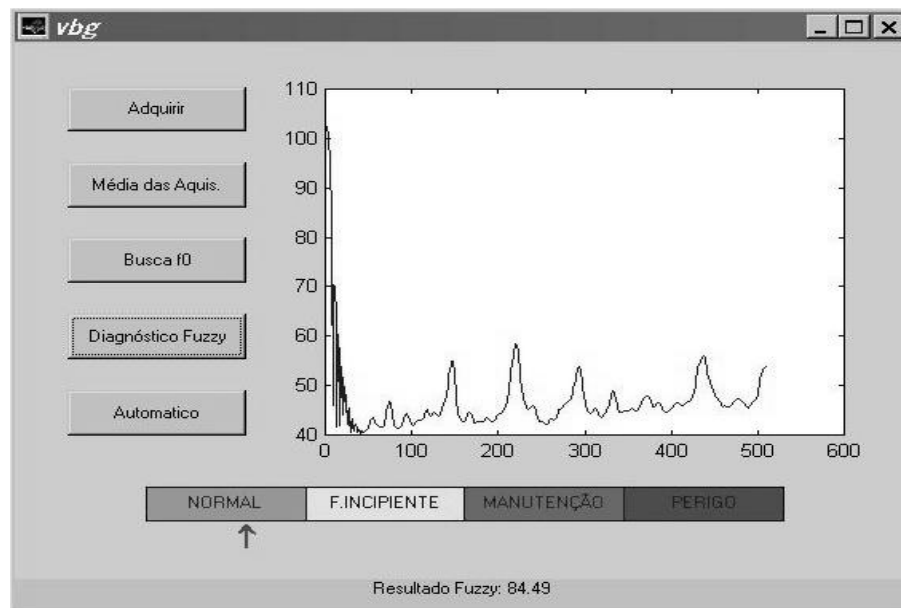


Figura 6.10 – O método em ambiente Matlab

A análise no domínio frequência é feita com a utilização do programa SPTOOL do Matlab, que permite, dentre outras facilidades o enjanelamento da faixa de frequência pretendida para a análise e monitoramento. Tem-se que, quaisquer modificações ocorridas devido ao desbalanceamento se fará sentir com mudanças de amplitude de vibração na frequência de rotação do sistema rotativo em questão [Ya`C 83]. Daí a análise neste ponto do espectograma.

6.5. A aquisição de dados

Como já se descreveu anteriormente, nos métodos que usam sensores de velocidade e acelerômetros, Capítulo 5, a forma de investigação da grandeza vibração se faz acoplando-se mecanicamente o transdutor à “peça” cuja vibração se deseja captar. Veja Figura 6.11.

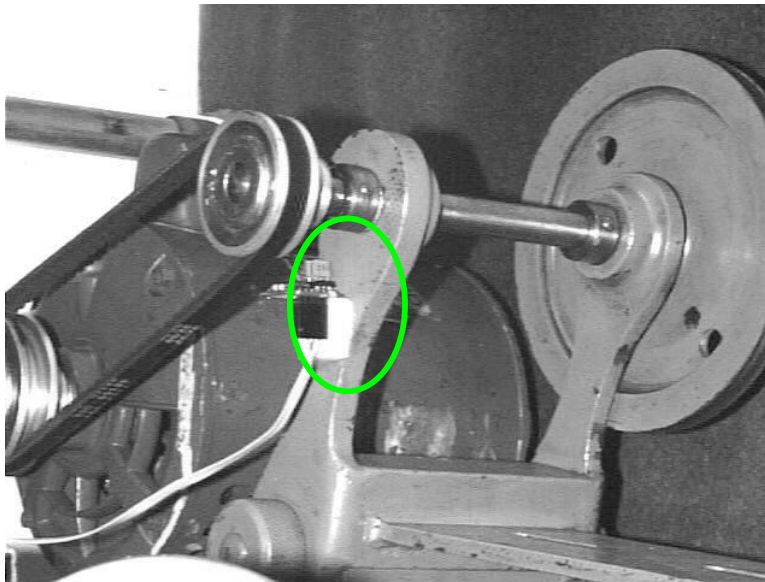


Figura 6.11 - Detalhe da peça e o transdutor acoplado

A inserção de um acelerômetro em um sistema rotativo é um assunto a ser considerado, pois, entende-se que a investigação pode ocorrer de forma dedicada (como o acompanhamento do funcionamento de um item específico no sistema). Entretanto, a sua instalação não deve ser um fator interferente. A realização da investigação de aceleração pode afetar, e realmente afeta, alguns sistemas que estão em medição e muda a natureza dos dados obtidos. Há duas razões para este efeito: (1) o suporte necessário

para acoplar o acelerômetro a uma estrutura flexível pode introduzir enrijecimento local na área de fixação e mudar a resposta estrutural; (2) a massa adicionada do transdutor pode fazer variar as características do sistema. Estes efeitos podem ser reduzidos escolhendo-se o acelerômetro menor e mais leve capaz de executar a medida, diminuindo a interferência do instrumento de medida sobre o sistema observado.

Além dos detalhes citados, tem-se a dificuldade em adquirir sinais com transdutores em elementos rotativos. O meio de transmissão para o transporte da informação adquirida não deve restringir o funcionamento do sistema.

A vibração é uma grandeza vetorial. O acoplamento do acelerômetro deve ser feito de forma que o eixo de sensibilidade esteja alinhado com a direção de movimento desejada. Além disso, deve ser observado se o ponto da estrutura é excitado pela vibração do sistema rotativo.

As forças centrífugas, alternativas e de fricção atuantes nos distintos elementos de uma máquina em operação, dão origem a vibrações mecânicas proporcionais, que se transmitem à estrutura através dos mancais. Devido a este fato, medindo-se vibrações nos mancais pode-se detectar e determinar os esforços presentes em componentes da máquina, determinando-se eventuais anormalidades de funcionamento. Em geral a medida de vibração deve ser efetuada no mancal, por ser um dos pontos válidos pelas normas em uso empregadas para avaliar o funcionamento de máquinas [Ya`C 83].

Quando a grandeza a ser observada não se transmite à estrutura o transdutor é instalado no sistema rotativo e acoplado ao sistema de aquisição. Em BRITO [Brit 94] é feita a medida de torque no eixo do sistema rotativo, com transmissão das medidas por rádio frequência através de uma eletrônica embarcada.

6.6. O sistema de aquisição Psi25 [ANEXO 01 Psi25]

O Psi25 é um sistema de desenvolvimento para processamento digital de sinais, baseado no microprocessador TMS320C25. O sistema foi escolhido por possibilitar a análise dos sinais adquiridos a partir de 18 Hz até 270 Hz (utiliza-se para atender o caso, uma taxa de amostragem de 540 amostras por segundo). A frequência superior de 270 Hz é suficiente para monitorar até o 5º harmônico da frequência de rotação do sistema girante a ser monitorado (ver item 6.2.). Como visto em 5.3.1.3. o acelerômetro codifica

o sinal de aceleração em PWM (“*pulsewidth modulation*”) e envia ao Psi25 que lê o “*duty cycle*” .

Um conector permite a comunicação com o microcomputador através de uma placa de interface instalada em um “*slot*” do PC. Um programa compilado em C, comanda o início e o fim da aquisição dos dados de aceleração e a gravação em arquivos *.dat para posterior análise [Març 99]. O anexo 01 apresenta o sistema Psi 25.

6.7. O processamento dos sinais adquiridos

O espectrograma do sinal adquirido é obtido aplicando-se a “*Fast Fourier Transform*”. Tal ferramenta possibilita, a transformação das informações do domínio tempo para o domínio frequência. Estas informações compõem a assinatura espectral do sistema, quando em funcionamento normal, e estabelece a referência para análises posteriores. Os valores obtidos nesta etapa, são as variáveis quantitativas de entrada para o sistema especialista *Fuzzy* [Chow 97].

6.8. O sistema especialista *Fuzzy*

O desenvolvimento da Lógica *Fuzzy* foi impulsionado pela necessidade de um método capaz de expressar de uma maneira sistemática quantidades imprecisas, vagas e mal definidas. Por exemplo, em vez de se utilizar um modelo matemático, os controladores industriais baseados em Lógica *Fuzzy* podem ser alimentados com o conhecimento experimental de operadores humanos já treinados, fazendo com que a ação de controle seja tão eficiente quanto à deles (em geral é melhor) e sempre consistente. Operadores humanos, treinados podem trabalhar com plantas industriais não completamente descritas pelas equações, processos definidos empiricamente e sistemas com dinâmica não conhecida. Esses operadores sabem qual *ação* tomar, quando observam certas *condições*.

A principal vantagem da aplicação de controladores *fuzzy* é a possibilidade de capturar por regras heurísticas as estratégias de controle de operadores humanos. Isso resolve ao problema de automatizar funções de controle, geralmente delegadas para controle manual [Shaw 99].

A modelagem de sistemas é necessária e tem por finalidade a execução de ensaios e experimentos economizando custos e simulando sistemas reais. Encontram-se procedimentos de modelagem baseados em:

a) Método experimental

Consiste em casos onde os equipamentos físicos não estão disponíveis, evidentemente não se pode efetuar experimentos para conhecer na prática as saídas em função das entradas. Desta forma não se pode projetar o sistema de controle apropriado. Mesmo quando se tem os equipamentos à disposição o procedimento experimental pode ser caro e, em alguns casos, pode haver problemas de segurança em plantas industriais que inibem a experimentação em operação. Há também a necessidade de se experimentar uma grande quantidade de valores de entrada para que se possa conhecer o processo todo.

b) Método de Modelagem matemática ou analítica

É desejável que se possa prever as respostas para os possíveis valores de entrada sem que seja necessário se utilizar de medições. Então, é preciso uma descrição de como o processo reage para várias entradas, sendo exatamente isso o que os modelos matemáticos fazem. Na engenharia de controle o objetivo é se obter um modelo idealizado do processo a ser controlado, normalmente na forma de equações diferenciais. Usam-se, geralmente transformadas de Laplace ou transformadas Z para tais descrições. Desejando-se obter modelos simples assume-se que o processo é linear, isto é, que as variações nas entradas produzem variações proporcionais nas saídas. Assumindo-se que o processo é linear pode-se utilizar de técnicas conhecidas na área de engenharia e tecnologia com soluções analíticas ideais. Outra restrição muito utilizada em análises de sistemas lineares é que parâmetros de processo não se alteram, ou seja, o processo é invariante no tempo, não se levando em consideração que ocorre a deterioração dos componentes dos sistemas com o passar do tempo. As condições de operação de um sistema podem ser afetadas por variações de ambiente tais como temperatura e pressão que, muitas vezes, são desprezadas num modelo mais simples. Desta forma, tais simplificações impedem que o projetista consiga um modelo matemático que retrate fielmente do processo industrial.

c) Método heurístico.

O método heurístico caracteriza-se na realização de uma tarefa baseando-se na experiência prévia, no conhecimento prático e estratégias normalmente utilizadas. Uma regra heurística é uma implicação lógica da forma:

SE <condição> **ENTÃO** <conseqüência>

ou então uma regra típica de uma situação de controle:

SE <condição> **ENTÃO** <ação>

Regras associam conclusões (ou conseqüências) com condições (ou antecedentes). O método heurístico é similar ao método experimental de se construir uma tabela de entradas e saídas. Para cada linha da tabela, têm-se uma relação entre as variáveis de entrada(s) e as de saída(s). Pode-se escrever uma linha de regra heurística da seguinte forma:

SE $e_{ent} = x$ Volts **ENTÃO** $e_{saída} = y$ Volts

Ao invés de números reais as entradas e saídas podem ser descritas através de “valores *fuzzy*” da forma:

SE $e_{ent} = \textit{médio}$ **ENTÃO** $e_{saída} = \textit{grande}$

Onde *médio* e *grande* são definidos através de funções de pertinência que descrevem o domínio de tais valores de entrada e saída [Shaw 99]. Aqui em vez de se utilizar expressão numérica, é possível usar uma expressão lingüística para descrever a correlação entre a variável de entrada e a de saída. Melhor ainda, o modelo matemático não é mais relevante, visto que, a função entrada-saída é descrita ponto a ponto, como no modo experimental. O modo heurístico permite a construção de uma função entrada / saída, explorando todo o domínio. Isto apresenta uma grande solução quando os parâmetros a serem considerados são incertos, desconhecidos, variantes no tempo ou quando o espaço de busca é grande. Por exemplo, no enfoque *fuzzy*, uma função real de entrada-saída é aproximada por seções que cobrem regiões da função. Em vez de se especificar um valor exato de um ponto na função de entrada-saída, a seção indicaria um conjunto de valores plausíveis. Quanto maior a cobertura da região, mais incerta (ou seja mais *fuzzy*) seria um valor neste conjunto para representar um ponto real. Cada região é expressa por uma regra heurística **SE...ENTÃO**. Da mesma forma, quanto menos incertas forem as regras, as regiões serão menores. Se as regras contiverem números, em vez de conjuntos *fuzzy*, elas se tornariam pontos. De acordo com o *Teorema de Aproximação Fuzzy*, uma curva pode ser sempre convertida em descrições verbais através de um número finito de regiões *fuzzy* [Shaw 99].

Em muitos casos a interpretação heurística (= método de perguntas e respostas para encontrar a solução de um problema [Buen 89]) de resultados, que é uma habilidade e qualidade humana, torna-se necessário. A Lógica *Fuzzy* tem sido uma solução para tanto [Chow 97, Snyder 95].

A interpretação do estado (da condição) de funcionamento é uma análise qualitativa. Análise qualitativa é interpretação heurística que é o conceito da Lógica *Fuzzy*.

A Lógica *Fuzzy* é também útil em tarefas de tomadas de decisão, onde as variáveis individuais não são definidas em termos exatos. Por exemplo, no seqüenciamento de tarefas de uma linha de produção industrial ou no planejamento de manutenção, o uso da Lógica *Fuzzy* pode significar vantagens adicionais em minimização de custos, devido à facilidade de implementação dessas estratégias [Shaw 99].

Lógica *Fuzzy* pode facilmente e sistematicamente transformar conhecimentos heurísticos, lingüísticos e qualitativos, que são a preferência humana, para números e conhecimentos quantitativos, que são a linguagem dos computadores, e vice-versa.

Pelas regras de inferência, a Lógica *Fuzzy* pode ser aplicada ao problema estudado nesta tese pois oferece um método que permite implementar heurísticamente princípios de detecção de falhas, interpretá-las e analisar os resultados. Pelas regras criadas para o processo em proposição (ver Figura 6.12) se estabelecem padrões de funcionamento para o sistema. Cada avaria introduzida ocasiona uma alteração no espectro do sinal que identifica o estado de funcionamento normal do sistema (assinatura espectral do sistema em estado de funcionamento normal). Esta alteração é visível e detectada na amplitude da vibração na frequência de rotação do sistema rotativo (frequência de giro do eixo-volante).

Através de variáveis lingüísticas se tem a identificação de falha (incipiente ou grave), a classificação do estado de operação do sistema (normal, falha incipiente, manutenção ou perigo) e do tipo de avaria (desajuste).

A gravidade do defeito em andamento e o comprometimento deste para com o sistema determinarão as ações a serem tomadas e o momento para isto.

Segundo SHAW & SIMÕES [Shaw 99] em que situações se recomendaria o emprego com sucesso da Lógica *Fuzzy*:

- ✓ Sempre que ocorrerem ajustes em máquinas resultando em perdas e de matéria prima, como função de julgamento de um operador. O controle *fuzzy* fornece um meio de embutir o conhecimento e a experiência dos operadores.
- ✓ Sempre que o sistema depender de habilidades do operador e de atenção para que se mantenha a consistência na qualidade do produto.
- ✓ Sempre que um parâmetro de um processo afetar outro parâmetro de outro processo. No presente trabalho experimental a não detecção em tempo de uma modificação incipiente pode ter como consequência o surgimento de uma falha. Por exemplo o desalinhamento de polias ou o desbalanceamento do eixo-volante na estrutura usada ocasionam mudança no comportamento funcional do motor que impulsiona todo o sistema.
- ✓ Sempre que os processos possam ser modelados lingüisticamente, ou seja através de descrições verbais, mas não matematicamente. O diagnóstico que denota o estado de funcionamento do Sistema Rotativo considera variáveis lingüísticas.
- ✓ Sempre que um controlador *fuzzy* possa ser utilizado como um sistema aconselhador a um operador humano. Pode ser motivo de preocupação o fato de se introduzir um controle automático em uma instalação que sempre foi controlada por operadores humanos; neste caso é possível mostrar em uma tela a saída do controlador *fuzzy* apenas como sugestão para o controlador humano, o qual executa a função de controle. O operador pode aceitar que a saída de controle *fuzzy* seja razoável, baseado em seu conhecimento do processo. As inconsistências devem ser anotadas para se melhorar a base de regras do controlador, e assim que o potencial de conhecimento seja transferido para o controlador *fuzzy*, o processo pode ser facilmente automatizado.

6.8.1. O universo de discurso

Sejam k entradas discretas $u[k]$ de um sistema de controle de entrada única, os quais são membros de um conjunto de entradas $U = \{u[x(k); y(k)]\}$. U é, portanto, o universo de discurso da entrada, o qual contém todos os possíveis valores de $u[k]$ que podem ocorrer [Shaw 99].

No presente trabalho o universo de discurso de entrada é composto pelas frequências: f_{motor} , $f_{eixo-volante}$, $2f_{eix-vol}$, $3f_{eix-vol}$, $4f_{eix-vol}$ e $5f_{eix-vol}$ (variável antecedente

freqüência) e pelos valores de amplitudes de vibração originadas pelo Sistema Rotativo: **baixíssima, baixa, normal e alta** (variável antecedente *amplitude*).

$$U = \{u[\text{freqüência}(f_{\text{motor}}, f_{\text{eixo-volante}}, 2f_{\text{eix-vol}}, 3f_{\text{eix-vol}}, 4f_{\text{eix-vol}}, e 5f_{\text{eix-vol}}); \text{amplitude de vibração}(\text{baixíssima, baixa, normal e alta})]\}$$

6.8.2. As variáveis lingüísticas

Uma variável lingüística u no universo de discurso U é definida em um conjunto de termos, nomes ou rótulos, $T(u)$, com cada valor sendo um número *fuzzy* definido em U [Shaw 99].

Têm-se neste trabalho como variáveis lingüísticas: $u(\text{freqüência}; \text{amplitude de vibração}; \text{diagnóstico})$. Temos como conjunto de termos:

$$T(\text{freqüência}) = \{f_{\text{motor}}, f_{\text{eixo-volante}}, 2f_{\text{eix-vol}}, 3f_{\text{eix-vol}}, 4f_{\text{eix-vol}}, 5f_{\text{eix-vol}}\};$$

$$T(\text{amplitude de vibração}) = \{ \text{baixíssima, baixa, normal, alta} \} \text{ e}$$

$$T(\text{diagnóstico}) = \{ \text{NORMAL, FALHA INCIPIENTE, MANUTENÇÃO, PERIGO} \}$$

6.8.3. Regras de inferência

Plantas e processos industriais são sistemas físicos comandados de forma a se transformar uma determinada matéria prima ou insumos em produtos úteis e desejáveis. Há uma interação no fluxo energético do sistema para que ocorra tal transformação; tal interação implica em várias operações, que devem ser executadas através das regras de operação desse sistema. Se a energia, quer seja mecânica, elétrica, térmica ou química, e os sistemas ou modelos matemáticos dos sistemas, forem expressos em números e conjuntos, há de se determinar as regras de interação entre eles, considerando a importância do estudo de operações entre conjuntos com o universo de discurso diferentes. Uma vez que as regras de interação afetam os vetores de pertinência dos respectivos conjuntos, deve-se inicialmente estabelecer as regras que permitem combiná-los, possibilitando que sejam feitas implicações lógicas tipo **SE...ENTÃO** [Shaw99].

O projetista de um sistema *fuzzy* tem liberdade para escolher implicações *fuzzy* em tarefas de controle. Considerando que muitas estruturas de inferência *fuzzy* são

teoricamente possíveis, várias configurações na base de regras devem ser testadas para se otimizar o desempenho do controlador. Desta forma, o projeto de controladores *fuzzy* depende fortemente da sintonia empírica. Muitos projetos e sintonias do sistema *fuzzy* baseiam-se em entrevistas com operadores humanos, experientes no sistema, proporcionando um ganho de tempo e sintonia, pois toda a experiência do operador já contém o melhor desempenho embutido nas regras.. A liberdade do projetista em desenvolver a estrutura de inferência está ligada à compreensão da descrição do operador.

As regras adotadas no trabalho consideram a experiência de operadores com larga prática em construção, operação e manutenção de máquinas rotativas.

O conjunto de regras mapeia os sinais de entrada aos de saída, da mesma forma que as funções de transferência de Laplace fazem em teoria de controle linear e a forma de se combinar as entradas para se produzir uma saída é equivalente a se utilizar um método de identificação estrutural de sistemas.

6.8.4. Funções de pertinência *fuzzy*

Uma função de pertinência é uma função numérica gráfica ou tabulada que atribui valores de pertinência *fuzzy* para valores discretos de uma variável, em seu universo de discurso. Elas representam os aspectos fundamentais de todas as ações teóricas e práticas de sistemas *fuzzy*. A seleção da quantidade de funções e o seu formato devem obedecer a natureza do processo e a experiência do operador humano especializado.

Segundo SHAW & SIMÕES [Shaw 99] a seleção não é uma tarefa trivial e sugerem que se considere na escolha:

- * Um número prático de conjuntos *fuzzy* lingüísticos (funções de pertinência) é algo entre 2 e 7. Quanto maior o número de conjuntos, maior a precisão, mas a demanda computacional também é mais significativa.
- * Os formatos mais frequentemente das funções encontrados são *triângulos* e *trapézios*, pois são gerados com facilidade. Em casos onde um desempenho suave é de importância crítica, funções do tipo $\cos^2(x)$, *gaussiana*, *sigmóide* e *spline cúbico* podem ser usadas. Pode-se usar do formato das funções para se garantir uma maior

sensibilidade no processo. Por exemplo: em se tratando de uma função triangular tem-se menor grau de liberdade, pois o valor de máxima pertinência (1) é único, enquanto que em uma função trapezoidal tem-se mais de um valor.

- * Outro fator que afeta a precisão é o grau de superposição entre funções de pertinência. Um mínimo de 25% e um máximo de 75% foram determinados experimentalmente como adequados, sendo 50% um compromisso razoável, pelo menos para os primeiros testes num sistema em malha fechada. Certamente que, esta superposição entre as funções surge como resultado e não como parâmetro de entrada. Funções trapezoidais com patamares largos e laterais superpostas bastante íngremes podem ser usadas onde a saída *fuzzy* não é sensível a mudanças nos valores de entrada.

Usa-se neste trabalho funções triangulares e trapezoidais, veja Figuras 6.14 e 6.15, e estabelece-se superposições que, a princípio, representam as mudanças de estado de operação do sistema de uma forma contínua. O objetivo é detectar a mudança do estado de operação e a evolução de uma modificação incipiente. Isto é, de uma forma *fuzzy* a medida que um estado vai deixando de ser *normal* passa a ser de *falha incipiente*, de *manutenção* e de *perigo*.

6.8.5. Fuzzificação

É o mapeamento do domínio de números reais (em geral discretos) para o domínio *fuzzy*. Representa a atribuição de valores lingüísticos, descrições vagas ou qualitativas, definidas por funções de pertinência às variáveis de entrada. A fuzzificação é um pré processamento de categorias ou classes dos sinais de entrada, reduzindo grandemente o número de valores a serem processados e desta forma possibilitando uma maior velocidade de computação.

O nosso mapeamento traz a atribuição de valores de frequência (f_{motor} , $f_{eixo-volante}$, $2f_{eix-vol}$, $3f_{eix-vol}$, $4f_{eix-vol}$, $5f_{eix-vol}$) e de valores de amplitude de vibração na frequência de rotação do eixo-volante (38,5 Hz) do Sistema Rotativo.

6.8.6. Defuzzificação

Nesta etapa o valor da variável lingüística de saída inferida pelas regras *fuzzy* será traduzido em um valor discreto. A defuzzificação é uma transformação inversa que traduz a saída do domínio *fuzzy* para o domínio discreto.

Para o trabalho em questão pode-se acompanhar o diagnóstico do estado de funcionamento de forma qualitativa através da variáveis *fuzzy* (NORMAL, FALHA INCIPIENTE, MANUTENÇÃO e PERIGO) e de modo quantitativo que é o valor defuzzificado, Figura 6.17.

A Tabela 6.2 esboça o mapa de regras *fuzzy* com as funções de pertinência empregas no processo.

Tabela 6.2 – Mapa de regras com as funções de pertinência do processo

		← — F R E Q Ü Ê N C I A — →					
↑		f_{motor}	$f_{eixo-volante}$	$2f_{eix-vol}$	$3f_{eix-vol}$	$4f_{eix-vol}$	$5f_{eix-vol}$
A M P L I T U	baixíssima	INCONSISTÊNCIA	NORMAL	INCONSISTÊNCIA	INCONSISTÊNCIA	INCONSISTÊNCIA	INCONSISTÊNCIA
	baixa	INCONSISTÊNCIA	FALHA INCIPIENTE	INCONSISTÊNCIA	INCONSISTÊNCIA	INCONSISTÊNCIA	INCONSISTÊNCIA
	média	INCONSISTÊNCIA	MANUTENÇÃO	INCONSISTÊNCIA	INCONSISTÊNCIA	MANUTENÇÃO	INCONSISTÊNCIA
	alta	INCONSISTÊNCIA	PERIGO	INCONSISTÊNCIA	INCONSISTÊNCIA	MANUTENÇÃO	INCONSISTÊNCIA

6.9. O diagnóstico *Fuzzy*

O método permite a chegada a um diagnóstico do estado de funcionamento do sistema rotativo, pelo sistema *Fuzzy*, baseado em uma coleção de regras lógicas, na forma de declarações IF-THEN (Figuras 6.12 e 6.1113). As declarações “antecedentes” são: a frequência de rotação do eixo-volante (Figura 6.14), e a amplitude da vibração nesta frequência (Figura 6.15). A declaração “conseqüente” é o diagnóstico do estado de funcionamento do sistema: NORMAL, FALHA INCIPIENTE, MANUTENÇÃO e PERIGO (Figura 6.16).

A visualização do diagnóstico é oferecida de forma qualitativa e quantitativa (ver Figura 6.17). A forma qualitativa oferece uma indicação do estado do sistema dentro do Universo ao passo que a quantitativa permite o acompanhamento da evolução da variável primária medida.

A facilidade de alterações das regras de inferência e redefinição de valores das variáveis a serem consideradas, permitem que o procedimento se apresente como um processo versátil. A calibração possibilita que o método proposto possa atender às necessidades específicas do processo em que o sistema rotativo está inserido. Pode-se calibrá-lo levando-se em consideração a margem de atuação desejada para o sistema, a qualidade do material empregado na construção da máquina, fatores de risco, tolerância, etc. ..

A alteração das regras de inferência e, principalmente, a redefinição dos valores das variáveis é muito útil para a sintonia do sistema *fuzzy* com a evolução do sistema mecânico. O padrão de frequência ou a amplitude de vibração considerados normais pode variar com o uso do sistema mecânico (pelo envelhecimento) ou por manutenção (ajuste ou substituição de componente).

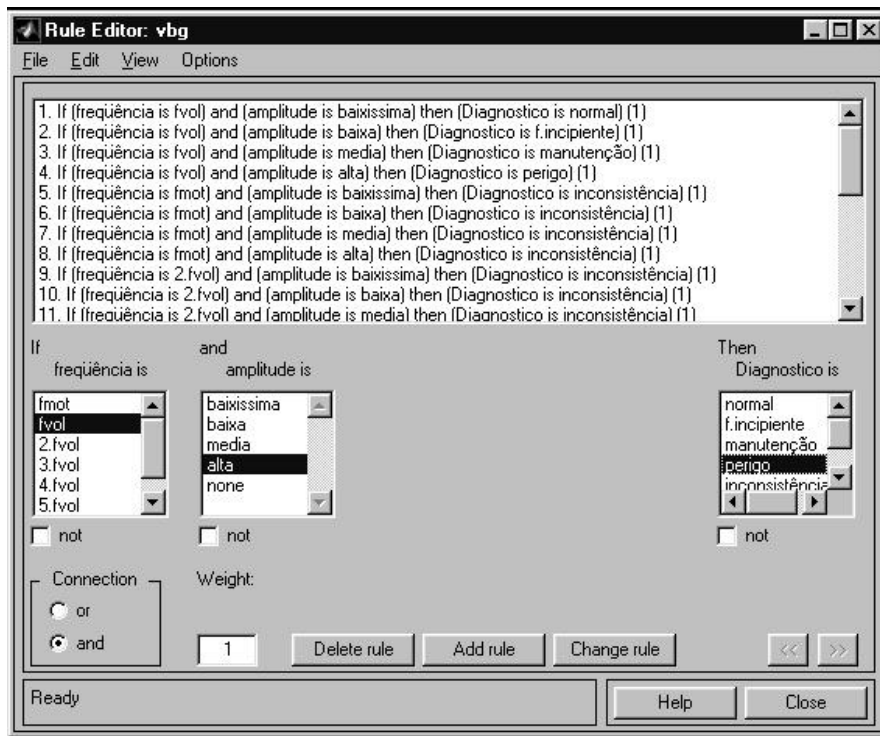


Figura 6.12 – Regras de inferência do sistema Fuzzy

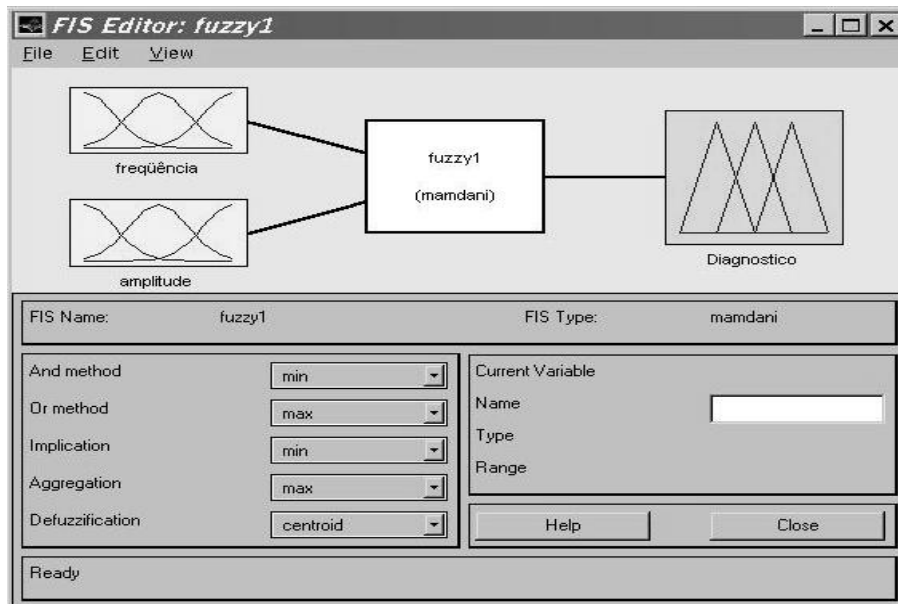


Figura 6.13 – As declarações antecedentes e consequentes do sistema Fuzzy

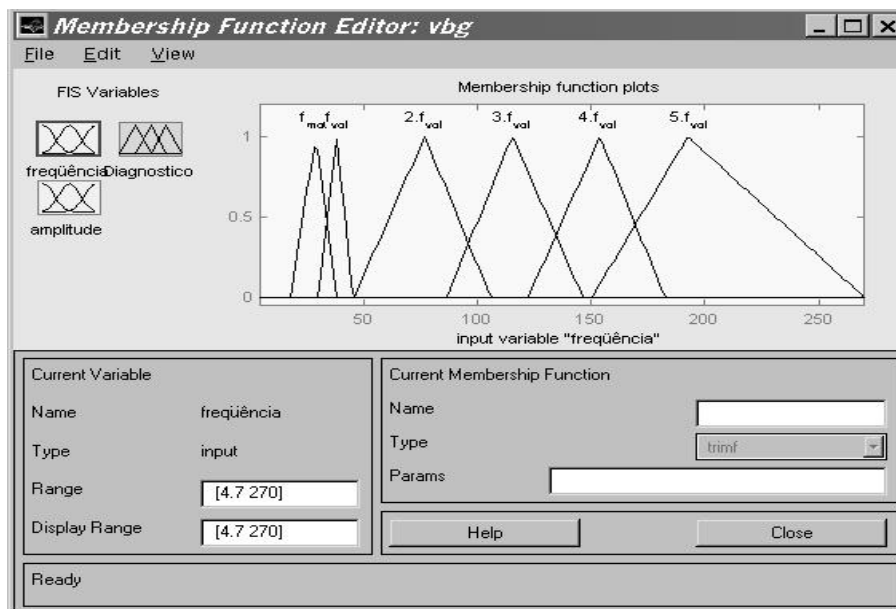


Figura 6.14 – A variável antecedente frequência

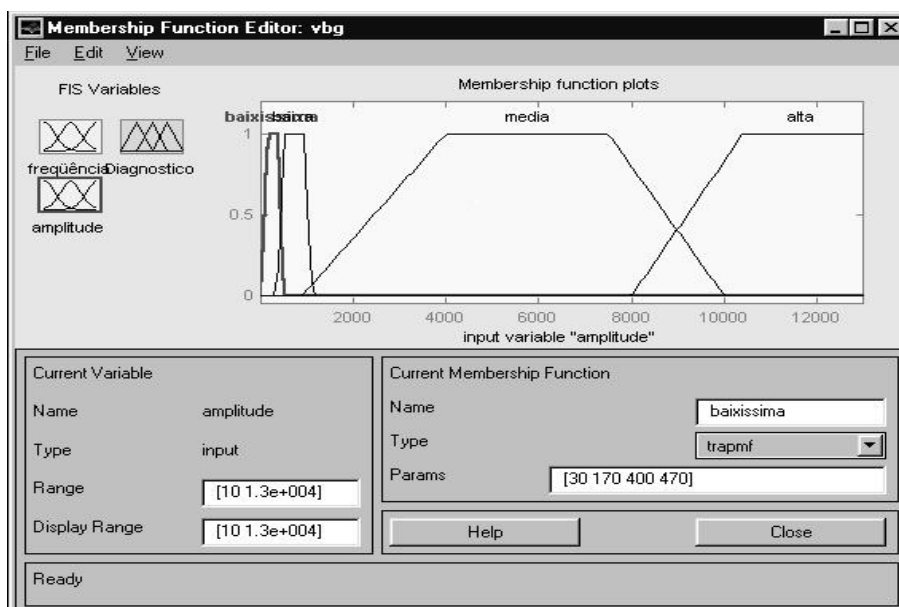


Figura 6.15 – A variável antecedente amplitude

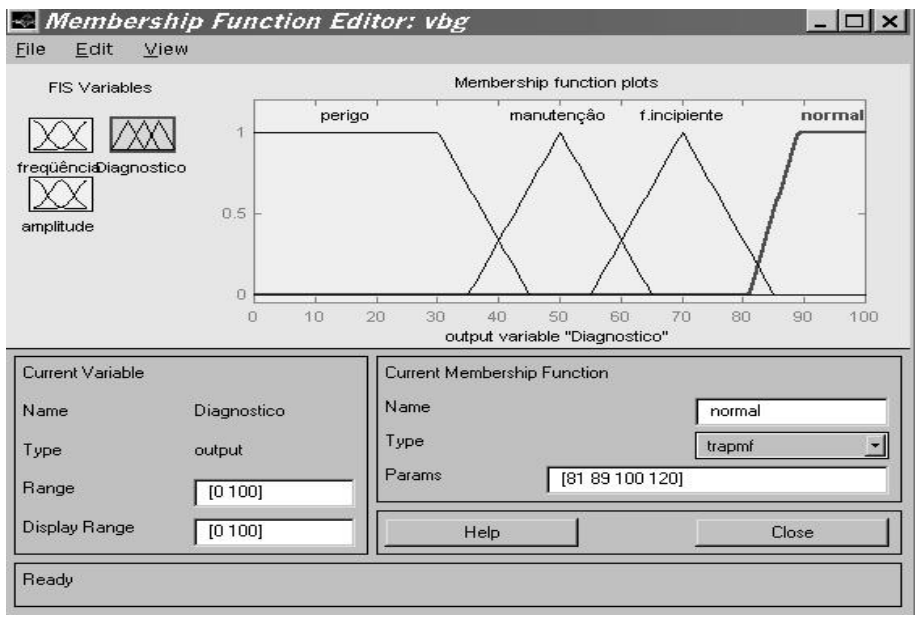


Figura 6.16 – A variável consequente diagnóstico

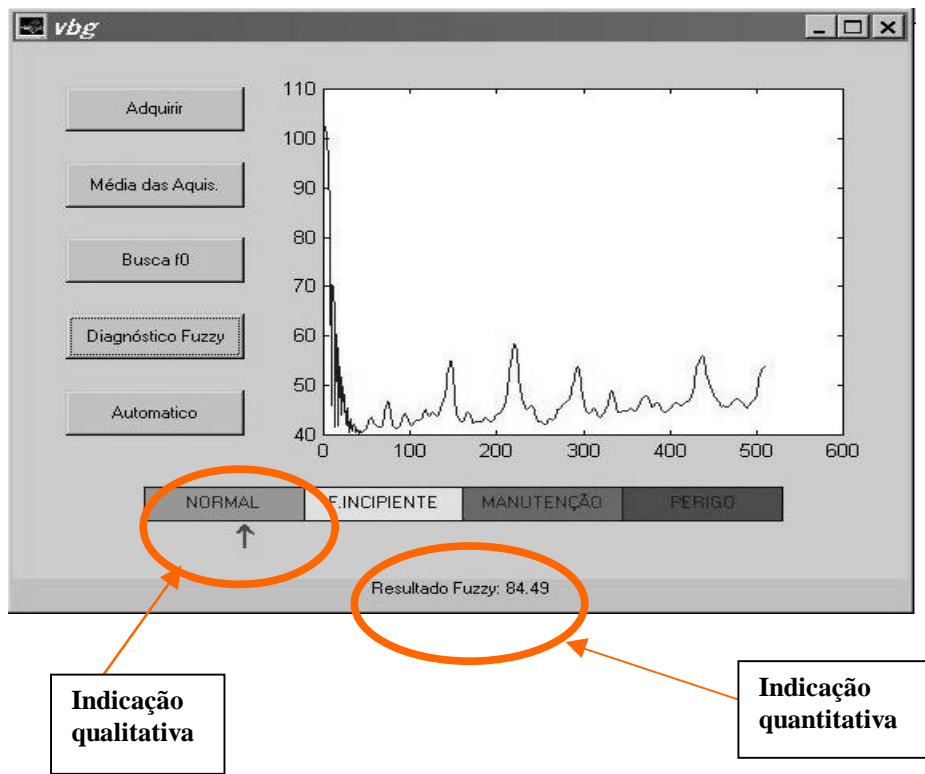


Figura 6.17 - O diagnóstico Fuzzy

7. SIMULAÇÕES DE FALHAS E AQUISIÇÕES NO SISTEMA ROTATIVO

Modificações ocorridas devido a desbalanceamento, desalinhamento, folgas, fixação inadequada, acoplamento defeituoso, correias frouxas ou gastas, eixos deformados, etc., alteram a amplitude da vibração na frequência de rotação do sistema rotativo em questão [Ya`C 83]. Tais falhas podem ser classificadas como uma família de falhas de baixa frequência e aqui são nomeadas como desajustes.

Uma das dificuldades em detecção de falhas em motores é a alta dimensão física dos motores. Existem muitas variáveis que podem afetar o processo de detecção e identificação de falhas, tais como: condições de carga, efeitos de saturação, condições de operação imprevisível, ruídos de linha e efeitos de temperatura, os quais podem resultar em diversas hipóteses de falha pelas diferentes possibilidades de combinações das variáveis [Blaa 95].

Para a validação do método inseriram-se no sistema algumas alterações, as quais foram submetidas ao diagnóstico *Fuzzy*. As alterações, segundo o seu grau de importância, tiveram como finalidade causar modificações incipientes e defeitos que comprometeriam o funcionamento do sistema, o que exigiria uma imediata paralisação no funcionamento. As alterações foram:

- ⇒ a inserção de elemento desbalanceador de 0,1 g no eixo-volante;
- ⇒ a inserção de elemento desbalanceador de 5,1 g no eixo-volante;
- ⇒ a inserção de elemento desbalanceador de 7,2 g no eixo-volante;
- ⇒ o desalinhamento das polias (mantendo-as fixas);
- ⇒ o desalinhamento das polias (tendo a do eixo-volante solta);
- ⇒ a correia de transmissão frouxa;
- ⇒ o eixo-volante frouxo;
- ⇒ a retirada da superfície amortecedora que sustenta o Sistema Rotativo.

7.1. Desbalanceamento

O eixo-volante, Figura 6.6, possui dois furos no disco metálico que pesa aproximadamente 1000 g. Fez-se a inserção do menor elemento desbalanceador (0,1 g) em ambos os furos, com o intuito de observar se o sistema se comportaria da mesma

forma. Em um dos furos, acredita-se que o sistema, por não estar completamente balanceado (segundo o Dicionário Aurélio: balanceamento é o ato de equilibrar as rodas de um veículo para lhe dar direção e estabilidade seguras) o efeito foi benéfico, pois a amplitude da vibração diminuiu em relação ao conjunto das 30 aquisições que se estipulou como padrão de normalidade. A tal fato, conclui-se que a inserção veio a balancear o eixo-volante.

A Figura 7.1 mostra o resultado obtido com as inserções nos dois furos. Pode-se observar pela Figura que em uma das inserções a amplitude de vibração é menor em relação ao conjunto de 30 aquisições que caracterizam o sistema em estado de funcionamento normal e presume-se balanceado.

Feita a escolha do furo a ser utilizado para a inserção dos elementos desbalanceadores (optou-se pelo furo cuja posição causava o desbalanceamento do sistema), inseriram-se elementos de: 0,1g (relação 1 : 10000); 5,1 g (relação 1 : 200) e 7,2 g (1 : 140).

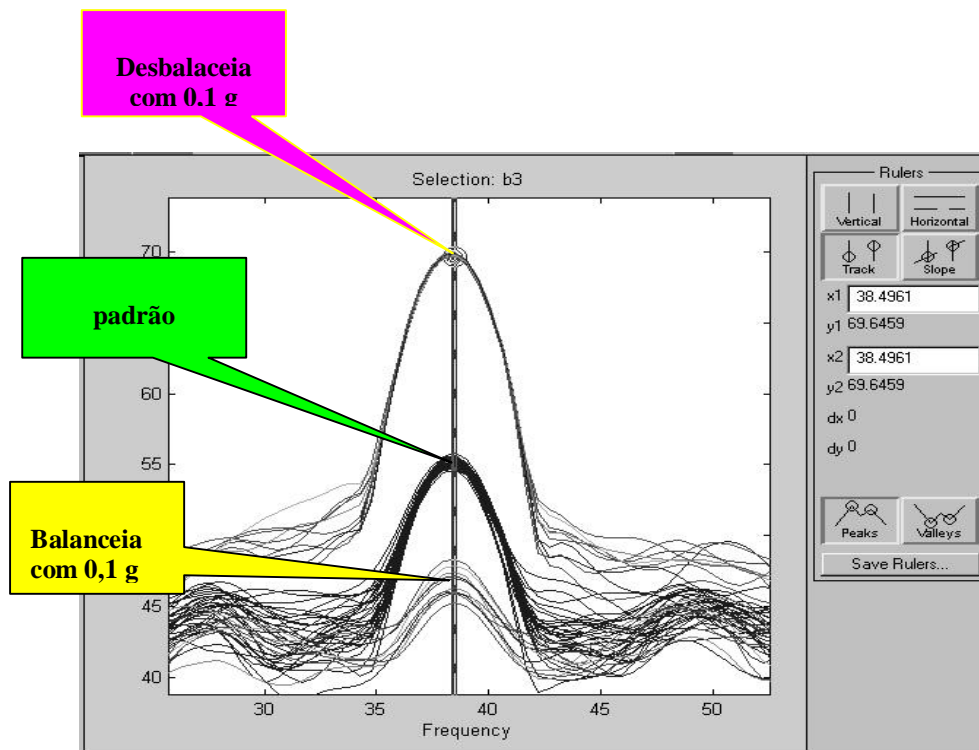


Figura 7.1 - Escolha do furo no eixo-volante que desbalanceia o sistema (ordenadas em escala logarítmica)

As relações (1 : 1000, 1 : 200 e 1 : 140), estabelecidas e seus respectivos valores de amplitude relativos (ver Figura 7.2), serviram como variáveis quantitativas para a sintonia do sistema *Fuzzy*.

A estes valores de amplitude o sistema respondeu como: NORMAL (0 g), FALHA INCIPIENTE (0,1 g), MANUTENÇÃO (5,1 g) e PERIGO (7,2 g).

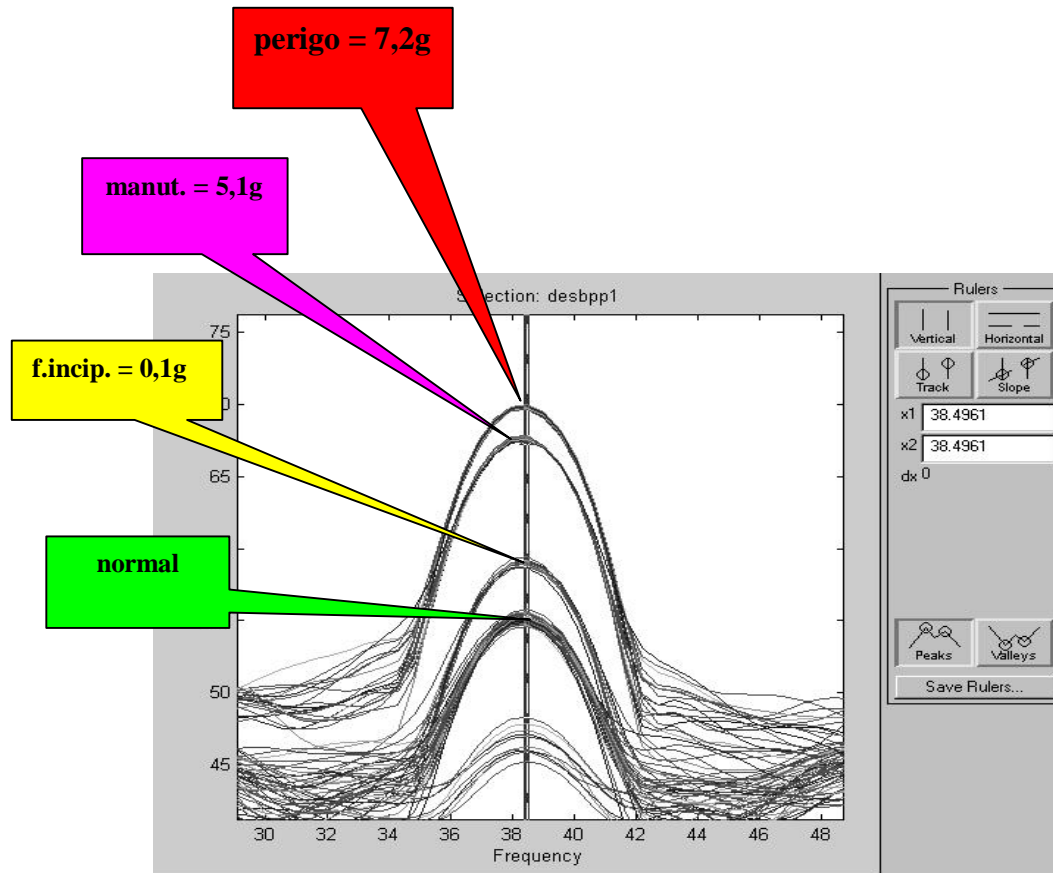


Figura 7.2 - A variação de amplitude da vibração devido a inserção de elementos desbalanceadores no eixo-volante (ordenadas em escala logarítmica)

7.2. Desalinhamento das polias (mantendo-as fixas)

Desalinhou-se as polias mantendo-as fixas. O diagnóstico dado pelo método acusou uma falha incipiente. Entretanto, é possível verificar pela Figura 7.3 que o eixo do motor apresenta uma modificação em termos de funcionamento o que sugere que o motor em tais condições passa a operar fora de sua condição normal. Acredita-se que, se tal condição prosseguisse o motor apresentaria uma falha em breve. O espalhamento das aquisições do grupo demonstram a falta de regularidade no comportamento funcional do sistema em face de uma modificação.

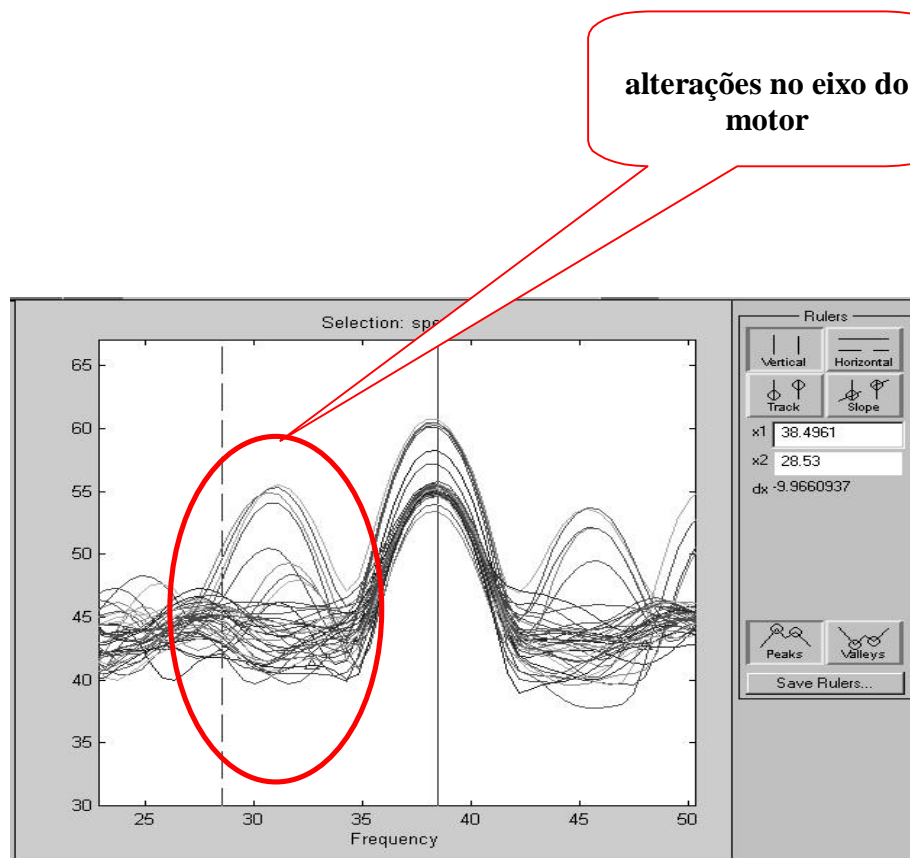


Figura 7.3 - Resultado da falha polias desalinhadas fixas com o detalhe da influência no eixo do motor (ordenadas em escala logarítmica)

7.3. Desalinhamento das polias (solta a do eixo-volante)

O desalinhamento das polias feito nesta etapa difere do anterior pelo fato de não estarem fixas as polias. O diagnóstico oferecido pelo método é de uma falha incipiente também. Pela Figura 7.4, pode-se notar que a amplitude de vibração de todo o sistema aumenta. A Figura mostra a aquisição do estado atual relacionando-o com o padrão.

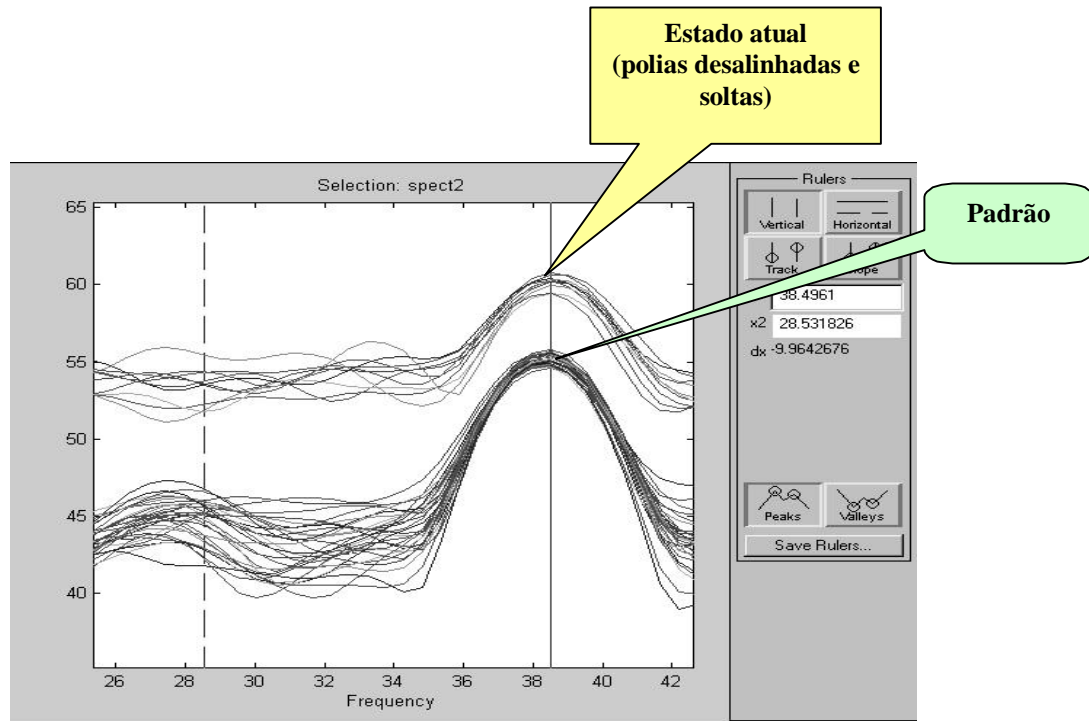


Figura 7.4 - Variação da amplitude da falha polias desalinhadas e soltas (ordenadas em escala logarítmica)

7.4. Correia de transmissão frouxa

Afrouxou-se a correia de transmissão do eixo-volante. Conforme cita a literatura pertinente, [Mech 93] tal falha é comum em sistemas que exigem esforço contínuo e requer uma verificação permanente. Tal avaria, também, pode ocasionar uma alteração no funcionamento da máquina e comprometer o rendimento final do sistema. Pela Figura 7.5 constata-se a variação da amplitude da vibração assumindo valores diferentes dos fixados como padrão de normalidade para o funcionamento normal do sistema. Este caso é um exemplo onde é possível verificar graficamente a evolução da condição de normalidade do sistema para uma condição de alteração incipiente.

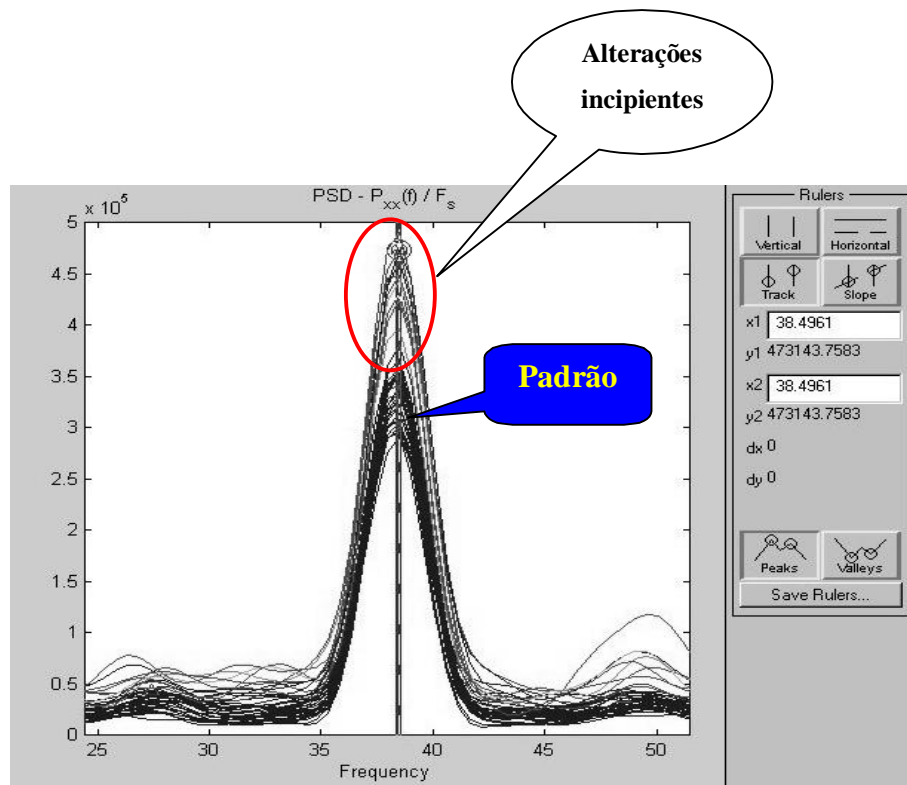


Figura 7.5 - Variação da amplitude de vibração ocasionada por afrouxamento da correia de transmissão (ordenadas em escala logarítmica)

7.5. Eixo-volante frouxo

O eixo-volante é preso por braçadeiras que asseguram a sua fixação e impedem que o mesmo gire desalinhado. Tal desalinhamento causaria um esforço adicional no funcionamento do motor do Sistema Rotativo e um comportamento imprevisível em termos de amplitude característica para esta falha. Tem-se na Figura 7.6 a variação de amplitude referente ao caso.

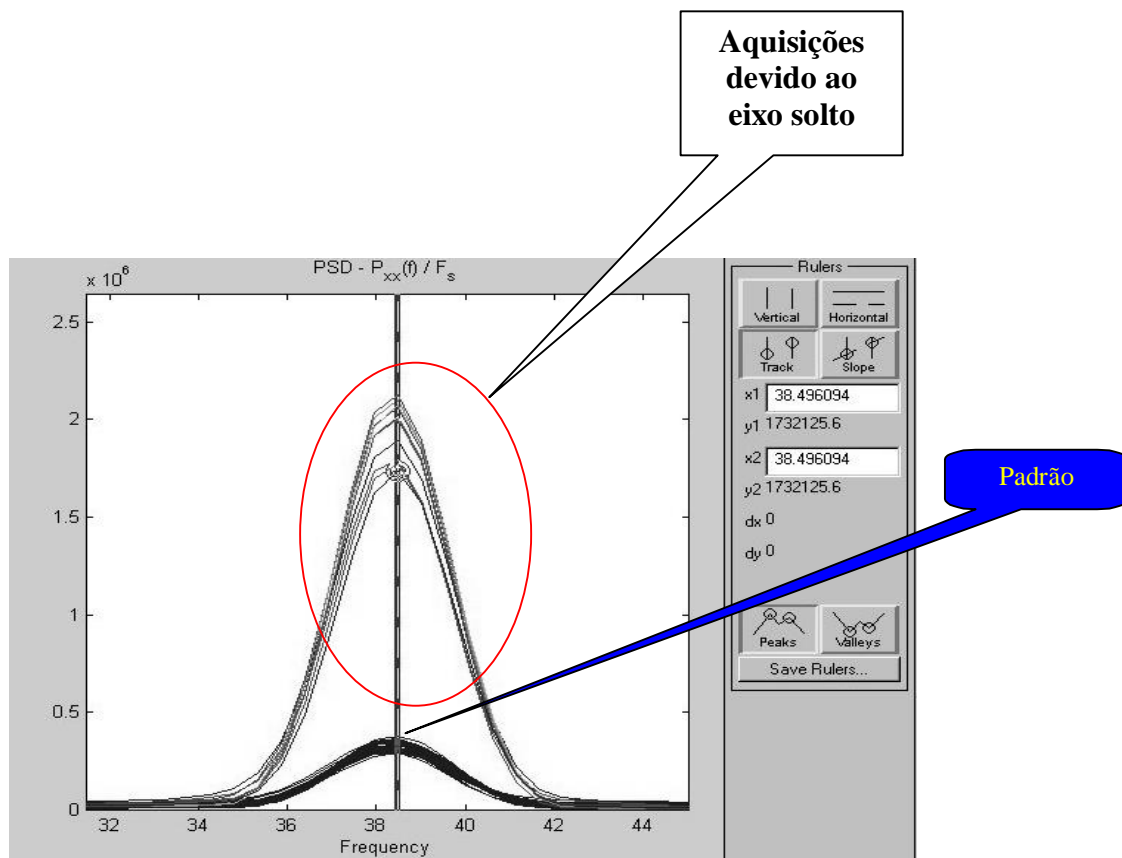


Figura 7.6 - Variação da amplitude de vibração ocasionada pela soltura do eixo-volante (ordenadas em escala linear)

7.6. Retirada da superfície amortecedora que sustenta o Sistema Rotativo

A utilização de uma superfície amortecedora sob a estrutura impede que as vibrações interfiram no bom funcionamento do sistema. Pode-se observar que a retirada da superfície ocasiona deslocamentos da estrutura. A variação da amplitude de vibração é observado pela Figura 7.7 e pode ser considerada como uma conjuntura de anormalidade e enquadrada dentro do diagnóstico retornado pelo método como uma situação de manutenção.

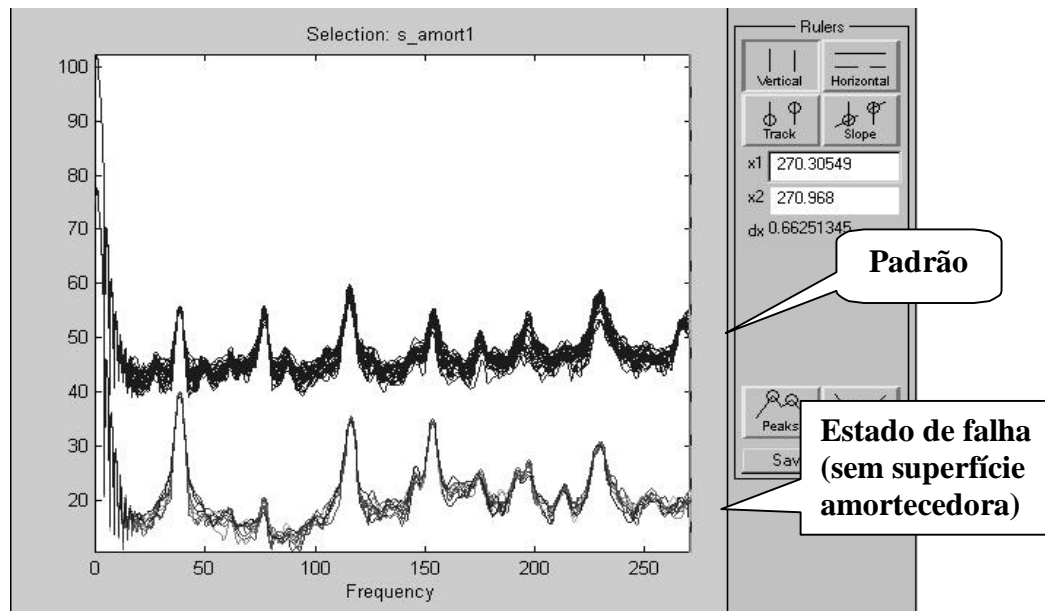


Figura 7.7 - Variação da amplitude de vibração ocasionada pela retirada da superfície de borracha que amortece o Sistema Rotativo (ordenadas em escala logarítmica)

8. O ESPECTRO DE CADA SITUAÇÃO DE ANORMALIDADE

Apresenta-se neste capítulo as aquisições das falhas inseridas relacionadas com o padrão estabelecido pelas aquisições feitas durante os 30 dias de funcionamento do sistema e que resultaram na determinação da assinatura espectral do Sistema Rotativo.

As Figuras 8.1a até 8.9b retratam, sempre em relação ao padrão, a concordância das frequências e as diferenças de amplitudes para cada caso e (38.5 Hz que é a frequência de giro do eixo-volante).

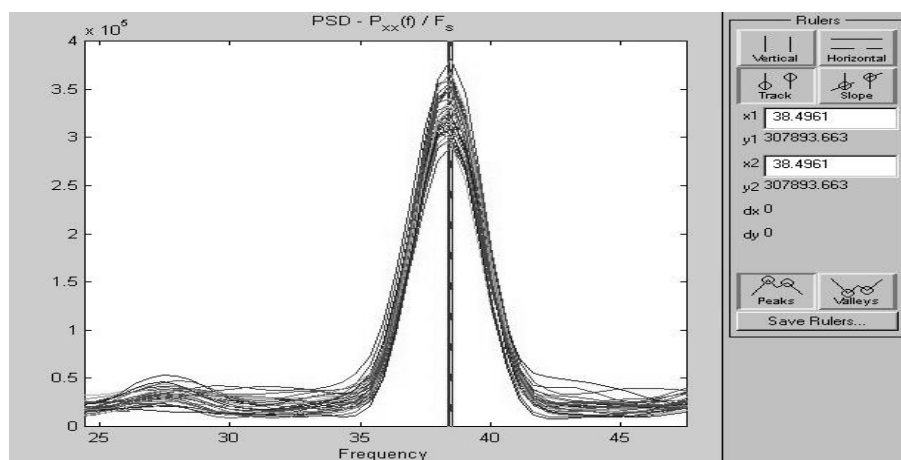


Figura 8.1a – Aquisições do sistema em condição normal de operação durante 30 dias de funcionamento mostrando a frequência do eixo-volante (ordenadas em escala linear)

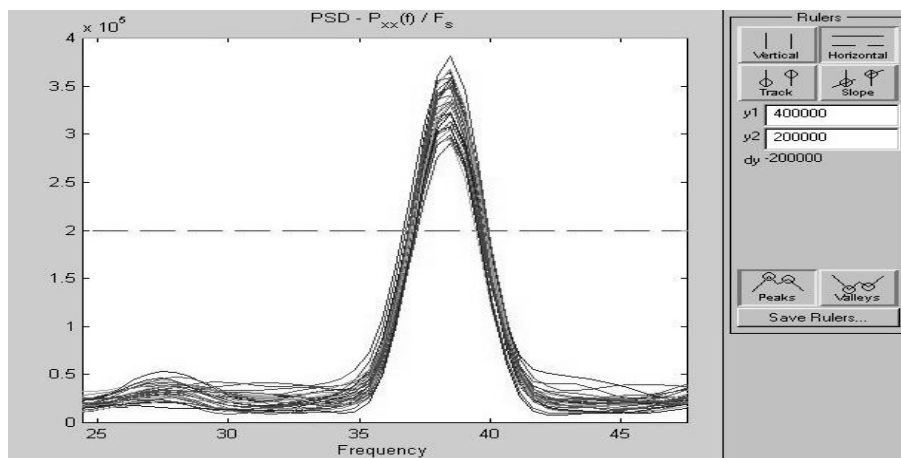


Figura 8.1b – Aquisições do sistema em condição normal de operação mostrando a amplitude da vibração na f_{vol} (ordenadas em escala linear)

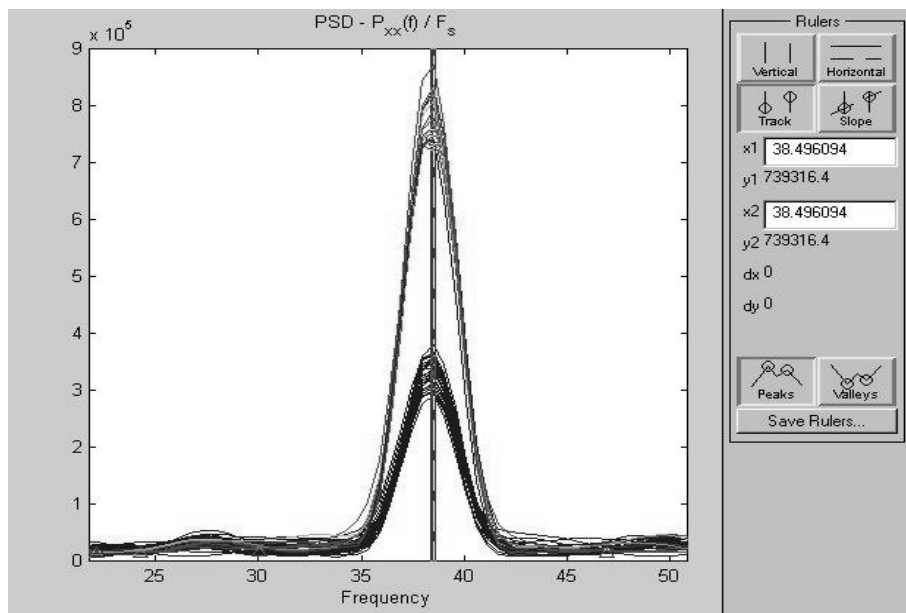


Figura 8.2a – Aquisições do desbalanceamento ocasionado pela inserção do peso de 0,1g no eixo-volante, mostrando a concordância de frequências (ordenadas em escala linear)

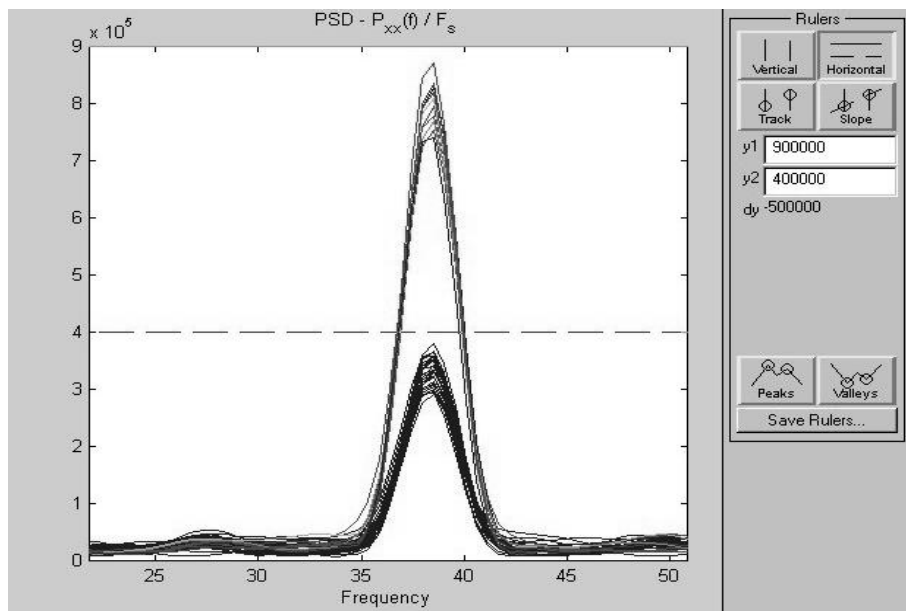


Figura 8.2b – Aquisições do desbalanceamento ocasionado pela inserção do peso de 0,1g no eixo-volante, mostrando a diferença de amplitudes (ordenadas em escala linear)

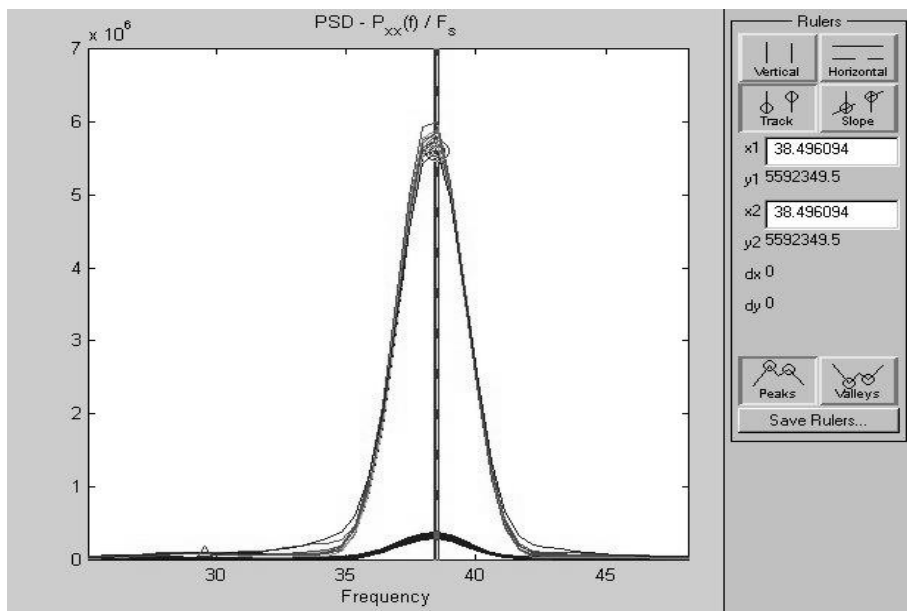


Figura 8.3a – Aquisições do desbalanceamento ocasionado pela inserção do peso de 5,1 g no eixo-volante, mostrando a concordância de frequências (ordenadas em escala linear)

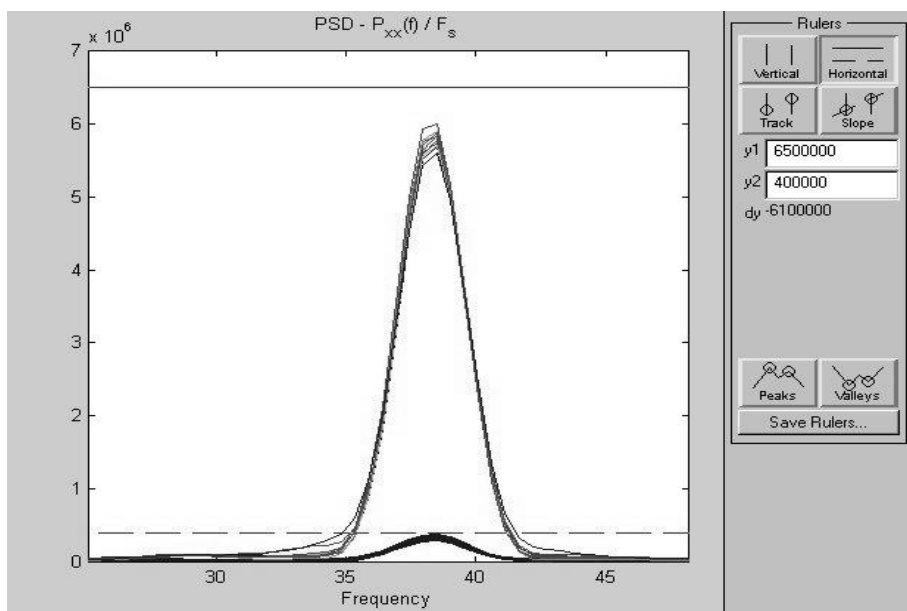


Figura 8.3b – Aquisições do desbalanceamento ocasionado pela inserção do peso de 5,1 g no eixo-volante, mostrando a diferença de amplitudes (ordenadas em escala linear)

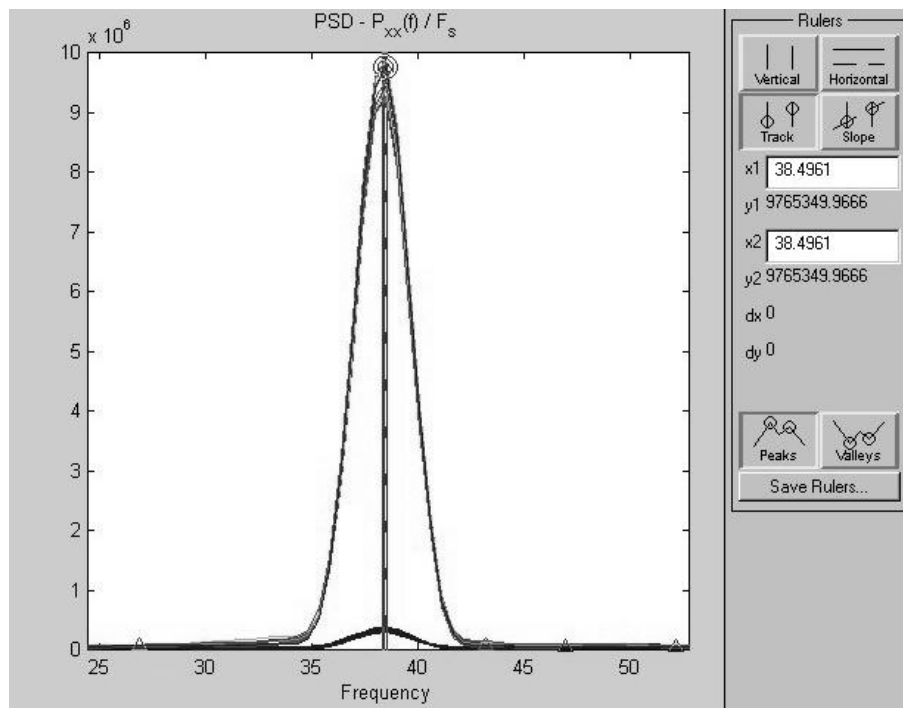


Figura 8.4a – Aquisições do desbalanceamento ocasionado pela inserção do peso de 7,2 g no eixo-volante, mostrando a concordância de frequências (ordenadas em escala linear)

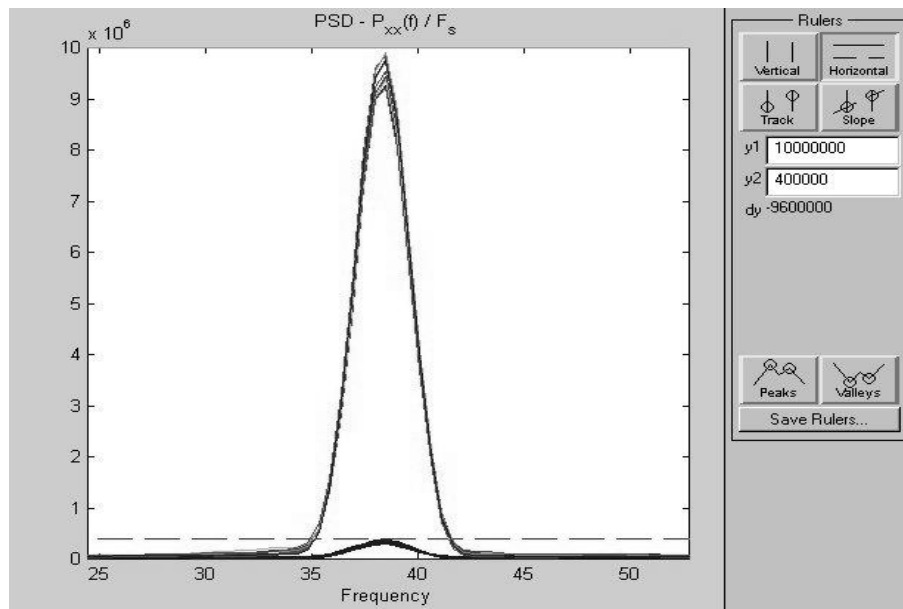


Figura 8.4b – Aquisições do desbalanceamento ocasionado pela inserção do peso de 7,2 g no eixo-volante, mostrando a diferença de amplitudes (ordenadas em escala linear)

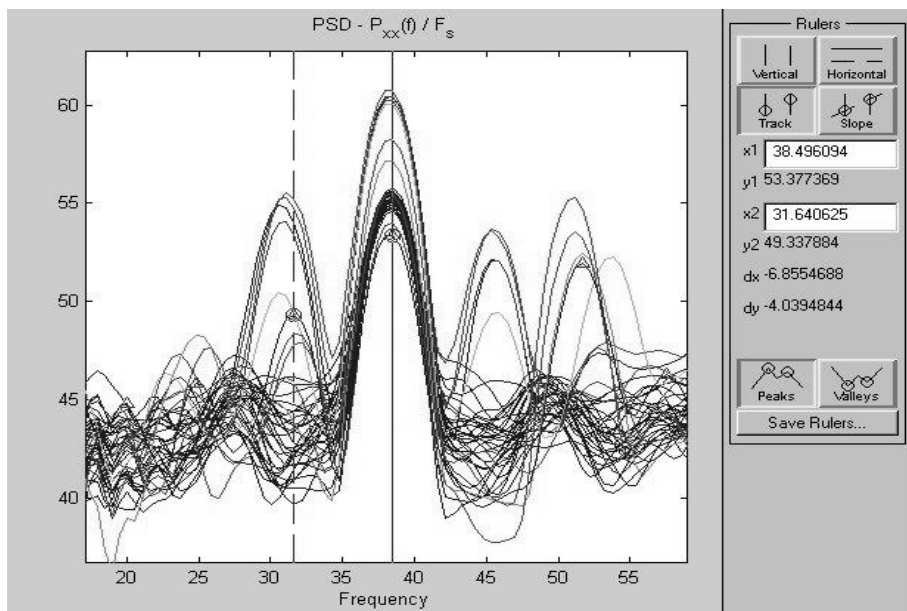


Figura 8.5a – Aquisições ocasionadas pelo desalinhamento das polias mostrando a concordância de frequências (ordenadas em escala logarítmica)

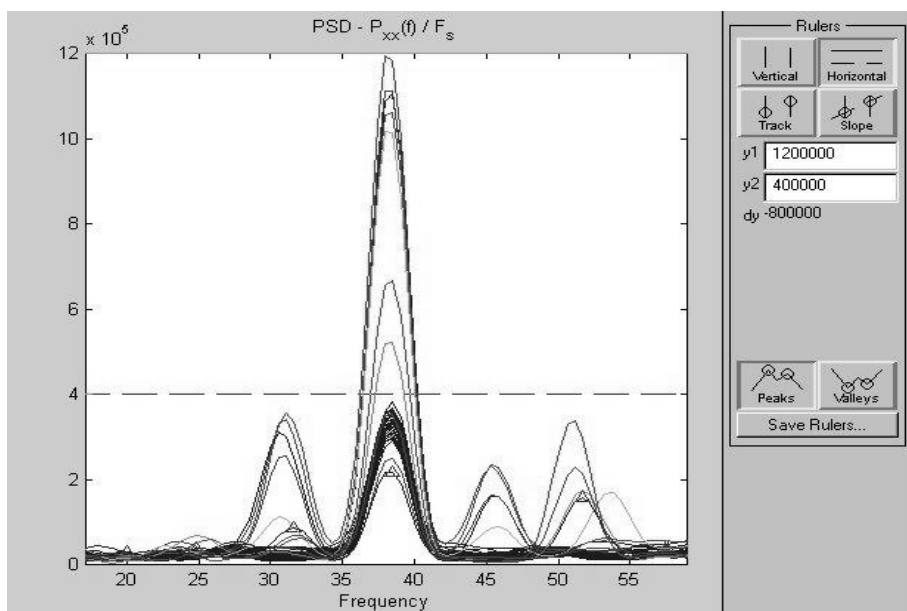


Figura 8.5b – Aquisições ocasionadas pelo desalinhamento das polias mostrando a diferença de amplitudes (ordenadas em escala linear)

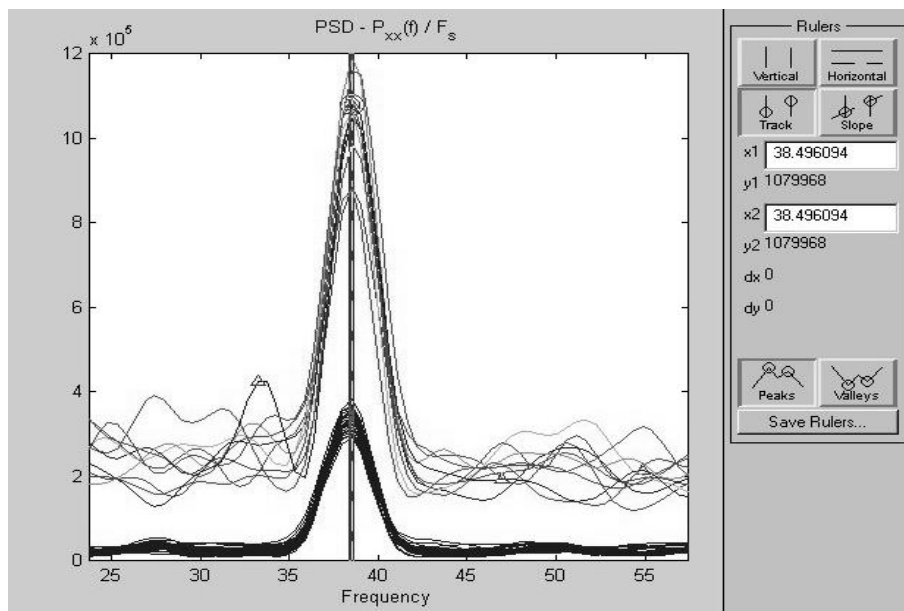


Figura 8.6a – Aquisições ocasionadas pelo afrouxamento das polias mostrando a concordância de frequências (ordenadas em escala linear)

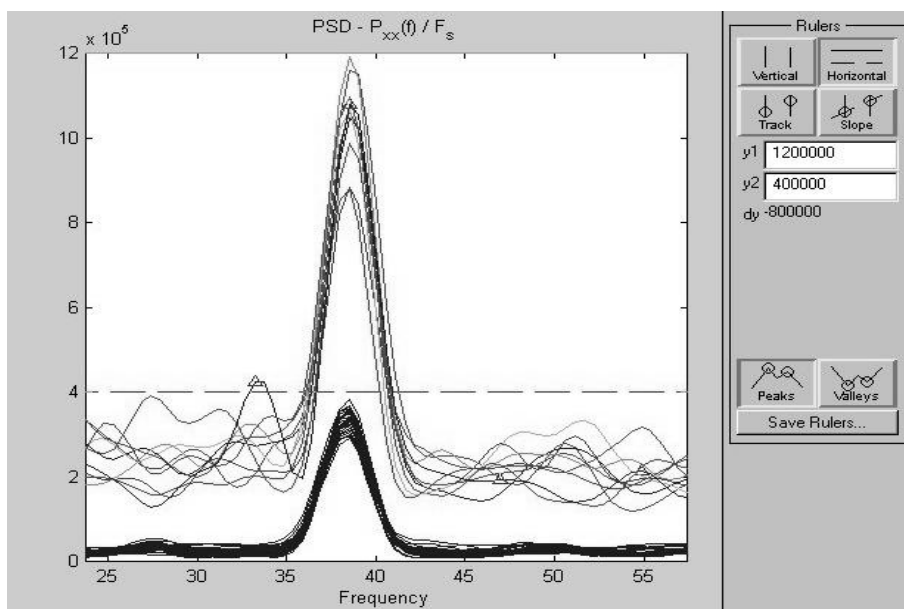


Figura 8.6b – Aquisições ocasionadas pelo afrouxamento das polias mostrando a diferença de amplitudes (ordenadas em escala linear)

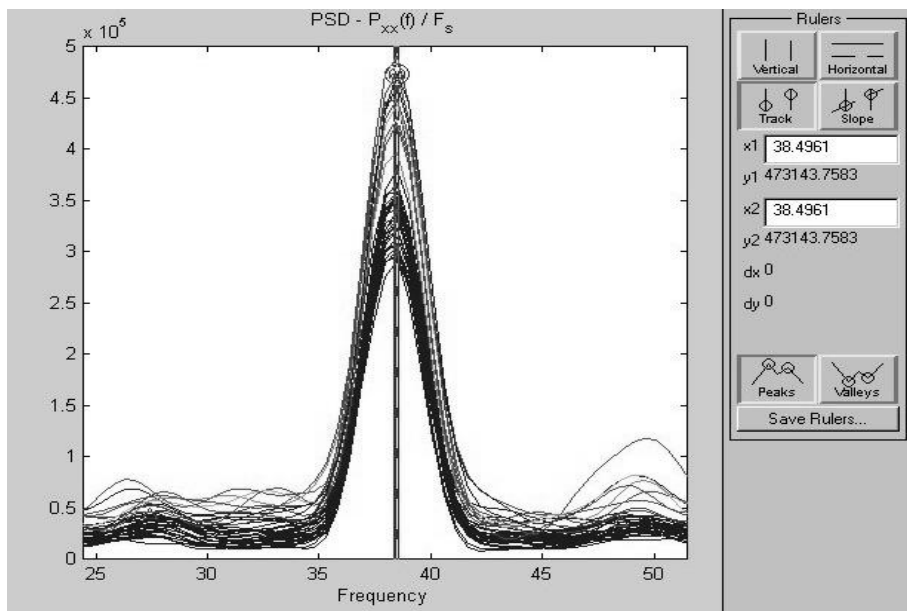


Figura 8.7a – Aquisições ocasionadas pela falta de fixação do eixo-volante mostrando a concordância de frequências (ordenadas em escala linear)

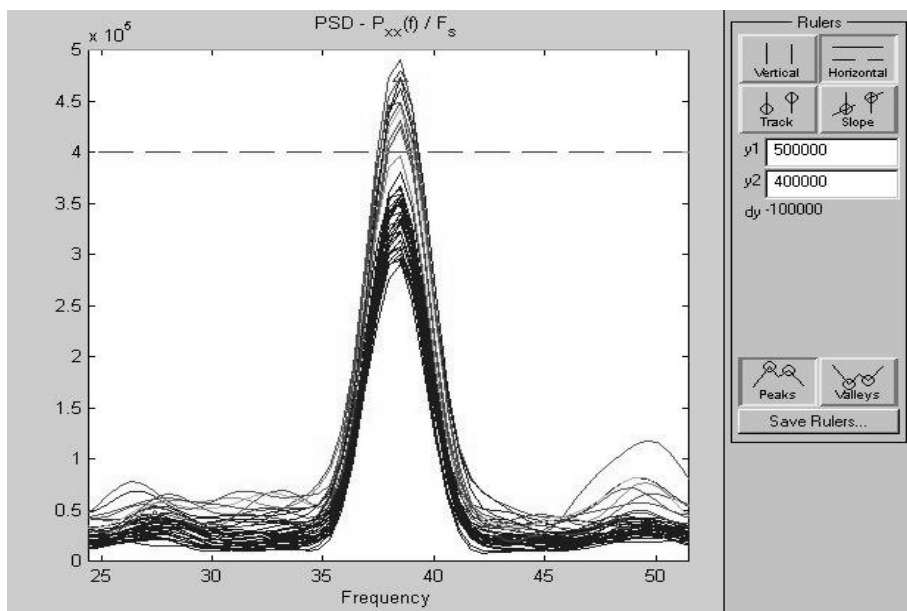


Figura 8.7b – Aquisições ocasionadas pelo falta de fixação do eixo-volante mostrando a diferença de amplitudes (ordenadas em escala linear)

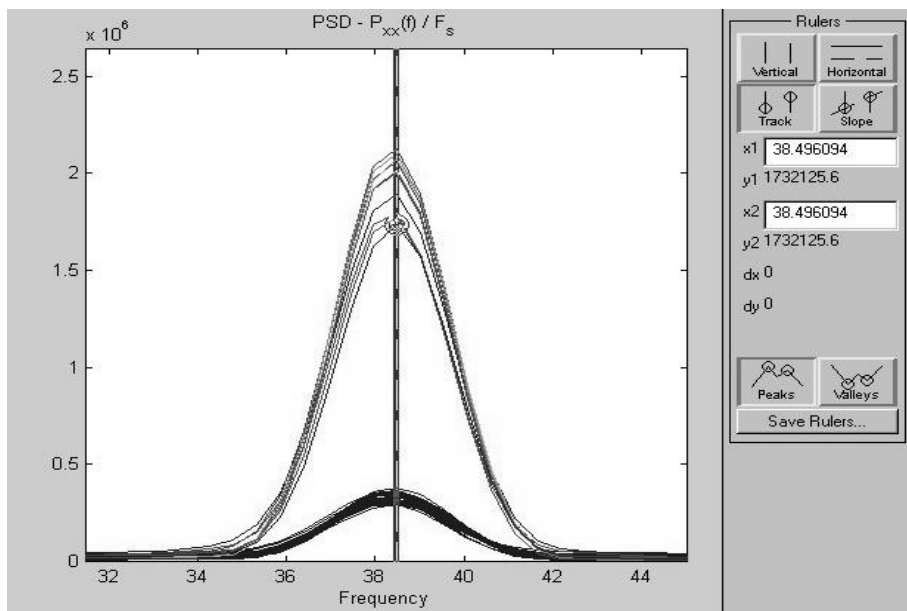


Figura 8.8a – Aquisições ocasionadas pelo afrouxamento da correia de transmissão do eixo-volante mostrando a concordância de frequências (ordenadas em escala linear)

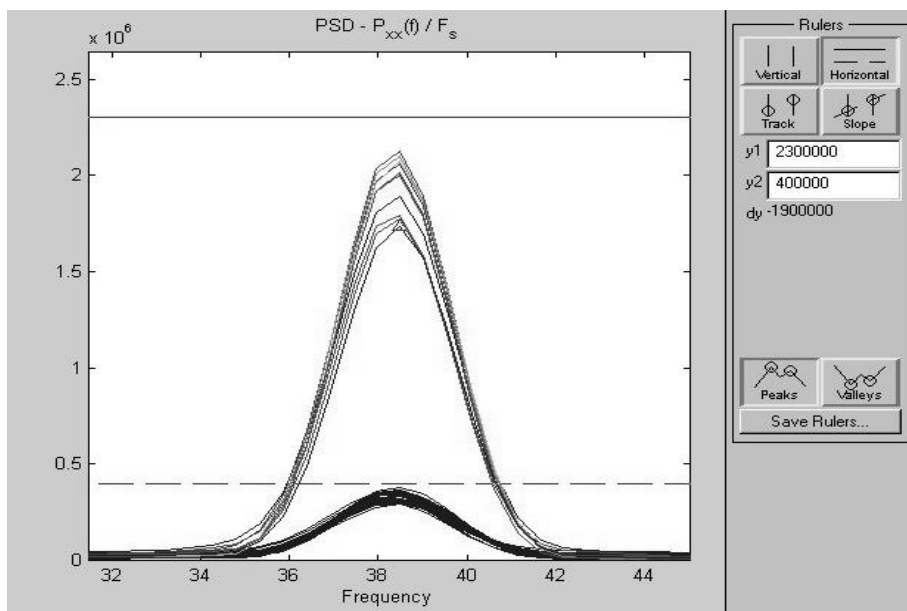


Figura 8.8b – Aquisições ocasionadas pelo afrouxamento da correia de transmissão do eixo-volante mostrando a diferença de amplitudes (ordenadas em escala linear)

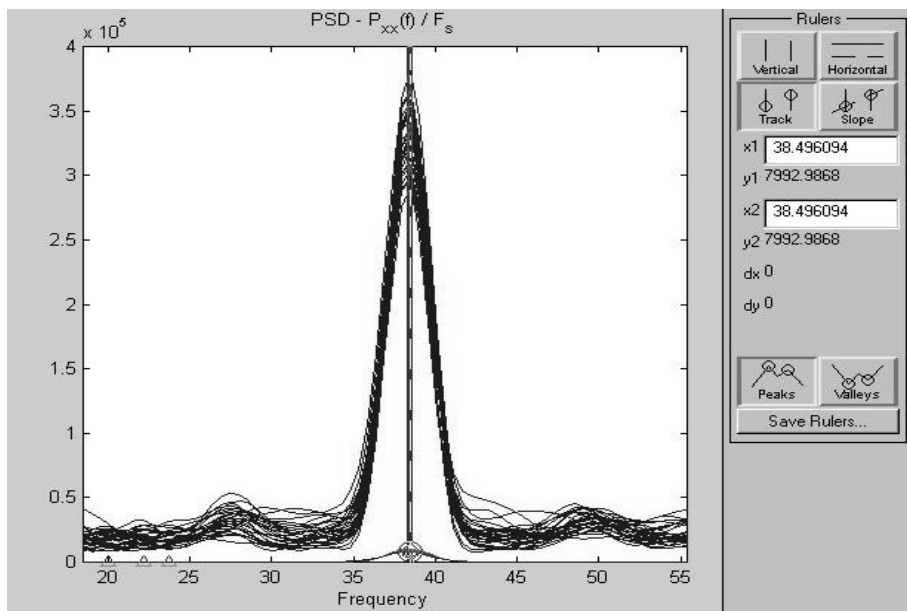


Figura 8.9a – Aquisições ocasionadas pela retirada da superfície de borracha que amortece o Sistema Rotativo mostrando a concordância de frequências (ordenadas em escala linear)

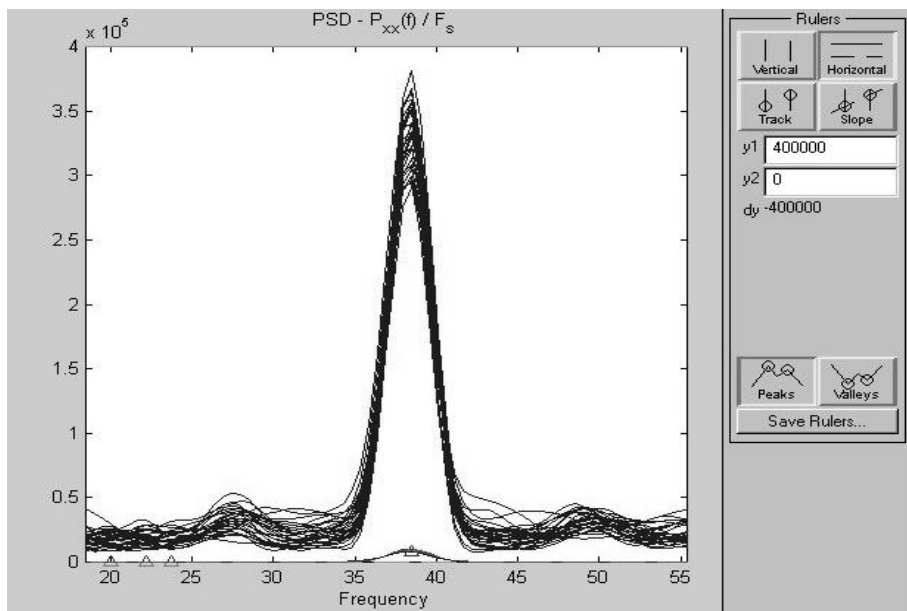


Figura 8.9b – Aquisições ocasionadas pela retirada da superfície de borracha que amortece o Sistema Rotativo mostrando a diferença de amplitudes (ordenadas em escala linear)

9. HISTÓRICO E CONCLUSÕES BASEADAS NOS EXPERIMENTOS

A idéia deste trabalho surgiu durante as experiências práticas que culminaram com uma dissertação [Març 95] que utilizou acelerômetros à base de filme piezoelétrico para um processo de discriminação de viscosidade de fluidos Newtonianos. Durante as experiências desenvolvemos um protótipo que ocasionava deslocamentos os quais excitavam o acelerômetro e possibilitavam, no processo, a medição e discriminação da viscosidade dos fluidos. Devido a quantidade de medidas necessárias e a situação que o protótipo era submetido este apresentava sinais de desgastes e desajustes, os quais mascaravam a legítima medida de cada fluido. Se fazia necessário de tempos em tempos interromper o processo de medições para dar manutenção ao protótipo. Após algum tempo de uso e familiarizados com o protótipo, era possível detectar pelas medidas que vinham sendo obtidas que o mesmo começava a apresentar alterações em seu estado de funcionamento. Aprendemos a reparar e ajustar o protótipo. Isto fez surgir a intenção de propormos um método que detectasse quando uma estrutura mecânica estava desviando da sua condição normal de funcionamento e desta forma evitando um defeito maior ou até mesmo uma alteração no produto final caso esta estrutura fizesse parte de uma linha de produção.

A determinação da estrutura a ser monitorada nesta proposta ditaria todos os demais integrantes do processo. A especificação do tipo de acelerômetro, do sistema de aquisição, da forma de processamento dos sinais adquiridos e outros passos dependeriam da estrutura escolhida.

Em um primeiro momento optamos pela utilização de uma estrutura disponível em nosso laboratório que parecia oferecer todos os quesitos para as comprovações. Tínhamos em mente a inserção de defeitos comuns em processos que pudessem comprometer o sistema. A estrutura serviu para que os sistemas de aquisições experimentados fossem sendo analisados considerando suas limitações e apropriações. Testamos e abandonamos sistemas de aquisição por limitações de faixa de frequência, por apresentarem ruídos, por possibilitarem somente aquisições de tempo limitado, etc. Inicialmente utilizamos um osciloscópio da HP que permite a aquisição, a gravação em arquivos, a aplicação e visualização simultânea da transformada de Fourier e também a impressão das medidas. Tal opção não atendeu ao nosso propósito, pois as medidas conseguidas só se davam em um pequeno instante de tempo o que não retrata a condição real de funcionamento de qualquer sistema dinâmico. A seguir usamos uma

placa de som e através do programa denominado GoldWave adquirimos os sinais de vibração. A sua limitação se dava na faixa de frequência do sistema de aquisição que se restringia a faixa de áudio (20 ~ 20 k Hz). O sistema de aquisição também apresentava ruídos que comprometiam muito as baixas frequências e interferiam na análise dos sinais. O passo seguinte foi a tentativa da utilização de um sistema que permitisse a aquisição em um tempo escolhido, em uma faixa de frequência que captasse a frequência de rotação da parte rotativa que era baixa (cerca de 30 Hz) e que introduzisse pouco ruído. Optamos pelo Psi25 que é um sistema de desenvolvimento para processamento digital de sinais, baseado no microprocessador TMS320C25. O sistema possibilita a aquisição a partir de 18 Hz.

A escolha do acelerômetro e a tecnologia a ser empregada também evoluiu a partir de modelos mais simples que a medida que indo sendo testados determinavam e dirigiam a decisão para a versão atual (ADXL 202). As razões da seleção está relacionada no item 5.3.1.3.1 deste trabalho.

A estrutura mecânica a ser utilizada também evoluiu. A inicial, que constava da proposta de qualificação, a qual se apresentava disponível para a inserção de avarias, dada a sua utilização para experiências anteriores (a mesma proporcionou uma tese [Brit94] e algumas dissertações), apresentava-se com muitos desgastes e a sua recolocação em uma condição de funcionamento ótima para que pudesse servir como referência de estado normal de operação exigiria a substituição de inúmeros componentes tornando-se inviável economicamente.

A validação do que já possuíamos, o acelerômetro biaxial ADXL 202, o sistema de aquisição Psi25 e o aplicativo Matlab para o processamento dos arquivos adquiridos foram comprovados com o auxílio de um pequeno ventilador usado para arrefecer microcomputadores. Neste ventilador inserimos elementos desbalanceadores em uma de suas pás de ventilação com a intenção de causar desequilíbrio no sistema girante. Os resultados obtidos mostravam que era possível detectarmos desbalanceamentos (ou desequilíbrios) no ventilador.

Como a intenção é propor um método que detecte modificações incipientes em máquinas rotativas para que se atue antes que estas evoluam para uma falha de maior porte procuramos construir uma estrutura mecânica, aqui denominada Sistema Rotativo, que permitisse a inserção de pequenas modificações (falhas incipientes) e avarias de funcionamento.

Com a ajuda de um especialista adaptamos o Sistema Rotativo a partir de um motor para que atendesse ao nosso propósito.

A partir daí, passamos às aquisições e às modificações que causassem alterações no estado de funcionamento do Sistema Rotativo. Em face dos resultados obtidos e da flexibilidade de sintonia, no sistema especialista que oferece o diagnóstico, para cobrir especificidades, concluímos que:

- ⇒ O método proposto detecta a ocorrência de alterações no estado de funcionamento de sistemas rotativos com uma considerável sensibilidade. O método detecta a inserção de um elemento desbalanceador de 0,1 g de massa em um volante de 1012 g de massa, o que resulta em uma relação de aproximadamente 1:10000.
- ⇒ As falhas, dentro do grupo classificado aqui como desajustes, podem ser previstas e evitadas pela indicação de modificações incipientes e pela possibilidade de acompanhamento de forma qualitativa e quantitativa da sua evolução. Tais modificações seguramente evoluiriam até a materialização de uma falha de funcionamento do tipo já relacionado causando maiores danos ao sistema.
- ⇒ Atende à proposta inicial que propõe a implementação da modalidade de manutenção preditiva, onde se pode pelo diagnóstico apresentado programar o momento certo de atuação no sistema.
- ⇒ O método pode ser aplicado a outros sistemas rotativos desde que devidamente adaptado. Esta adaptação refere-se desde a monitoração propriamente dita (o monitoramento de sistemas rotativos que apresentem frequências de rotação diferentes do que foi usado para a comprovação) como também a faixa de atuação dos valores que identificam os estados de operação do sistema (a faixa pode ser ajustada pela sintonia do sistema especialista *Fuzzy*).

10. CONTINUIDADE DO TRABALHO

O método na forma como está, se apresenta como um trabalho didático e com objetivos acadêmicos. A intenção é dar-lhe um formato industrial atendendo às necessidades de manutenção do setor de automação industrial e desta forma oferecê-lo como uma opção na modalidade de manutenção preditiva.

- Pretendemos substituir o sistema de aquisição utilizado, o Psi25, que necessita de uma placa de interface instalada em um “*slot*” do PC, por um sistema de aquisição composto por um microcontrolador que permita a comunicação por interface serial ou paralela, dispensando o uso do “*slot*” do PC e desta forma deixando-o mais disponível para uso com outros PCs.
- Dar continuidade na obtenção de mais dados para que se possa mapear melhor o comportamento característico de cada avaria no espectro e desta forma poder identificá-la dentro do grupo denominado, neste trabalho, de desajustes. No momento detectamos a existência de uma modificação incipiente ou uma falha monitorando a amplitude de vibração somente na frequência de rotação do eixo_volante (38,5 Hz), desconsiderando as demais harmônicas desta frequência. Quando temos uma alteração nesta frequência consideramos que está ocorrendo uma modificação no estado de funcionamento do Sistema Rotativo do tipo: desbalanceamento, desalinhamento, jogo excessivo, falta de rigidez, acoplamento defeituoso, correias frouxas ou gastas, eixos deformados, etc
- Considerar a possibilidade de se implantar uma versão futura onde a sintonia do sistema especialista *Fuzzy* fosse feita de forma inteligente a partir de determinações do especialista (operador humano) e da necessidade do cliente. Pensamos em desenvolver um versão onde haja a determinação do padrão de funcionamento partindo de um número estipulado de coleta de dados pelo sistema de aquisição, considerando o sistema em perfeito estado de funcionamento. Os limites de normalidade e dos demais estados (falha incipiente, manutenção e perigo) fossem automaticamente (inteligentemente) fixados obedecendo os parâmetros fixados por um especialista (operador

humano) o qual levará em consideração as exigências e especificidade do processo.

- Criar um sistema que aprende. Os fabricantes de máquinas ou as equipes de manutenção poderiam fazer o sistema aprender o que é um estado “bom” e um estado com defeito, para cada tipo de defeito. Após o treinamento o sistema detectará quando o sintoma e um defeito começa a se manifestar. Há situações em que não é possível inserir defeito para treinar o sistema mas o defeito pode ocorrer naturalmente. Além disso, é possível determinar a alteração de comportamento do espectro de vibração em função de defeitos a partir da análise do mecanismo, analiticamente ou por simulação. Estes dados serão utilizados para criar as regras do sistema *Fuzzy*.

Esperamos com este estudo e proposta contribuir para a iniciativa de implantação desta tecnologia de ponta (*Fuzzy*) no campo de investigações de falhas incipientes e falhas de funcionamento propiciando mais um método alternativo na manutenção preditiva de máquinas e motores.

BIBLIOGRAFIA

[Allo 84] - *Transducers: theory and application.*

ALLOCCA, J. A.; Reston Publishing Company, Inc. A Prentice-Hall Company, Reston, Virgínia, 1984.

[Blaa 95] - *Determination of Mechanical Resonances in Induction Motors by Random Modulation and Acoustic Measurement.*

BLAABJER, F.; PEDERSEN, J. K.; RICHIE, E. and NIELSEN, P.; IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 31, n^o 4, Julho/Agosto de 1995.

[Borc 84] - *Condicionador universal para uso em extensometria.*

BORCHARDT, I. G.; In: 2^o Simpósio de Manutenção de Instrumentos, Porto Alegre, setembro de 1984. Anais: Rio de Janeiro, IBP, pp. 265-273, 1984.

[Borc 91] - *Instrumentação para monitoração e controle de processos.*

BORCHARDT, I. G. e BRITO, R. M.; Caderno Técnico - INMETAL - PPEGM, 48 p., Porto Alegre, 1991.

[Borc 95] - *Uma Taxonomia para a instrumentação.*

BORCHARDT, I. G.; SUSIN, A. A. e BRITO, R. M.; In: III CINISA, São Paulo, Dezembro 1995.

[Brit 92] - *Instrumentação Eletro-Eletrônica para medição direta de Torque em Sistemas Girantes utilizando Extensômetros de Resistência Elétrica.*

BRITO, R. M.; Proposta de Tese de Doutorado, PPGEM/UFRGS, Porto Alegre, 1992.

[Brit 94] - *Sistema Eletro-Eletrônico para Medição Direta de Torque em Dispositivos Girantes Utilizando Extensômetros de Resistência Elétrica.*

BRITO, R. M.; Tese de Doutorado, PPGEM/UFRGS, Porto Alegre, 1994.

[Buen 89] - *Dicionário da Língua Portuguesa.*

BUENO, F. S.; Editora Lisa, 3^a Edição, São Paulo, 1989.

[Cher 95] - *Unsteady Isentropic Flow through Ducts with Prescribed Sound Pressure Level Distribution.*

CHERNG, J. G. and NA, T. Y.; University of Michigan, Dearborn, Journal of Vibration and Acoustics, vol. 117, pp. 279-284, Julho de 1995.

[Chow 97] - *Methodologies of using neural network and fuzzy logic technologies for motor incipient fault detection.*

CHOW, M. Y.; World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. Singapore, 1997.

[Cole 95] - *Modal Parameter Estimation for Piezostructures.*

COLE, D. G.; SAUNDERS, W. R. and ROBERTSHAW, H. H.; Department of Mechanical Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Journal of Vibration and Acoustics, vol. 117, pp. 431-438, Outubro de 1995.

[Doeb 90] - *Measurement Systems Application and Design.*

DOEBELIN, E. D.; Fourth Edition. McGraw Hill, New York, 1990.

[Dymo 95] - *Forward Stall Test: An Alternate Method of Rotor and Stator Loading for Temperature and Vibration Verification.*

DYMOND, J. H.; General Electric Canada, Inc., Peterborough, Ontario, CA., IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 31, n^o 5, Setembro/Outubro de 1995.

[Filh 87] - *Emissão acústica na manutenção preditiva e preventiva.*

FILHO, P. F.; Artigo técnico, Divisão de Emissão Acústica da Brasiltest S.A., Manutenção, pp. 44-47, Fevereiro de 1987.

[Gabr 95] - *Fundamental Noise Limits for Miniature Acoustic and Vibration Sensors.*

GABRIELSON, T. B.; NAWC Aircraft Divison, Warminster, Journal of Vibration and Acoustics, vol. 117, pp. 405-410, Outubro de 1995.

[Gerg 87] - *Análise de vibrações para diagnóstico de falhas em engrenagens.*

GERGES, S. N. Y. e LIMA, N. N. C.; Artigo técnico, Laboratório de Vibrações e Acústica, Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC, Florianópolis, SC., Manutenção, pp. 18-22, Julho de 1987.

[Gu 94] - *Experiments on active Control of Plate Vibration Using Piezoelectric Actuators and Polyvinylidene Fluoride (PVDF) Modal Sensors.*

GU, Y.; CLARK, R. L. and FULLER, C. R.; Journal of Vibration and Acoustics, vol 116, pp. 303-308, Julho de 1994.

[Hosh 95] - *Analysis of Plane Ultrasonic Piezoelectric Actuators.*

HOSHI, N. and KAWAMURA, A.; Department of Electrical and Computer Engineering, Yokohama National University, Yokohama, Japan, IEEE Industry Applications Magazine, pp. 23-29, Julho/Agosto de 1995.

[INME 89] - *Sistema computadorizado de uma bancada de testes para ensaio de torquímetros rotativos.*

INMETAL; Projeto PADCT, Ref. 52.89.05.26.00 - 1989.

[Kawa 69] - *The Piezoelctricity of Poly (Vinylidene Fluoride).*

KAWAI, H.; J. Appl. Phys., vol 8, n^o 6, pp. 975, 1969.

[Key 95] - *Predicting Behavior of Induction Motors During Service Faults and Interruptions.*

KEY, T. S.; Power Electronics Applications Center, Knoxville, IEEE Industry Applications Magazine, pp. 6-11, Janeiro/Fevereiro de 1995.

[Koka 97] - *Variable Frequency Drives for Commercial Laundry Machines.*

KOKALJ, D. G.; Proceedings of the 1995 International Appliance Technical Conference, IEEE Industry Applications Magazine, Maio/Junho de 1997.

[Kova 89] - *Capteur d'Actigraphie par Accélérométrie Piézoélectrique.*

KOVALESKI, J. L.; Monografia, UJFG, Grenoble, França, 1989.

[Kova 92] - *Étude, modélisation et réalisation de capteurs d'accélération et force a base de Polymère Piézoélectrique PVF₂.*

KOVALESKI, J. L.; Tese de Doutorado. Grenoble, França, Setembro de 1992.

[Kuma 95] - *Vibrations of Composite Noncircular Cylindrical Shells.*

KUMAR, V. and SINGH, A. V.; Department of Mechanical Engineering, Univesity of Western Ontario, Ontario, Canada, Journal of Vibration and Acoustics, vol. 117, pp. 470-476, Outubro de 1995.

[Lich 87] - *Trends in Accelerometer Calibration.*

LICHT, T. R. and ANDERSEN, H.; Technical Review, BRÜEL & KJAER, n^o 2, 1987.

[Marc 82] - *Ferroelectric Polymers and their applications.*

MARCUS, M. A.; Ferroelectric, vol. 40, pp. 29-41, 1982.

[Març 95] - *Aplicação do Polímero Piezoelétrico Polifluoreto de Vinilidênio - PVF₂ como sensor em medição de viscosidade de fluidos Newtonianos.*

MARÇAL, R. F. M.; Dissertação de Mestrado, PPGEI/CEFET-PR, Curitiba, Agosto de 1995.

[Març 96] - *Caracterização de um acelerômetro à base do filme piezoelétrico Polifluoreto de Vinilidênio - PVF₂.*

MARÇAL, R. F. M.; Relatório técnico, PPGEM/UFRGS/IEE, Porto Alegre, Setembro de 1996.

[Març 97a] - *A Poly Vinylidene Fluoride (PVF₂) piezoelectric film based Accelerometer.*

MARÇAL, R. F. M.; KOVALESKI, J. L. and SUSIN, A. A.; Anais: IEEE - Instrumentation and Measurement Technology Conference 97, vol. 2, pp. 908-913, Ottawa, Canadá, Maio de 1997.

[Març 97b] - *Discriminação de Viscosidade usando o Polímero Piezoelétrico.*

MARÇAL, R. F. M.; KOVALESKI, J. L. e SUSIN, A. A.; Anais SIDI 97 – Seminário Interno do Departamento de Engenharia Elétrica e da Instrumentação Eletro-Eletrônica, pp. 42-46, Porto Alegre, Setembro de 1997.

[Març 98a] - *O Polímero Piezoelétrico Poly (Vinylidene Fluoride) - PVF₂ como Sensor de Aceleração.*

MARÇAL, R. F. M.; KOVALESKI, J. L. e SUSIN, A. A.; Seminário e Exposição de Instrumentação e Automação, SINA 98, IBP, Rio de Janeiro, 5 a 8 de Outubro de 1998.

[Març 98b] - *Diagnóstico do estado de funcionamento de máquinas rotativas por análise de vibrações e Lógica Fuzzy.*

MARÇAL, R. F. M. e SUSIN, A. A.; Anais SIDI 98 – Seminário Interno do Departamento de Engenharia Elétrica e da Instrumentação Eletro-Eletrônica, pp. 76-79, Porto Alegre, Novembro de 1998.

[Març 99] - *Aquisição de Dados para Monitoramento do Estado de Funcionamento de Máquinas Rotativas por Análise do Padrão de Vibração.*

MARÇAL, R. F. M.; NEGREIROS, M, TOMAZZONI, C. e SUSIN, A. A.; Anais SIDI 99 – Seminário Interno do Departamento de Engenharia Elétrica e da Instrumentação Eletro-Eletrônica, pp. 24-27, Porto Alegre, Dezembro de 1999.

[Març 00a] - *Method to Detect Incipient Faults in Rotating Machines Based on Vibration Analysis and Fuzzy Logic.*

MARÇAL, R. F. M.; NEGREIROS, M.; SUSIN, A. A. & KOVALESKI, J. L. A Anais IEEE, Virtual and Intelligent Measurement Systems VIMS 2000, pp. 69-74, Annapolis, MD, USA, April 2000.

[Març 00b] - *Detecting Faults in Rotating Machines.*

MARÇAL, R. F. M.; NEGREIROS, M.; SUSIN, A. A. & KOVALESKI, J. L.
Edição especial da IEEE Instrumentation and Measurement Magazine, Vol. 3, N°
4, pp 24-26, Dezembro de 2000.

[Maud 97] - *Pressure Sensor Performance and Reliability.*

MAUDIE, T. and WERTZ, J.; Motorola Semiconductor Products Sector, Sensor
Products Divison, Phoenix, IEEE Industry Applications Magazine, pp. 37-43,
Maio/Junho de 1997.

[McFa 94] - *Window Functions for the Calculation of the Time Domain Averages of
the Vibration of the Individual Planet Gears and Sun Gear in an Epicyclic
Gearbox.*

McFADDEN, P. D.; Department of Engineering Science, Oxford University,
Oxford, England, Journal of Vibration and Acoustics, vol. 116, pp. 179-187, Abril
de 1994.

[Mead 83] - *Lock-in amplifiers: principles and applications.*

MEADE, M. L.; Peter Peregrinus Ltda., London U. K., 232 p., 1983.

[Mech 93] - *Machine Condition Monitoring: Part 1 - Optimum Vibration Signal
Lengths.*

MECHEFSKE, C. K.; British journal of NDT, vol. 35, n° 9, pp. 503-507, Setembro
de 1993.

[Mech 93] - *Machine Condition Monitoring: Part 2 - The Effects of Noise in the
Vibration signal.*

MECHEFSKE, C. K.; British journal of NDT, vol. 35, n° 10, pp. 574-579, Outubro
de 1993.

[Mill 95] - *Modelling and Performance of an Experimental Active Vibration Isolator.*

MILLER, L. R.; AHMADIAN, M.; NOBLES, C. M. and SWANSON, D. A.; Lord
Corporation, Erie, Journal of Vibration and Acoustics, vol. 117, pp. 272-278, Julho
de 1995.

[NBR 83] - ***Balanceamento de corpos rígidos rotativos.***

NBR 8008, ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, Maio de 1983.

[Nort 82] - ***Sensor and Analyser Handbook.***

NORTON, H. N.; Prentice-Hall, 1982.

[Nova 95] - ***A Case Study of Acoustics and Vibration of Mine Fans.***

NOVAK, T. and VITTON, S. J.; Department of Mineral Engineering, University of Alabama, Tuscaloosa, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 31, n^o 6, Novembro/Dezembro de 1995.

[Okad 95] - ***Self-sensing Active Vibration Control using the Moving-Coil-Type Actuator.***

OKADA, Y.; MATSUDA, K. and HASHITANI, H.; Department of Mechanical Engineering, Ibaraki University, Hitachi, Japan, Journal of Vibration and Acoustics, vol. 117, pp. 411-415, Outubro de 1995.

[Park 94] - ***Source Identification using Multi-Input/Single-Output Modeling and Causality Checking of Correlated Inputs.***

PARK, J. S. and KIM, K. J.; Center for Noise and Vibration Control, Department of Mechanical Engineering, Kaist, Korea, Journal of Vibration and Acoustics, vol. 116, pp. 232-236, Abril de 1994.

[Raja 95] - ***Natural Vibration of a Cavity Backed Rectangular Plate using a Receptor-Rejector System Model.***

RAJALINGHAM, C.; BHAT, R. B. and XISTRIS, G. D.; Department of Mechanical Engineering, Concordia University, Montreal, Quebec, Canada, Journal of Vibration and Acoustics, vol. 117, pp. 416-423, Outubro de 1995.

[Ran 96] - ***Torsional Vibrations in Electrical Induction Motor Drives during Start-up.***

RAN, L.; YACAMINI, R. and SMITH, K. S.; Department of Engineering, University of Aberdeen, Journal of Vibration and Acoustics, vol. 118, pp. 242-251, Abril de 1996.

[Ritt 96] - *Análise Vibracional Aplicada ao Monitoramento de Máquinas Rotativas.*

RITTER, M. A.; Trabalho final de Graduação em Engenharia Mecânica UFRGS, Porto Alegre, Agosto de 1996.

[Roth 94] - *Vibration Measurements on Rotating Machinery using Laser Doppler Velocimetry.*

ROTHBERG, S. J. and HALLIWELL, N. A.; Department of Mechanical Engineering, Loughborough University of Technology, Loughborough, Leicestershire, UK., Journal of Vibration and Acoustics, vol. 116, pp. 326-331, Julho de 1994.

[Schü 96] - *Equipamento de ensaio para acelerômetros piezoelétricos.*

SCHÜLER, E.; Dissertação de Mestrado, PPGEM/UFRGS/IEE, Porto Alegre, Dezembro de 1996.

[Shan 94] - *A New Approach to the Early Prediction of Turning Chatter.*

SHAN-FEI BAO et Alli.; Journal of Vibration and Acoustics, Vol 116, pp. 485-488, Outubro de 1994.

[Shaw 99] - *Controle e Modelagem Fuzzy.*

SHAW, Ian S. e SIMÕES, Marcelo G.; Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 1999]

[Snyd 95] - *The use of Optimally Shaped Piezo-electric Film Sensors in the Active Control of Free Field Structural Radiation, Part 1: Feedforward Control.*

SNYDER, S. D.; TANAKA, N. and KIKUSHIMA, Y.; Machine Dynamics Divison, Mechanical Engineering Laboratory, Tsukuba Science City, Japan, Journal of Vibration and Acoustics, vol. 117, pp. 311-322, Julho de 1995.

[Snyd 96] - *The use of Optimally Shaped Piezo-electric Film Sensors in the Active Control of Free Field Structural Radiation, Part 2: Feedforward Control.*

SNYDER, S. D.; TANAKA, N. and KIKUSHIMA, Y.; Mechanical Engineering Laboratory, Agency of Industrial Science & Technology, Ministry of International Trade & Industry, Tsukuba Science City, Japan, Journal of Vibration and Acoustics, vol. 118, pp. 112-121, Janeiro de 1996.

[So 95] - ***Hybrid Stepping Motor Vibration.***

SO, E. C. T.; WILLIAMS, R. G. D. and YANG, S. J.; Department of Computing and Electrical Engineering, Heriot-Watt University, Riccarton, U.K., IEEE Industry Applications Magazine, pp. 21-27, Maio/Junho de 1995.

[Sped 96] - ***The effect of sensor geometry on the use of polyvinylidene fluoride as an acoustic emission sensor.***

SPEEDING, N. B.; INSIGHT, vol. 38, n^o 1, Janeiro de 1996.

[Sung 96] - ***Piezoelectric Modal Sensor/ Actuator Design for Monitoring/ Generating Flexural and Torsional Vibrations of Cylindrical Shells.***

SUNG, C. K.; CHEN, T. F. and CHEN, S. G.; Department of Power Mechanical Engineering, National Tsing Hua University, Hsinchu, Taiwan. Journal of Vibration and Acoustics, vol. 118, pp. 48-55, Janeiro de 1996.

[Tang 95] - ***Combined Piezoelectric-Hydraulic Actuator Based Active Vibration Control for Rotordynamic System.***

TANG, P.; PALAZZOLO, A.; KASCAK, A.; MONTAGUE, G. and LI, W.; Mechanical Engineering Department, Texas A & M University, College Station and U.S. Army at NASA Lewis, Cleveland, OH, Journal of Vibration and Acoustics, vol. 117, pp. 285-293, Julho de 1995.

[Tsen 94] - ***On the Vibration of Bolted Plate and Flange Assemblies.***

TSENG, J. G. and WICKERT, J. A.; Departement of Mechanical Engineering, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Journal of Vibration and Acoustics, vol. 116, pp. 468-473, Outubro de 1994.

[Tust 87] - ***How to Calibrate Accelerometer Systems.***

TUSTIN, W.; Tustin Institute of Technology, Inc., Santa Barbara, CA., Evaluation Engineering Vibrations, Maio de 1987.

[Tzou 94] - *A Piezothermoelastic thin Shell Theory Applied to Active Structures.*

TZOU, H. S. and HOWARD, R. V.; Department of Mechanical Engineering, University of Kentucky, Lexington, Journal of Vibration and Acoustics, vol. 116, pp. 295-302, Julho de 1994.

[Varg 90] - *Vibration Testing of Machines and Their Maintenance.*

VARGA, G.; LIPOVSZKY, G. and SÓLYOMVÁRI, K.; Ed. Elsevier, Amsterdam, 1990.

[Wang 88] - *The applications of Ferroelectric Polymers.*

WANG, T. T. and FURUKAWA, T.; Ed. Blackie and Son LTDA. Cap. 5, London, 1988.

[Wang 94] - *Dynamic Analysis and Design of a Machine Tool Spindle-Bearing System.*

WANG, W. R. and CHANG, C. N.; Department of Mechanical Engineering, National Central University, Taiwan, Journal of Vibration and Acoustics, vol. 116, pp. 280-285, Julho de 1994.

[Wils 94] - *Experimental Modal Analysis of a Suspension Assembly Loaded on a Rotating Disk.*

WILSON, C. J. and BOGY, D. B.; Hewlett-Packard Laboratories, Palo Alto and Computer Mechanics Laboratory, Department of Mechanical Engineering, University of California, Berkeley, Journal of Vibration and Acoustics, vol. 116, pp. 85-112, Janeiro de 1994.

[Wu 95] - *Analysis and Reduction of Vibration and Acoustic Noise in the Switched Reluctance Drive.*

WU, C. and POLLOCK, C.; IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 31, n^o 1, Janeiro/Fevereiro de 1995.

[Ya'c 83] - *El Diagnostico de fallas por analisis vibratorio.*

YA' CUBSOHN, R. V.; Editora Die Techik Ltda. São Paulo, 1983.

PSI25

1 - Descrição do sistema

Arquitetura

O Psi25 é um sistema de desenvolvimento para processamento digital de sinais baseado no microprocessador TMS320C25, com as seguintes características de projeto:

- 1.modularidade
- 2.interconectabilidade
- 3.expansível
- 4.flexibilidade de I/O: independente da aplicação
- 5.modos de operação “stand alone” ou conectado a um microcomputador hospedeiro
- 6.independência do computador hospedeiro
- 7.suporte ao desenvolvimento (prototipação) de hardware e software

Uma placa de DSP modular é considerada neste caso como uma placa capaz de operar sozinha (stand alone) e também de ser conectada diretamente a outras placas processadoras do mesmo tipo ou a um computador hospedeiro.

O diagrama em blocos do sistema Psi25 pode ser visto na figura 1. Esta arquitetura está baseada nas seguintes premissas:

A interface com o computador hospedeiro não está a cargo da placa com o microprocessador;

- As facilidades de IO não estão a cargo da placa com microprocessador;
- A inter conexão de placas microprocessadas (do mesmo tipo ou não) é feita através de uma placa de interface de memória, baseada num mecanismo de acesso com árbitro.

As seguintes vantagens podem ser salientadas nesta proposta:

- A placa de interface com o microcomputador hospedeiro age como uma camada de isolamento, permitindo que a placa microprocessada possa ser conectada a um amplo número de computadores hospedeiros;
- A placa de interface de memória suporta um canal de comunicações simples e rápido entre diferentes placas à velocidade do processador, já que não existe camada de interface entre o sistema microprocessado e a memória, a não ser o próprio árbitro;
- O sistema de IO pode ser ligado diretamente à placa microprocessada e, ao mesmo tempo, pode ser ajustado especificamente para uma aplicação;
- O custo do sistema pode ser mantido baixo, já que a única parte dependente da aplicação é a interface de IO;

A interface com o computador hospedeiro pode ser utilizada no sentido de prover grande capacidade de armazenamento de dados e também uma melhor interface com o usuário.

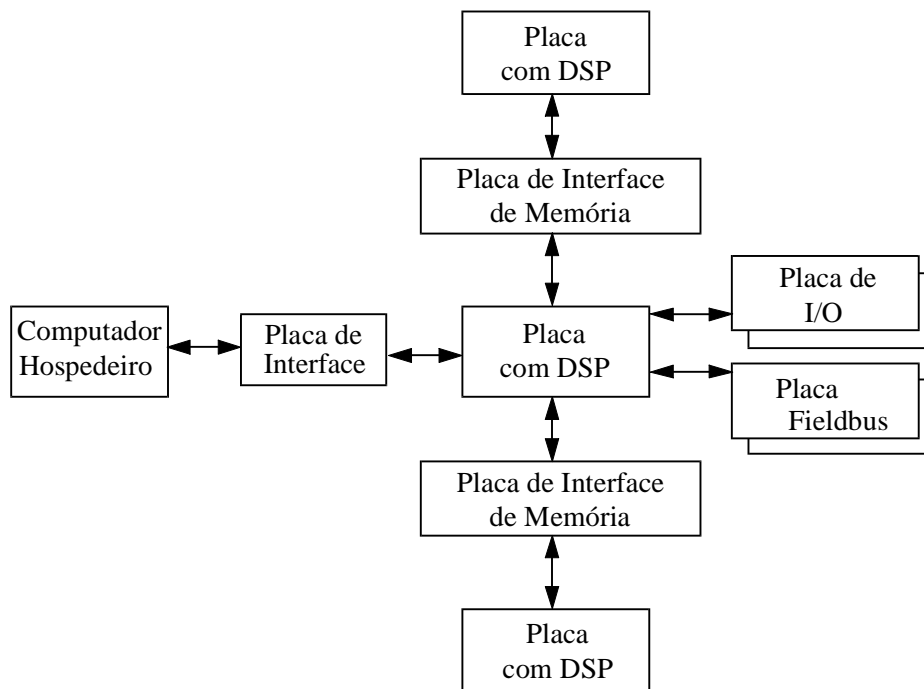


FIGURA 1.1 - Arquitetura do sistema PSi25

O sistema implementado atualmente (versão 2.2) utiliza como computador hospedeiro um micro do tipo IBM PC-AT compatível com barramento ISA 16 [IBM84], ao qual está ligada a placa de interface. A placa microprocessada utiliza um processador para DSP de segunda geração da Texas Instruments - TMS320C25 ([manual, applications]). Estas placas serão denominadas, de agora em diante, de pc2c25 e c25sys respectivamente.

O diagrama em blocos do sistema implementado pode ser visto na figura 2. Nesta figura estão representadas as placas pc2c25 e c25sys, além de sua ligação com o PC. A ligação entre as placas é feita através de um conector de interface, provendo acesso direto aos barramentos de endereços, dados e controle da placa c25sys. Os conectores de IO e expansão também são representados, mas os dispositivos não possuem tal liberdade por usarem barramentos bufferizados. A placa c25sys possui um temporizador programável para utilização pelos dispositivos de IO ou pela própria CPU.

O sistema é acessado pelo computador hospedeiro através de diversos endereços de IO, que permitem o acesso aos espaços de memória e de IO da placa c25sys, ao registrador de endereços, aos registradores de interface (RARB) e ao registrador de controle.

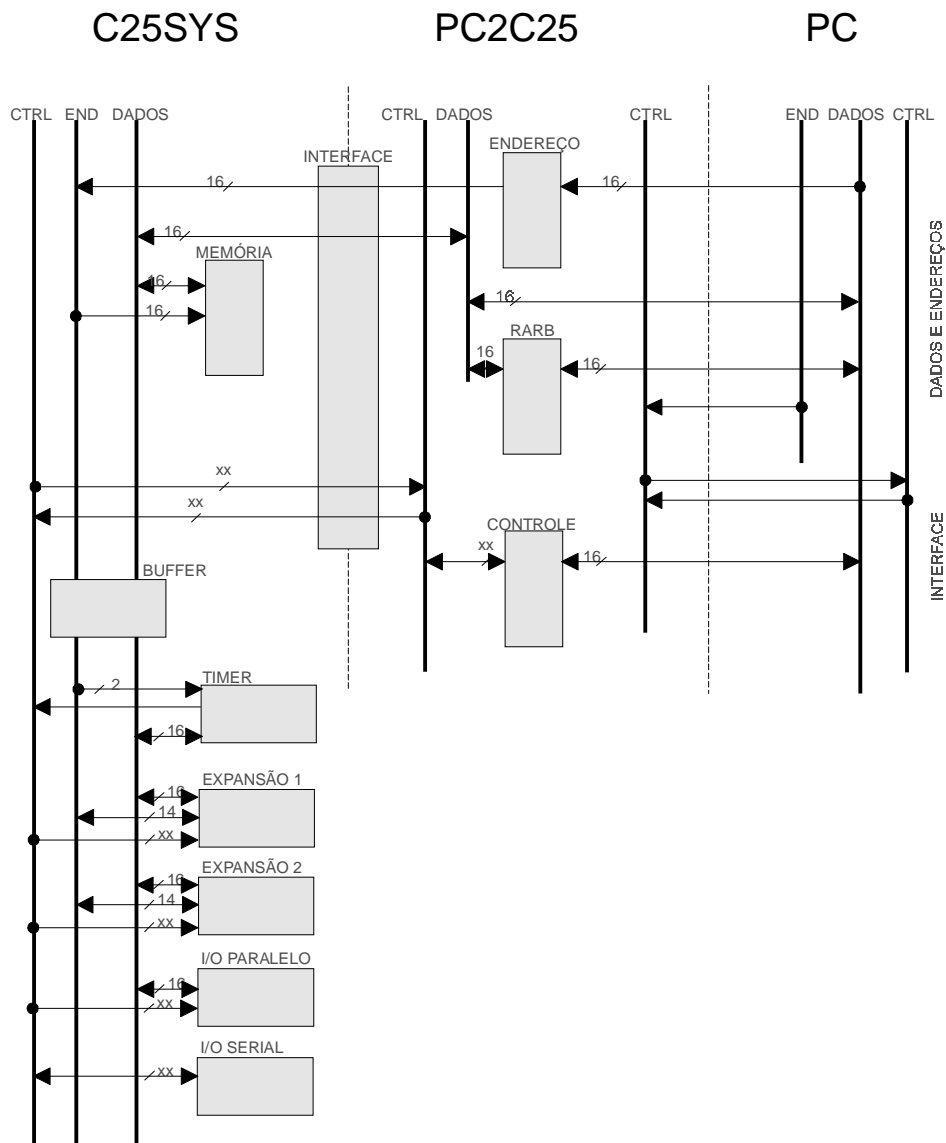


FIGURA 1.2 - Diagrama em blocos do sistema PSi25, mostrando a ligação ao micro hospedeiro

Descrição Individual

Arquitetura da Placa de Interface

Na figura 2 está representado o diagrama em blocos da placa de interface, juntamente com sua interligação com a placa microprocessada e o barramento do micro hospedeiro. A mínima funcionalidade prevista é a seguinte:

- a placa microprocessada é capaz de interromper o computador hospedeiro;
- o computador hospedeiro é capaz de interromper e controlar o estado de "reset" da placa microprocessada;
- o computador hospedeiro pode descarregar código diretamente na memória da placa microprocessada;
- o computador hospedeiro pode acessar diretamente a memória da placa microprocessada, sem necessidade de interromper o processamento local (DMA);
- o computador hospedeiro é capaz de acessar o espaço de IO da placa microprocessada;

- o computador hospedeiro e a placa microprocessada podem trocar dados através do registrador bidirecional de 16 bits RARB;

Registadores de interface

O microcomputador hospedeiro pode transferir e receber dados da placa microprocessada por meio da interface de comunicação por registradores. Esta interface constitui-se de dois registradores de 16 bits, A e B, ligados aos barramentos de dados da placa C25SYS e do PC, conforme ilustra a figura 3. Ambos os registradores estão localizados no endereço base de IO, sendo o registrador B para leitura e o registrador A para escrita.

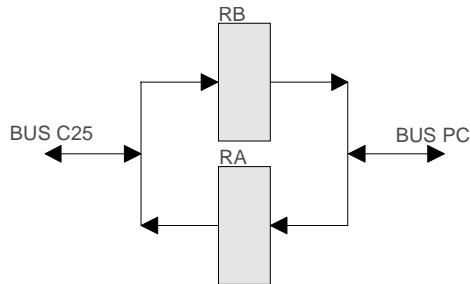


FIGURA 1.3 - Interface de comunicação por registradores

Registrador de Endereço

O registrador de endereços permite ao computador hospedeiro especificar o endereço a ser colocado no barramento de endereços da placa c25sys quando do momento de um acesso aos espaços de IO ou de memória. O registrador possui uma palavra de 16 bits, e é somente para escrita. O registrador de endereço está localizado no endereço base+2 de IO.

Registrador de Controle

No acesso ao registrador de controle as funções presentes na tabela 1 estão disponíveis. O registrador de controle está localizado no endereço base+1 de IO.

TABELA 1.1 - Palavra de controle e significado dos bits

BIT	ESCRITA	LEITURA
0	set/reset c25sys	0-c25sys ligada / 1 - desligada
1	habilita set / reset	---
4	interrompe c25sys	---
5	reconhece interrupção	---
8	rearma temporização de holda	0- proteção acionada / 1- proteção não acionada

Acesso direto aos espaços de memória e IO

O acesso ao barramento da placa c25sys pela placa de interface é feito através de um protocolo do tipo hold-holda: o computador hospedeiro solicita um acesso via o sinal de hold e a placa microprocessada permite o acesso sinalizando com holda. Com este mecanismo pode ser feito o acesso direto à memória da placa para a descarga de código e também para o compartilhamento de dados, mesmo com o microprocessador rodando (desde que não haja necessidade de acessar um dado externo). Através do

mesmo processo é também permitido o acesso ao espaço de IO da placa c25sys, com exceção do conector de interface serial (interno ao processador) e do registrador de interface RARB.

Procedimento para acesso à memória ou IO

Para a escrita em um endereço de memória ou IO, a seqüência a ser observada deve ser a seguinte: primeiro é escrito o endereço a ser acessado no registrador de endereço (base+4) e depois é feito o acesso ao espaço de memória ou de IO. Para o acesso ao espaço de memória deve ser usado o endereço base+8. Para o acesso ao espaço de IO deve ser usado o endereço base+6.

Função de timeout de holda

A proteção contra timeout de holda consiste na temporização da espera pelo sinal de holda. Se esta espera estiver acima de um limite máximo (dependente do sistema hospedeiro, em períodos de relógio), a proteção é acionada e qualquer acesso aos espaços de IO e memória de c25sys ficam bloqueados. É gerada uma interrupção para o PC tomar providências no sentido de invalidar a última leitura/escrita feita. Para saber a origem da interrupção deve ser feita a leitura da palavra de controle e o teste do bit correspondente à proteção no início da rotina de atendimento à interrupção. Note que a interrupção somente será desativada se for feita a reinicialização da proteção pela escrita na palavra de controle.

Interrupção e reconhecimento de interrupção

Ao ser feito o atendimento de uma interrupção gerada pela placa pc2c25 no microcomputador hospedeiro, é necessário fazer o reconhecimento da interrupção através da escrita na palavra de controle (bit5). Caso contrário, a interrupção continuará sendo solicitada.

Configuração

O endereço-base da placa de interface no espaço de IO do microcomputador hospedeiro é configurável através de uma dip-switch. Esta seleção estabelece o endereço base de IO, sendo os outros endereços colocados a partir deste endereço base mais um deslocamento. Um total de 5 endereços do espaço de IO são usados, conforme ilustra a tabela 2. Note-se que não há sombreamento nesta decodificação.

TABELA 1.2 - Endereços de registradores da placa de interface

base	registrador de IO (RARB)
base+2	palavra de controle
base+4	registrador endereço
base+6	espaço de memória do C25
base+8	espaço de IO do C25

A parte mais significativa do endereço de IO é formado pelo ajuste da dip-switch IO_ADD na placa. Ao ser ligada a dip, o bit correspondente ficará ajustado em nível lógico alto (1).

TABELA 1.3 - Formação do endereço-base de IO

AP9	AP8	AP7	AP6	AP5	AP4	AP3	AP2	AP1	AP0
DIP5	DIP4	DIP3	DIP2	DIP1	DIP0	---	---	---	---

O número da interrupção do PC a ser usado é configurável pelo jumper JP_IRQ, selecionando uma linha entre as interrupções 3, 4, 5, 7, 9, 10, 11, 12 ou 15, conforme ilustrado na figura 4.

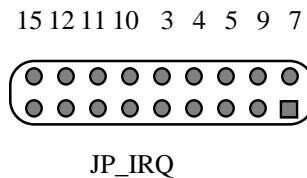


FIGURA 1.4 - Jumper de seleção de interrupção

Partida

No início do trabalho do sistema, pode ser possível que a proteção de timeout esteja acionada. A leitura da palavra de controle para observação do estado desta característica deve ser feita. Em caso de estar habilitada, deve ser feito o reset da mesma pela escrita da palavra de controle. Através da leitura da palavra de controle também pode ser verificado se a placa c25sys está conectada e com alimentação.

Conector de Interface

Permite a conexão com a placa microprocessada, sendo acessível pela abertura de um slot do microcomputador.

2 - Descrição das Operações do PSi25

2.1 - Acessos do Microcomputador Hospedeiro ao Sistema

Operação de Acesso ao Sistema PSi25

A placa de interface está mapeada dentro do espaço de IO do microcomputador hospedeiro, em um endereço configurável. Um acesso à placa tem os seguintes estados:

1-O barramento de endereços do PC assume um valor estável;

2-O sinal AEN fica em nível lógico baixo (0), indicando que não é acesso para DMA;

Neste instante, a lógica de decodificação de endereços da placa deve ser habilitada. Na placa pc2c25, esta lógica consiste num 74LS688 com AEN ligado à habilitação, e as linhas de endereço AP9 a AP4 do PC formando um vetor de entrada, que é comparado ao vetor formado pela chave DIP 5 a 0 (6 posições). Quando os vetores são iguais e está habilitado o CI, é decodificado o endereço da placa pelo sinal /IOE.

A parte menos significativa do endereço, formada por AP3 a AP1 (AP0 não é considerado devido ao acesso ser em 16 bits), define qual o destino do acesso que será feito, conforme a tabela a seguir.

TABELA 2.1 - Endereços de IO decodificados pela placa pc2c25

AP3	AP2	AP1	DESTINO
0	0	0	registrador de interface (RARB)
0	0	1	palavra de controle
0	1	0	registrador de endereço(RBM)
0	1	1	espaço de memória da placa C25sys
1	0	0	espaço de I/O da placa C25sys

A parte menos significativa do endereço é decodificada dentro da EPLD PC2C25, após ter sido feita a decodificação da placa, gerando os sinais internos **/io0**, **/io1**,..., **/io4**.

Note-se que, a não ser para a operação de leitura da palavra de controle, todas as operações dependem do sinal **/C25ON**, que é gerado pela conexão da placa C25sys, para sua efetivação.

Acesso de Leitura

Num acesso de leitura do PC, o próximo sinal a ser ativado é o sinal de **/IOR**. Este sinal está sincronizado com a borda de descida do sinal de **CLOCK** do barramento do PC (8.3 MHz). O atraso medido foi de 15ns. Note-se que os endereços estavam estáveis há cerca de 120ns. Essas medidas e as demais foram feitas em um computador PC AT 486 DX33 Intel, e servem apenas para indicar a ordem de grandeza dos tempos esperados no barramento ISA.

Após detectar a ativação do sinal de leitura, o dispositivo deve responder, o mais rápido possível, o sinal **/IO16** indicando ao microcomputador que a placa pode responder o acesso em 16 bits.

Conforme a velocidade com que a placa possa responder ao microcomputador, devem ser ativados os sinais de **/READY** ou **/OWS**. O PC insere alguns (3) ciclos de espera num acesso ao espaço de IO. Se o dispositivo puder responder imediatamente (dispositivo rápido), o sinal de **/OWS** deve ser acionado; caso oposto, o sinal de **/READY** deve ser acionado, indicando que o ciclo de acesso deve ser estendido por mais tempo.

Ao encerrar o ciclo de leitura, o PC desativa o sinal de **/IOR** e lê os dados presentes no barramento de dados neste instante. É de responsabilidade do dispositivo prover dados estáveis para o barramento neste período. Os sinais de **/IO16**, **/OWS**, **/READY** devem ser desativados em seguida. O barramento de dados também deve deixar de ser controlado pelo dispositivo. Neste ponto se encerra o ciclo de leitura.

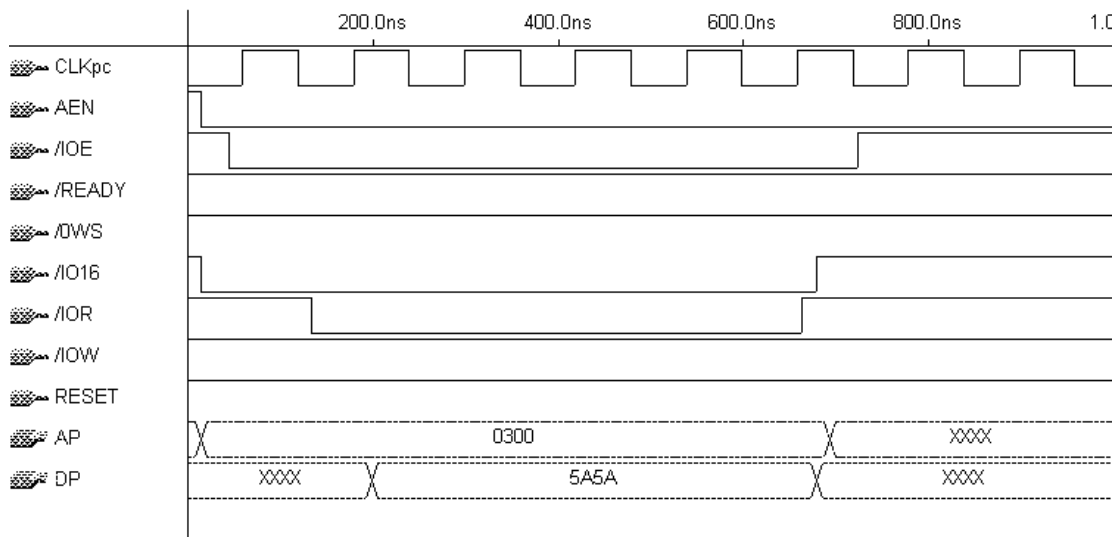


FIGURA 2.1 - Ciclo de leitura de IO típica do PC (arquivo pcread.vec)

Acesso de Escrita

Num acesso de escrita do PC, o próximo sinal a ser ativado é o sinal de **/IOW**. Este sinal está sincronizado com a borda de descida do sinal de **CLOCK** do barramento do PC (8.3 MHz). O atraso medido foi de 15ns. Note-se que os endereços estavam estáveis há cerca de 120ns.

Após detectar a ativação do sinal de escrita, o dispositivo deve responder, o mais rápido possível, o sinal **/IO16** indicando ao microcomputador que a placa pode responder o acesso em 16 bits.

Conforme a velocidade com que a placa possa responder ao microcomputador, devem ser ativados os sinais de **/READY** ou **/OWS**. O PC insere alguns (3) ciclos de espera num acesso ao espaço de IO. Se o dispositivo puder responder imediatamente (dispositivo rápido), o sinal de **/OWS** deve ser acionado; caso oposto, o sinal de **/READY** deve ser acionado, indicando que o ciclo de acesso deve ser estendido por mais tempo.

O barramento de dados do PC não está estável na borda de descida do sinal **/IOW**. Só há garantia de estabilidade na borda de subida [ref. Interfacing...]. No entanto, foi medido o tempo de 30ns de atraso após a borda de descida de **/IOW** para que os dados estejam estáveis.

Ao encerrar o ciclo de escrita, o PC desativa o sinal de **/IOW**. É de responsabilidade do dispositivo usar os dados disponíveis no barramento neste período. Os sinais de **/IO16**, **/OWS**, **/READY** devem ser desativados em seguida. Neste ponto se encerra o ciclo de escrita.

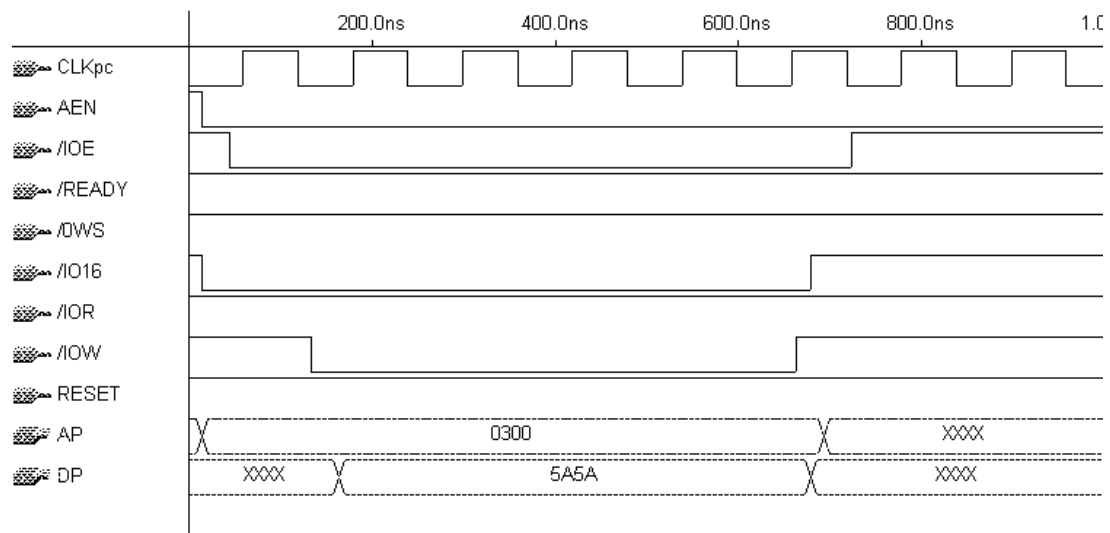


FIGURA 2.2 - Ciclo de escrita típico do PC (arquivo pcwrite.vec)