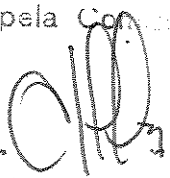


UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Faculdade de Engenharia Elétrica

Departamento de Engenharia da Computação e Automação
Industrial

Este exemplar encontra-se em redação final da tese
defendida por Eurípedes Guilherme de Oli-
veira Nóbrega, aprovada pela Comissão
Julgadora em 16 06 / 92.
Orientador 

**Ferramentas Computacionais para a Implementação de Sistemas
de Monitoramento e Diagnóstico de Máquinas Rotativas**

Autor: Eurípedes Guilherme de Oliveira Nóbrega

Orientador: Clésio Luis Tozzi

Tese apresentada à Faculdade de
Engenharia Elétrica - FEE - UNICAMP- como
parte dos requisitos exigidos à obtenção
do título de Doutor em Engenharia.

Abril de 1992

RESUMO

O monitoramento das vibrações mecânicas de máquinas rotativas é uma atividade desempenhada em apoio aos métodos de manutenção há já bastante tempo, de forma manual. O monitoramento contínuo analógico de máquinas de grande porte foi internacionalmente normalizado há duas décadas atrás. Porém o monitoramento contínuo digital, que apenas recentemente se tornou técnica e economicamente uma solução viável, exige ferramentas computacionais que possibilitem o uso pleno dos sistemas de Instrumentação computadorizados. Nesse contexto, técnicas de processamento simbólico para a implementação de sistemas de diagnóstico devem ser incorporadas ao monitoramento. Para o desenvolvimento dessas ferramentas foi necessário a estruturação do conhecimento, utilizado pelos especialistas da área para a realização de diagnósticos baseado na análise espectral das vibrações, bem como a especificação de uma metodologia passível de ser automatizada. Para extrair as informações significativas a partir dos espectros, um método gramatical de reconhecimento de padrões foi desenvolvido. Para representar o conhecimento e possibilitar mecanismos de inferência, uma rede semântica e uma rede de inferência foram projetadas, e desenvolvidos os módulos básicos que permitem o uso dessas redes na implementação de sistemas de monitoramento e diagnóstico. Um sistema protótipo foi montado, simulando-se a ocorrência de problemas mecânicos, fazendo uso do conhecimento estruturado e das ferramentas desenvolvidas. Os resultados obtidos com esse protótipo permitem afirmar que a estruturação do conhecimento é adequada, a metodologia para o diagnóstico apresenta facilidade de evolução e manutenção, o método de reconhecimento de padrões permite a extração de aspectos significativos e úteis diretamente dos espectros, a rede semântica desenvolvida propicia uma representação do conhecimento estático capaz de modelar conceitos e relações concretos e abstratos e a rede de inferência mostrou-se eficiente na capacidade de representação das regras, sintomas e diagnósticos, bem como na interligação com rotinas procedurais para atuação em tempo real ou de processamento dos sinais. O principal ponto a exigir novos desenvolvimentos consiste na necessidade de uma gramática para traduzir regras enunciadas em termos compatíveis com a linguagem dos especialistas em células e conexões da rede de inferência.

DEDICATÓRIA

À minha esposa
e aos meus filhos,
pelos inúmeros momentos
que lhes foram negados,
e que deveriam ter sido
de convívio e lazer.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador,
pela paciência
com que suportou
as minhas idas e voltas.

Aos meus colegas do
Departamento de Mecânica Computacional
por aceitarem minhas discussões sobre o conhecimento
na área de Engenharia Mecânica,
e ouvirem minhas idéias
sobre sistemas de diagnóstico.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 MONITORAMENTO CONTÍNUO	1.2
1.2 FUNÇÕES BÁSICAS DO SISTEMA	1.4
1.3 ARQUITETURA DO SISTEMA	1.6
1.4 ATIVIDADES DESENVOLVIDAS	1.12

CAPÍTULO 2

ANÁLISE DE VIBRAÇÕES E DIAGNÓSTICO DE MÁQUINAS ROTATIVAS

2.1 ESTADO ATUAL DA ANÁLISE DE VIBRAÇÕES	2.2
2.2 VISÃO INICIAL DAS VIBRAÇÕES MECÂNICAS	2.3
2.3 CAUSAS COMUNS DE VIBRAÇÕES MECÂNICAS	2.4
2.3.1 Desbalanceamentos	2.5
2.3.2 Desalinhamentos	2.7
2.3.3 Folgas Mecânicas	2.7
2.3.4 Instabilidades	2.9
2.3.5 Mancais Defeituosos	2.10
2.3.6 Defeitos na Transmissão	2.12
2.3.7 Problemas com Máquinas Elétricas	2.14
2.4 ABSTRAÇÃO DA METODOLOGIA	2.17
2.4.1 O Conceito de Episódio	2.17
2.4.2 Avaliação de Estado	2.18
2.4.3 Disparo de Gatilhos	2.19
2.4.4 Determinação de Diagnósticos	2.20
2.4.5 Sugestão de Providências	2.21
2.5 ANÁLISE DE CASOS ESPECÍFICOS	2.21
2.5.1 Alta Vibração em Ventilador	2.22
2.5.2 Vibração Causado por Correia	2.25
2.5.6 Motor Elétrico com Rotor Excêntrico	2.27
2.5.7 Falha no Rolamento em Máquina de Papel	2.28
2.6 PROCEDIMENTO GENERALIZADO	2.30

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA PARA A DETERMINAÇÃO DE DIAGNÓSTICOS

3.1	ESTRUTURA PARA O DIAGNÓSTICO	3.2
3.2	MATRIZ DE SINTOMAS E DIAGNÓSTICOS	3.3
3.2.1	Diagnósticos Básicos e Detalhados	3.3
3.2.2	Sintomas	3.5
3.2.2.1	Constituição Física dos Sistemas Mecânicos	3.5
3.2.2.2	Faixa de Frequência do Espectro	3.6
3.2.2.3	Plano Dominante dos Problemas	3.7
3.2.2.4	Frequências dos Picos	3.8
3.2.2.5	A Análise da Fase Relativa	3.11
3.2.2.6	A Estabilidade dos Sinais	3.11
3.2.2.7	Existência de Lobos Laterais	3.11
3.2.2.8	O Formato dos Picos	3.12
3.3	PROCEDIMENTO PARA A DETERMINAÇÃO DE DIAGNÓSTICOS	3.14
3.3.1	Sequência de Análise dos Sintomas	3.14
3.3.2	Seleção dos Diagnósticos Básicos	3.15
3.3.3	Seleção dos Diagnósticos Iniciais	3.17
3.3.4	Expansão em Diagnósticos Detalhados	3.17
3.3.5	Seleção dos Diagnósticos Detalhados	3.18
3.3.6	Seleção dos Diagnósticos Detalhados Possíveis	3.19
3.3.7	Análise de Diagnósticos Prováveis Inadequados	3.20
3.3.8	Novas Análises e Medições	3.22
3.3.9	Análises Complementares	3.23

CAPÍTULO 4

RECONHECIMENTO GRAMATICAL DOS ESPECTROS

4.1	PROCEDIMENTO BÁSICO PARA A ANÁLISE DOS ESPECTROS	4.2
4.2	ANÁLISE PARA A IDENTIFICAÇÃO DE SINTOMAS	4.3
4.3	RECONHECIMENTO DE PADRÕES GRAMATICAL	4.4
4.4	GRAMÁTICA PARA O RECONHECIMENTO DOS PICOS	4.6
4.4.1	Definição dos Tipos de Picos	4.7
4.4.2	Definição dos Aglomerados	4.8
4.4.3	Segmentação do Espectro	4.9
4.4.4	Geração da Sentença Inicial	4.10
4.4.5	Gramática para o Reconhecimento de Picos ..	4.12
4.5	GRAMÁTICA DE ÁRVORES DESENVOLVIDA	4.13
4.6	AUTÔMATO PARA O RECONHECIMENTO DOS PICOS	4.21
4.6.1	Classificação dos Vértices	4.21
4.6.2	Autômato para Aceitação dos Picos	4.22

CAPÍTULO 5

REDE SEMÂNTICA DOS SISTEMAS MECÂNICOS

5.1	SISTEMAS BASEADOS EM CONHECIMENTO	5.2
5.1.1	Métodos para a Representação do Conhecimento	5.3
5.1.2	Fatos e Regras de Produção	5.3
5.1.3	Redes Semânticas	5.5
5.1.4	Esquemas	5.6
5.2	ESTABELECIMENTO DO MODELO LÓGICO	5.7
5.2.1	Definição dos Sistemas Mecânicos	5.7
5.2.2	Estruturação das Classes Estáticas	5.9
5.3	ELEMENTOS DA REDE SEMÂNTICA	5.15
5.3.1	A Classe Classe	5.16
5.3.2	A Classe Instância	5.19
5.3.3	A Classe Propriedade	5.20
5.3.4	A Classe Exemplar	5.20
5.3.5	A Classe Relação	5.21
5.3.6	A Classe Ocorrência	5.22
5.4	EXEMPLO DA REDE SEMÂNTICA	5.24

CAPÍTULO 6

REDE DE INFERÊNCIA PARA O DIAGNÓSTICO

6.1	MODELAMENTO DAS CLASSES DINÂMICAS	6.2
6.2	ELEMENTOS DA REDE DE INFERÊNCIA	6.6
6.2.1	Sintomas, Diagnósticos e Regras	6.6
6.2.2	Classes Básicas da Rede de Inferência	6.7
6.2.2.1	A Classe Neuron	6.8
6.2.2.2	A Classe Sinapse	6.11
6.2.2.3	A Classe Transdutor	6.12
6.2.2.4	A Classe Bloco	6.14
6.2.3	A Representação de uma Regra	6.14
6.2.4	Representação dos Sintomas	6.18
6.2.5	Representação de Diagnósticos	6.19
6.3	PROCEDIMENTO ESTRATÉGICO GLOBAL.....	6.20

CAPÍTULO 7

RESULTADOS E CONCLUSÕES

7.1	PROTÓTIPO DESENVOLVIDO	7.2
7.1.1	Módulos de Monitoramento	7.2
7.1.2	Implementação da Rede Semântica	7.7
7.1.3	Implementação da Rede de Inferência	7.8
7.1.4	Procedimento Global do Protótipo	7.9
7.2	AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA E DO CONHECIMENTO	7.11
7.3	AVALIAÇÃO DAS FERRAMENTAS DE REPRESENTAÇÃO E INFERÊNCIA	7.13
7.4	CONCLUSÕES E ÁREAS PARA DESENVOLVIMENTO FUTURO ..	7.15

LISTA DAS FIGURAS

CAPITULO 1

- Fig. 1.1) Rede local para o monitoramento contínuo de máquinas rotativas com processamento centralizado ..1.7
- Fig. 1.2) Procedimento para avaliar a possibilidade da máquina monitorada continuar operando1.8
- Fig. 1.3) Procedimento para programação de novas medições em virtude de discrepâncias nos espectros1.9
- Fig. 1.4) Procedimento para a previsão de datas críticas 1.9
- Fig. 1.5) Procedimento para determinação de diagnósticos ...
.....1.10
- Fig. 1.6) Arquitetura básica do sistema1.11

CAPÍTULO 2

Fig. 2.1)	Senoide representando a vibração de um sistema massa-mola e seu espectro com uma única raia ..	2.3
Fig. 2.2)	Espectro representativo de desbalanceamento ...	2.6
Fig. 2.3)	Espectros indicativos de desalinhamento, antes (a) e após (b) a correção do problema	2.8
Fig. 2.4)	Espectro ilustrativo de folga mecânica, apresentando harmônicos da rotação e picos intermediários	2.9
Fig. 2.5)	Espectros indicando problema em rolamento, antes e após a revisão, reproduzido de [Nepomuceno, 89] ..	2.11
Fig. 2.6)	Exemplo de desbalanceamento simulado pelo autor em engrenagem em bancada de testes	2.13
Fig. 2.7)	Diagrama de estados para análise do ventilador ...	2.23
Fig. 2.8)	Diagrama de estados para análise da correia ..	2.26
Fig. 2.9)	Diagrama de estados para análise do motor elétrico	2.27
Fig. 2.10)	Diagrama de estados para análise da máquina de papel	2.29
Fig. 2.11)	Diagrama de estados do procedimento generalizado .	2.30

CAPÍTULO 3

Fig. 3.1)	Seleção dos Diagnósticos Básicos	3.16
Fig. 3.2)	Seleção dos Diagnósticos Iniciais	3.17
Fig. 3.3)	Expansão dos Diagnósticos Detalhados	3.18
Fig. 3.4)	Seleção dos Diagnósticos Detalhados	3.19
Fig. 3.5)	Seleção de Diagnósticos Possíveis Detalhados	3.20
Fig. 3.6)	Esquema para análise dos Diagnósticos Inadequados	3.22
Fig. 3.7)	Seleção dos Diagnósticos Prováveis	3.23

CAPÍTULO 4

Fig. 4.1)	Esquema para a classificação dos segmentos ...	4.10
Fig. 4.2)	Exemplo de árvore relacional	4.14
Fig. 4.3)	Exemplo de árvore esqueleto	4.15
Fig. 4.4)	Exemplo de árvore completa	4.16
Fig. 4.5)	Exemplo da aplicação da gramática de árvores .	4.18
Fig. 4.6)	Possibilidades morfológicas dos aglomerados ..	4.20
Fig. 4.7)	Máquina para classificação dos vértices	4.21
Fig. 4.8)	Mapa de transição dos estados para o autômato Ap	4.23

CAPÍTULO 5

Fig. 5.1)	Esquema da classe SistemaMecânico	5.10
Fig. 5.2)	Esquema da classe Máquina	5.10
Fig. 5.3)	Esquemas das classes Propulsor e Propulsado ..	5.11
Fig. 5.4)	Hereditariedade das classes do sistema	5.11
Fig. 5.5)	Esquemas dos propulsores sub-classes de Máquina	5.12
Fig. 5.6)	Esquemas dos propulsados sub-classes de Máquina	5.12
Fig. 5.7)	Esquema da classe Acoplamento	5.13
Fig. 5.8)	Esquema da classe Mancal	5.13
Fig. 5.9)	Esquema da classe PontoMedição	5.14
Fig. 5.10)	Esquema da classe Sensor	5.14
Fig. 5.11)	Esquema da classe Método	5.15
Fig. 5.12)	Esquema da classe Classe	5.16
Fig. 5.13)	Relação de hereditariedade entre classes	5.17
Fig. 5.14)	Exemplo de uma classe do sistema	5.18
Fig. 5.15)	Esquema da classe Instância	5.18
Fig. 5.16)	Relação entre classe, sub-classe e instâncias	5.19
Fig. 5.17)	Esquema da classe Propriedade	5.20
Fig. 5.18)	Esquema da classe Exemplar	5.21
Fig. 5.19)	Estrutura entre as classes Propriedade e Exemplar	5.21
Fig. 5.20)	Esquema da classe Relação	5.22
Fig. 5.21)	Esquema da classe Ocorrência	5.23

Fig. 5.22) Estrutura entre as classes Relação e Ocorrência ..	5.23
Fig. 5.23) Grafo das Relações em Turbo-Gerador com redução ..	5.24
Fig. 5.24) Representação parcial da rede semântica anterior .	5.25

CAPÍTULO 6

Fig. 6.1)	Esquema das classes Avaliação	6.2
Fig. 6.2)	Esquema das classes Analise e AvalDiagnóstico ..	6.3
Fig. 6.3)	Esquema das classe Sintoma e Diagnóstico	6.4
Fig. 6.4)	Esquema da classe Providência	6.5
Fig. 6.5)	Esquema da classe Interpretação	6.5
Fig. 6.6)	Esquema da classe Episódio	6.6
Fig. 6.7)	Desenhos simbólicos dos diversos tipos de neurons	6.10
Fig. 6.8)	Desenho simbólico parcial da rede de inferência	6.13
Fig. 6.9)	Primeira regra de Desbalancamento	6.15
Fig. 6.10)	Representação de uma regra de três cláusulas ..	6.16
Fig. 6.11)	Representação da concatenação de duas regras ..	6.17
Fig. 6.12)	Grafo das relações entre as classes dinâmicas	6.21

CAPÍTULO 7

Fig. 7.1)	Criação da referência e rotulação dos picos ...	7.3
Fig. 7.2)	Tela expondo as vibrações no domínio do tempo ..	7.4
Fig. 7.3)	Sinal, espectro, árvore e picos reconhecidos ..	7.5
Fig. 7.4)	Comparação entre árvores com evolução em amplitude	7.6
Fig. 7.5)	Árvores mostrando evolução de formato e amplitude	7.7

LISTA DAS TABELAS

CAPÍTULO 3

Tabela 3.1)	Diagnósticos Básicos	3.4
Tabela 3.2)	Diagnósticos Detalhados	3.4
Tabela 3.3)	Classificação das faixas de frequência	3.7
Tabela 3.4)	Diagnósticos e faixas de frequência	3.7
Tabela 3.5)	Direção possíveis para os sensores	3.7
Tabela 3.6)	Diagnósticos e seus planos dominantes	3.8
Tabela 3.7)	Classificação dos picos quanto à frequência	3.9
Tabela 3.8)	Diagnósticos e frequências associadas	3.10
Tabela 3.9)	Relação entre diagnósticos e fases dos picos	3.10
Tabela 3.10)	Classificação quanto à estabilidade	3.11
Tabela 3.11)	Relação entre picos e formatos	3.13
Tabela 3.12)	Classificação dos picos quanto ao formato ..	3.14

CAPÍTULO 4

Tabela 4.1) Classificação dos vértices	4.11
---	-------------

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

- 1.1 Monitoramento Contínuo**
- 1.2 Funções Básicas do Sistema**
- 1.3 Arquitetura do Sistema**
- 1.4 Atividades Desenvolvidas**

No capítulo introdutório será inicialmente apresentada uma visão breve da pertinência de sistemas de monitoramento contínuo e diagnóstico automático, baseado na análise das vibrações de máquinas rotativas, e dos objetivos básicos do trabalho realizado visando o desenvolvimento de ferramentas computacionais para a implementação desses sistemas. Serão apresentadas as funções básicas necessárias a esse tipo de sistema, através da análise dos procedimentos tradicionais. A seguir será apresentada a arquitetura global genérica para a qual as ferramentas foram imaginadas e finalmente uma visão rápida das atividades desenvolvidas e do conteúdo dos demais capítulos dessa dissertação.

1.1 MONITORAMENTO CONTÍNUO

As grandes transformações ocorridas na área tecnológica nos últimos anos acarretaram uma grande disseminação dos microcomputadores no ambiente de produção. Atualmente todas as atividades, desde o projeto até os testes, passando pela produção e manutenção, se beneficiam do uso direto dos microcomputadores.

Entre as áreas mais beneficiadas por essa evolução está a Instrumentação. Diversos tipos de sistemas digitais tiveram seu uso largamente difundido, podendo-se citar sistemas de aquisição de dados, de controle digital distribuído e supervisórios. Tais sistemas no entanto, ainda são frutos de especificações e metodologias estabelecidas quando a instrumentação era essencialmente analógica. Desse modo, as inovações ainda são incipientes, sofrendo uma incorporação gradativa aos métodos tradicionais, limitando-se a reproduzir conceitos já bem estabelecidos. Deverá ocorrer porém, à medida que o retorno econômico garantido pelos novos sistemas for se tornando explícito, um imenso avanço nas solicitações por desenvolvimentos tecnológicos que assegurem o pleno uso do potencial advindo da introdução de computadores nos diversos sistemas relacionados com a produção industrial.

O trabalho aqui relatado tem sua aplicação principal na área da automação da manutenção, permitindo a implantação de programas da assim chamada Manutenção Preditiva, com base na análise das vibrações mecânicas de máquinas rotativas. O que se procura é a integração de diversas técnicas de aquisição e manipulação da informação com o objetivo de compor um equipamento que, apesar de baseado em um instrumento tradicional, o analisador espectral, venha a incorporar funções e métodos que ampliem consideravelmente o seu alcance.

A argumentação para o monitoramento das vibrações de máquinas rotativas como forma de avaliar o seu estado possui fundamentos já conhecidos há bastante tempo [Downham, 71]. No entanto, a tecnologia necessária para implementar sistemas de monitoramento contínuo digital exige a concatenação de atividades em diversas áreas da Engenharia, e os seus métodos ainda se encontram muito longe de se considerar bem estabelecidos, particularmente na área de determinação de diagnósticos [Voegtli, 87].

A Manutenção Preditiva tem por objetivo básico a eliminação de paradas dos equipamentos, seja por falha inesperada ou porque foi atingido o número de horas de funcionamento previsto como o valor médio para a ocorrência de falhas. Esse procedimento, usual nos métodos de Manutenção Preventiva, de executar paradas programadas baseadas em informações estatísticas, possui em si uma contradição: se nunca ocorrem falhas não previstas, aparentemente com sucesso do programa de manutenção, na verdade é porque o período médio entre falhas foi mal

estimado e é de fato muito maior; caso contrário, ocorrerão paradas não programadas de vez em quando, criando a suspeita de que o programa não está bem equacionado [Smith, 87]. Além do mais, ao se interromper o funcionamento de uma máquina de grande porte e substituir seus componentes, incorre-se em diversos riscos inerentes. O procedimento para se trocar um simples rolamento pode ser extremamente complexo, demorado e caro. Em consequência, pode ocorrer que, sistemas que se encontravam em bom estado e cujos componentes foram substituídos, possam apresentar problemas no retorno à operação [Reason, 80].

Por tudo isso, a idéia de avaliar o estado das máquinas como forma de determinar a necessidade de uma parada para uma manutenção corretiva, ganhou corpo, e foram desenvolvidos, ainda na década de 1970, diversos métodos de análise de sinais para tanto [Angelo, 87]. Entre esses, a análise espectral de vibrações mecânicas é o método que possui a maior abrangência. De uma forma geral, correlações podem ser estabelecidas entre os picos encontrados nos espectros das vibrações mecânicas e a grande maioria dos defeitos possíveis. Para tanto, o uso de um analisador espectral tradicional tem se constituído na forma mais comum de se adquirirem as informações, as quais são analisadas e interpretadas por um engenheiro mecânico especialista na área de vibrações.

Devido ao baixo custo dos microcomputadores e sua crescente capacidade de processamento é possível atualmente conceber um sistema baseado no analisador espectral que fique alocado de forma permanente a um ou mais sistemas mecânicos rotativos, realizando o monitoramento de suas vibrações. A partir da disponibilidade das informações espectrais, sua análise implica na necessidade de automação dos procedimentos, devido ao grande volume de dados, e à velocidade com que devem ser processados para fazer frente a situações de emergência.

Esse sistema deverá monitorar continuamente a vibração em diversos pontos de uma ou mais máquinas, detectar o momento em que a vibração passa a indicar anormalidade, realizar análises espectrais dos sinais, identificar de forma automática a evolução ocorrida nos espectros, interpretar essas informações e apresentar os diagnósticos compatíveis com os sintomas observados. Adicionalmente, pode encaminhar sugestões de providências a serem tomadas pelos membros da equipe de manutenção com a qual interage.

Para tanto, existe a necessidade do estabelecimento de uma metodologia clara para a sequência e qualificação das medições a serem realizadas, o que exige a estruturação do conhecimento usado pelos especialistas. Em seguida, é essencial um método de reconhecimento de padrões para a extração do maior número possível de informações diretamente dos espectros, prescindindo assim da intervenção de um operador para alimentar o procedimento de diagnóstico. E

finalmente há necessidade do desenvolvimento de ferramentas computacionais para a representação e processamento do conhecimento, adequadas às características da área.

Assim, esses três temas constituem o escopo central do trabalho realizado. São eles, em resumo:

- estruturação do conhecimento e da metodologia para a análise de vibrações;
- desenvolvimento de um método de reconhecimento de padrões para a interpretação dos espectros;
- desenvolvimento de ferramentas de representação e processamento do conhecimento adequadas para o diagnóstico;

Para se estabelecer o projeto da arquitetura de um sistema de monitoramento e diagnóstico de máquinas rotativas, será apresentada na próxima seção uma análise das funções que ele deve desempenhar, tendo como base as diversas atividades normalmente realizadas pelos especialistas da área na atuação tradicional.

1.2 FUNÇÕES BÁSICAS DO SISTEMA

As funções básicas que um sistema de monitoramento contínuo deverá desempenhar podem ser assim agrupadas, para uma visão inicial:

- assegurar que o sistema mecânico monitorado possa continuar operando, por se encontrar em condições aceitáveis do ponto-de-vista das vibrações;
- detectar precocemente a ocorrência de problemas mecânicos que possam surgir na máquina monitorada, e acompanhar sua evolução ao longo do tempo;
- realizar previsões sobre os problemas detectados, relativas ao momento em que entrarão em fase crítica, através da análise de tendências;
- diagnosticar os problemas detectados, através de métodos de inferência sobre um banco de conhecimento, baseado na interpretação de sinais de vibrações;
- sugerir providências para a correção dos problemas diagnosticados, quando tal for possível.

Essas tarefas serão realizadas com base na interpretação de informações retiradas da análise dos espectros. O procedimento tradicional consiste na realização de medições com o uso de um analisador espectral, o qual possui em geral

um ou dois canais. É comum também o uso de gravadores ou coletores de sinais, os quais são posteriormente conectados a um computador para a análise. Os sinais são processados para gerar vetores no domínio do tempo, e, através do uso do algoritmo da Transformada de Fourier Rápida [Oppenheim, 75] [Antonίου, 79] [Papoulis, 77], são calculados os espectros respectivos, ou seja, os vetores no domínio da frequência. Esses espectros serão então analisados por especialistas na área de vibrações, buscando a ocorrência de picos que tragam significado para uma linha de raciocínio.

Esses picos normalmente já existem em um espectro da máquina em bom estado, com a avaliação sendo realizada quanto a uma possível mudança de amplitude ou formato. Em alguns casos, picos completamente novos podem surgir no espectro. A constatação de variações nos picos dos espectros é o resultado normal de uma análise, a partir do que se buscará os diagnósticos possíveis.

Sobre as observações da variação da vibração, ou a não existência dela, as funções de um sistema de monitoramento e diagnóstico serão portanto realizadas. Caso o nível global da vibração ou de picos acusando mudança não tenham ultrapassado valores críticos pré-estipulados, conclui-se que o sistema monitorado encontra-se em bom estado. Portanto pode ser mantido em operação, o que consiste na primeira função do sistema de monitoramento, assegurar o seu bom estado.

A partir da constatação de que houve uma variação significativa, no nível global ou em picos dos espectros, serão acionados alarmes relativos à gravidade do problema. A evolução desses picos será acompanhada através de novas medições a serem realizadas periodicamente. Essa é assim a segunda função especificada, detecção precoce dos defeitos.

Tendo sido realizadas diversas medições ao longo da evolução do problema, curvas de regressão podem ser calculadas para estimar o momento em que níveis mais críticos serão atingidos. Essa tarefa consiste na terceira função especificada, previsão de datas críticas.

A partir de observações retiradas dos espectros, bem como informações complementares relacionadas com as máquinas monitoradas, um diagnóstico do problema deverá ser emitido, constituindo a quarta função do sistema. A partir desse diagnóstico as providências que visam a corrigir o problema deverão ser programadas. É a quinta função especificada para o sistema.

Seguindo um programa de monitoramento tradicional, essas atividades seriam executadas sob o controle de uma planilha de manutenção com medições realizadas semanalmente ou mensalmente por uma equipe, e com as análises, interpretações e conclusões conduzidas por um especialista.

A automação dessas atividades para sistemas mecânicos de grande porte, que justifiquem o monitoramento permanente, é a motivação básica do trabalho aqui descrito. Evidentemente, nem todas as atividades poderão ser completamente automatizadas e a necessidade do especialista jamais poderá ser eliminada. Assim, um sistema com as funções descritas deverá ser encarado na verdade como um equipamento de apoio para assegurar um desempenho pleno das máquinas monitoradas, capaz de ampliar consideravelmente a capacidade de trabalho de um especialista e sua equipe, e nunca de substituí-los.

Tendo sido vistas as funções que devem ser desempenhadas por um sistema de monitoramento e diagnóstico, a próxima seção procura estabelecer uma arquitetura que possibilite a execução dessas funções.

1.3 ARQUITETURA DO SISTEMA

Para assegurar a continuidade da operação de uma máquina faz-se necessário a medição periódica de sua vibração, e a análise desses dados para a avaliação do seu estado. Diversos pontos de medição são necessários, bem como um conjunto de sensores, condicionadores de sinal, filtros e amplificadores, instalados de forma permanente [Angelo, 87] [Nóbrega, 90, b]. Um sistema de aquisição de dados deve controlar essa instrumentação e realizar adequadamente a amostragem dos sinais. O sistema poderia ser um instrumento completo incluindo aquisição de dados e análise, ou incluir um sistema de computação central em comunicação com o primeiro. Dois módulos de programação são necessários: o que controla a aquisição de dados e o que deverá analisar os sinais. A figura 1.1 apresenta um esquema básico para o monitoramento de duas máquinas, com os sistemas de aquisição de dados ligados em rede local a um sistema central. É uma solução que permite que outras máquinas possam ser acrescentados à rede de monitoramento, compartilhando recursos.

Os espectros dos sinais deverão ser analisados para avaliar a presença de alguma falha potencial. Para tanto, o procedimento adotado é a seleção preliminar de espectros de referência que reflitam o bom estado da máquina. Os espectros de referência serão comparados com os espectros obtidos nas medições. Caso não existam diferenças significativas a máquina se encontra em bom estado. Caso haja diferenças, a avaliação dos seus níveis de amplitude indicará se a máquina monitorada poderá continuar operando. Para tanto são exigidos os seguintes módulos:

- aquisição de dados;
- processamento de sinais;
- comparação dos espectros.

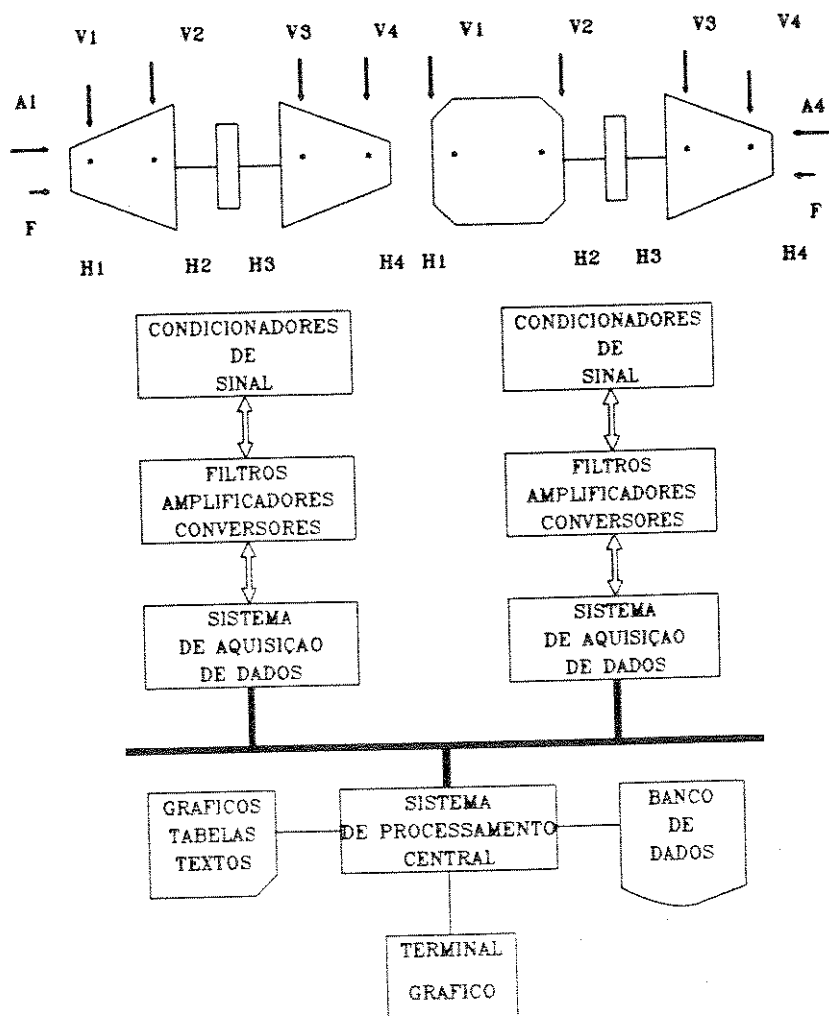


Fig. 1.1) Rede local para o monitoramento contínuo de máquinas rotativas com processamento centralizado.

É conveniente ressaltar que a comparação entre espectros não pode ser apenas numérica, uma vez que dois espectros diferentes do mesmo ponto dificilmente serão idênticos, mesmo sendo medidos em sequência. Existe uma variação natural entre os espectros que necessita ser compensada. Ainda, a comparação envolve também aspectos qualitativos, relativos ao formato dos picos envolvidos. Desse modo, um método estrutural de reconhecimento de padrões torna-se a solução mais adequada [Nóbrega, 90, c].

A figura 1.2 apresenta um esquema para a aquisição dos dados de vibrações, cálculo dos espectros e as comparações com os espectros respectivos de referência.

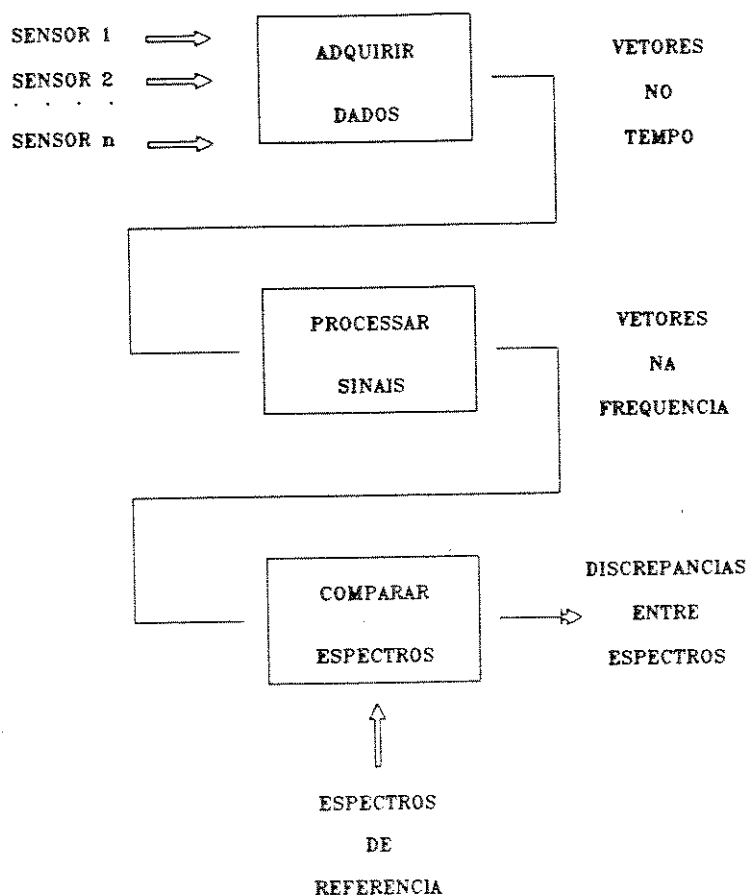


Fig. 1.2) Procedimento para avaliar a possibilidade da máquina monitorada continuar operando.

Para implementar a detecção precoce da possibilidade de ocorrência de falhas, adota-se um critério de evolução da vibração para estipular o que são diferenças significativas na comparação entre espectros. Para isso, será realizada uma avaliação das discrepâncias, quando detectadas, atribuindo-se um valor para o estado do sistema, sendo acompanhada a evolução do problema através da realização de novas medições.

Para a programação de novas medições, eventualmente alterando a sistemática inicialmente implantada, torna-se necessário um módulo que controle as diversas atividades do sistema ao longo do tempo. Uma vez que a tarefa de concatenar as atividades é complexa, deve-se incluir na arquitetura do sistema um módulo com as funções de uma agenda, onde todas as atividades deverão estar programadas. A figura 1.3 apresenta o procedimento para o acompanhamento do problema ao longo do tempo.

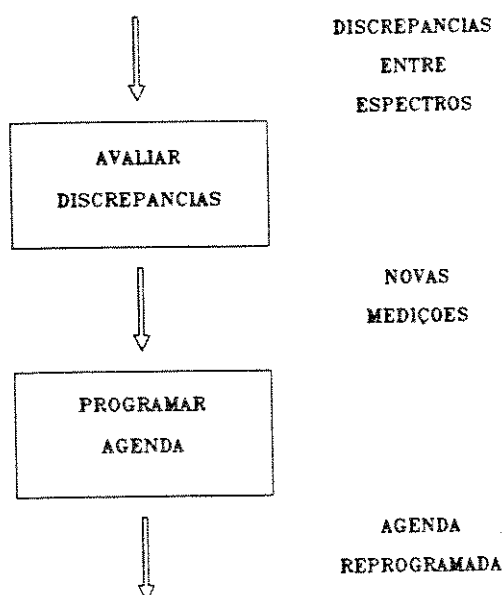


Fig. 1.3) Procedimento para programação de novas medições em virtude da detecção de discrepâncias nos espectros.

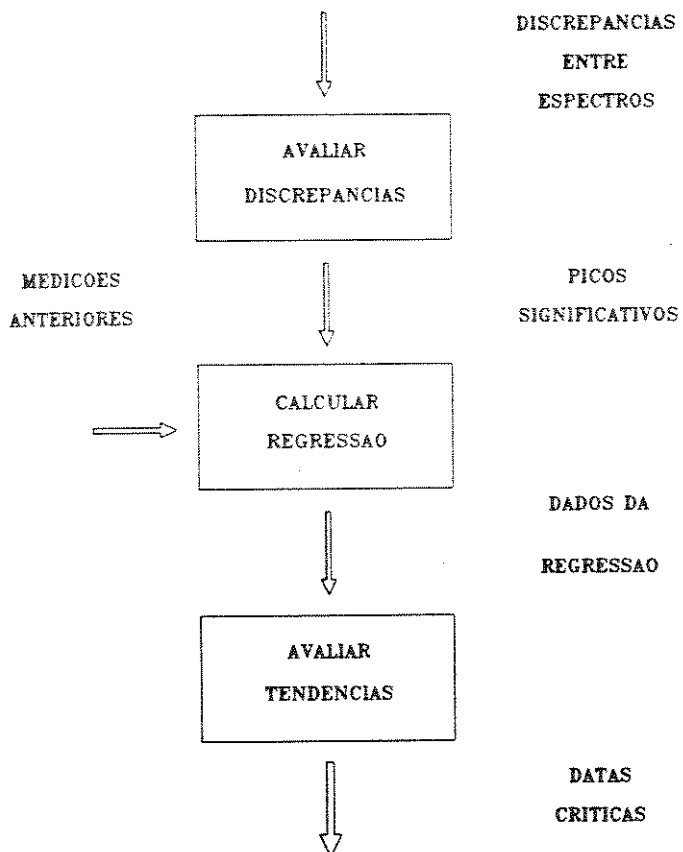


Fig. 1.4) Procedimento para a previsão de datas críticas.

A previsão de datas críticas resulta das medições realizadas para o acompanhamento da evolução de possíveis falhas detectadas e da lista de discrepâncias resultantes da comparação de espectros. Curvas de regressão para a análise de tendências serão calculadas para os picos que tenham acusado diferenças. Pela extrapolação dessas curvas, e tendo sido estipulados níveis críticos para as diversas amplitudes, o momento em que esses níveis serão atingidos podem ser estimados. A cada nova medição realizada essas estimativas serão refeitas. Assim um módulo de análise de tendências deve ser incluído na arquitetura do sistema. A figura 1.4 apresenta o procedimento respectivo.

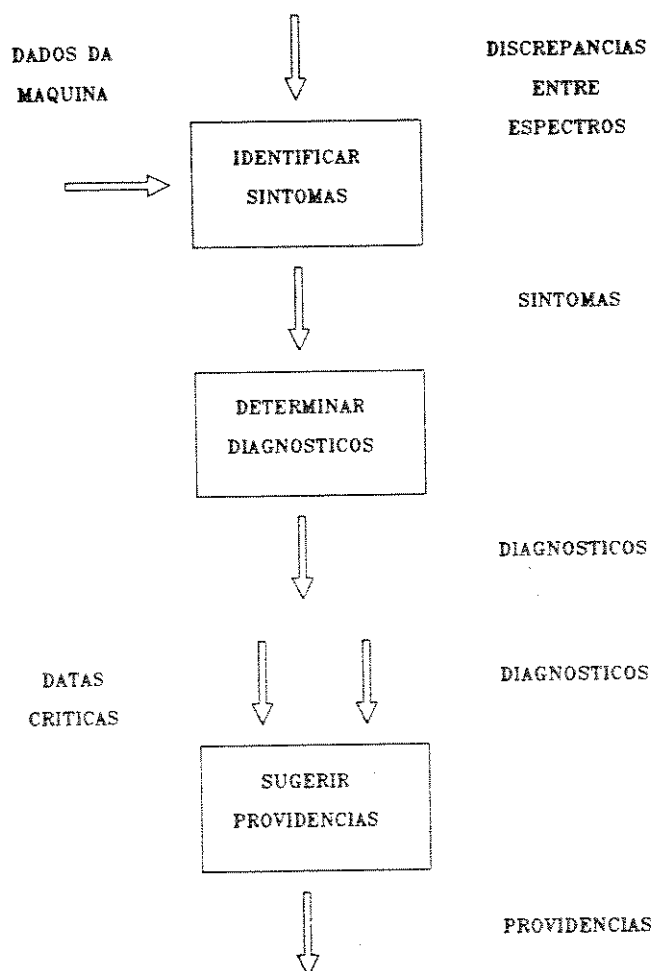


Fig. 1.5) Procedimento para determinação de diagnósticos.

Para implementar o diagnóstico das causas das vibrações anormais há necessidade de dois módulos: 1) a identificação dos sintomas extraídos dos espectros; e 2) a determinação dos problemas mecânicos que estejam causando essas vibrações. A figura 1.5 apresenta o procedimento para a determinação dos diagnósticos, englobando essas duas atividades, executado a partir da lista de picos discrepantes em um espectro.

A figura 1.5 apresenta também o módulo de sugestão de providências. Uma vez determinados os diagnósticos e considerando as datas críticas previstas, deve ser executado um módulo que apresente as recomendações cabíveis em cada caso, com o objetivo de se tomar precauções ou de corrigir os problemas levantados.

Considerando que as primeiras funções do sistema estão relacionadas com a avaliação do estado da máquina monitorada, todos os módulos respectivos ficarão sob a coordenação de um módulo com esse título. Assim, a arquitetura global de um sistema para o monitoramento e diagnóstico de máquinas rotativas deve incluir em seu primeiro nível os seguintes quatro módulos principais, apresentados na figura 1.6, e reproduzindo o que foi apresentado até aqui:

- consulta à agenda;
- avaliação do estado;
- determinação de diagnósticos;
- sugestão de providências.

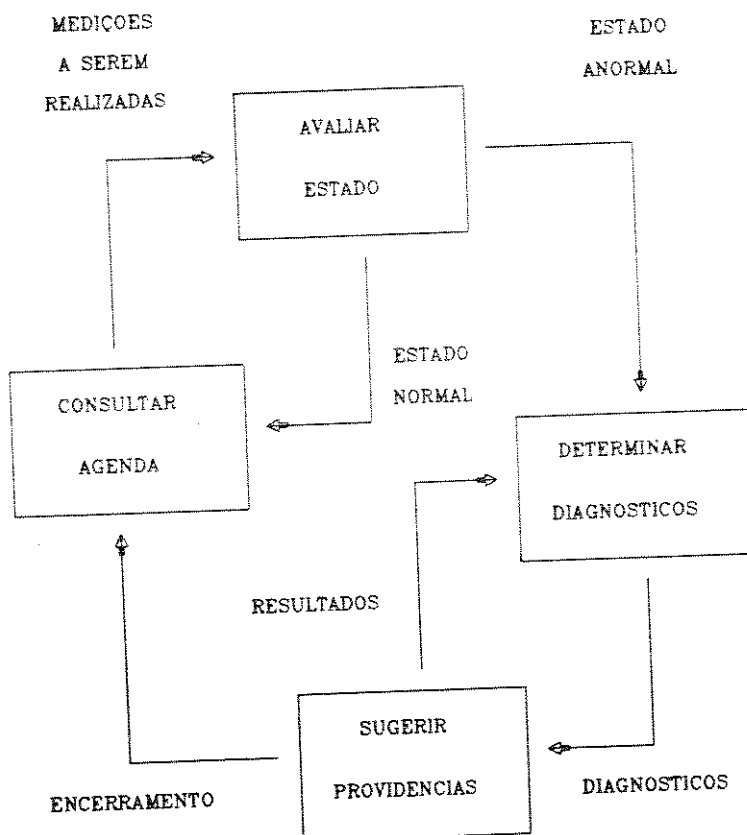


Fig. 1.6) Arquitetura básica do sistema.

1.4 ATIVIDADES DESENVOLVIDAS

Para o desenvolvimento de ferramentas computacionais que possibilitem a implementação de sistemas de monitoramento contínuo de diagnóstico de máquinas rotativas através da análise espectral das vibrações mecânicas, os trabalhos foram concentrados nas três áreas já mencionadas na seção 1.1, ou seja: a estruturação do conhecimento de análise espectral de vibrações e de uma metodologia para a aquisição e o processamento dos dados; o desenvolvimento de um método de reconhecimento de padrões para extrair informações dos espectros; e o projeto e implementação de métodos de representação do conhecimento e de processos de inferência para a interpretação dos sinais e a determinação dos diagnósticos. Para o teste das idéias e das ferramentas desenvolvidas, ao final dos trabalhos foi implementado um protótipo de um sistema de monitoramento e diagnóstico com sinais simulados, fazendo uso de uma parcela expressiva do conhecimento estruturado, e de todos os recursos básicos dos métodos desenvolvidos.

O desenvolvimento complementar de um sistema de aquisição de dados com características para implementar um instrumento de monitoramento contínuo foi realizado através de um convênio [Nóbrega, 89], mas não faz parte do escopo do trabalho. As ferramentas desenvolvidas são essencialmente da área de "software", prescindindo na verdade de análises experimentais no nível atual.

A organização do texto dos demais capítulos será esclarecida a seguir.

No capítulo 2 é apresentada uma visão geral da análise espectral de vibrações mecânicas, e listadas as principais causas de vibrações e seus sintomas mais comuns. É concluído com a abstração de uma metodologia para o procedimento de monitoramento, análise, e diagnóstico de sistemas rotativos, e com uma exposição de sua aplicação a alguns casos extraídos da literatura.

No capítulo 3 é apresentada a estruturação e compilação do conhecimento necessário para a realização de diagnósticos, envolvendo a definição da matriz de diagnósticos e sintomas, o sequenciamento da análise das informações e as regras que acionarão o mecanismo de inferência.

No capítulo 4 é apresentado o método desenvolvido para o reconhecimento de padrões nos espectros, envolvendo uma gramática de picos para a caracterização dos tipos de picos usados nas análises, uma gramática de árvores para gerar uma representação dos espectros e as máquinas de estados finitos respectivas para implementar os algoritmos.

No capítulo 5 são apresentados um resumo dos conceitos básicos de sistemas baseados em conhecimento, a classificação adotada para os sistemas mecânicos e seus componentes, e o

método desenvolvido para a representação do conhecimento estático através de redes semânticas.

No capítulo 6 são apresentados o modelo lógico para a aquisição e processamento dos sinais, e a rede de inferência e seus elementos estruturais, onde estão representados os sintomas, os diagnósticos e as regras de produção, incluindo os mecanismos de silogismo implementados.

No capítulo 7 são analisados os resultados atingidos através do sistema protótipo montado com as ferramentas desenvolvidas, com uma avaliação individualizada das características dos métodos implementados. Apresentam-se ainda a necessidade de desenvolvimentos adicionais e as conclusões finais.

CAPÍTULO 2

ANÁLISE DE VIBRAÇÕES E DIAGNÓSTICO DE MÁQUINAS ROTATIVAS

2.1 Estado Atual da Análise de Vibrações

2.2 Visão Inicial das Vibrações Mecânicas

2.3 Causas Comuns de Vibrações Mecânicas

- 2.3.1 Desbalanceamentos**
- 2.3.2 Desalinhamentos**
- 2.3.3 Folgas Mecânicas**
- 2.3.4 Instabilidades**
- 2.3.5 Mancais Defeituosos**
- 2.3.6 Defeitos na Transmissão**
- 2.3.7 Problemas com Máquinas Elétricas**

2.4 Abstração de uma Metodologia

- 2.4.1 Conceito de Episódio**
- 2.4.2 Avaliação do Estado**
- 2.4.3 Disparo de Gatilhos**
- 2.4.4 Determinação de Diagnósticos**
- 2.4.5 Sugestão de Providências**

2.5 Análise de Casos Específicos

- 2.5.1 Alta Vibração em Ventilador**
- 2.5.2 Vibração Causada por Correia**
- 2.5.3 Motor Elétrico com Rotor Excêntrico**
- 2.5.4 Falha em Rolamento em Máquina de Papel**

2.6 Procedimento Generalizado

Tendo em vista a caracterização da sintomatologia dos problemas em sistemas mecânicos, será de início apresentada nesse capítulo uma revisão dos aspectos básicos envolvidos com a análise espectral das vibrações de máquinas rotativas. Uma revisão do conhecimento para a análise dos espectros será apresentada, onde os problemas mais comuns e a forma de identifica-los através de sintomas serão levantados. Apresenta-se ainda a metodologia abstraída a partir de casos colhidos na literatura, alguns dos quais serão analisados sob esse contexto.

2.1 ESTADO ATUAL DA ANÁLISE DE VIBRAÇÕES

Toda máquina ou estrutura mecânica apresenta vibrações, relacionadas com diversas causas. A partir do estudo da composição espectral dos sinais de vibração, adquiridos através de sensores adequados, é possível se detectar a existência de perturbação nessa composição, o que, pela avaliação das relações entre causas e efeitos, pode conduzir à determinação do problema que a está provocando.

Em paralelo com a determinação do problema causador da perturbação na vibração normal de um sistema mecânico, vem uma avaliação de sua gravidade. Através da avaliação de diversos espectros obtidos periodicamente no mesmo sistema, pode-se realizar uma análise do desenvolvimento do problema, possibilitando a detecção precoce da ocorrência de falhas e evitando-se situações de emergência e paradas catastróficas.

Como consequência natural, a opção pela continuidade do funcionamento de sistemas com uma possível falha em evolução, pode ser realizada com minimização dos riscos, uma vez que a gravidade da situação pode ser estimada. Ainda, o sistema de monitoramento permite a operação em condições não nominais, como pode ocorrer por exemplo em usinas hidro-elétricas com reservatórios em níveis abaixo do projetado.

No entanto, para se atingir diagnósticos confiáveis no monitoramento contínuo digital de máquinas de grande porte, faz-se necessário uma metodologia bem fundamentada, o que ainda se encontra longe de ser atingido [Smith, 87]. Com o uso de analisadores espectrais convencionais os procedimentos são empíricos, e cada equipe de análise de vibrações termina por criar métodos próprios. Mesmo porque as normas existentes não são de ampla aplicação, devido ao imenso número de possibilidades para configuração de sistemas mecânicos.

As normas internacionais mais citadas de forma geral não possuem aplicação em relação à possibilidade de diagnósticos. No que tange à instrumentação analógica e sua instalação, a norma do American Petroleum Institute SN 670, apesar de voltada para a área petrolífera, é bastante abrangente e pode ser aplicada quanto à orientação dos tipos e quantidades de sensores, e onde posicioná-los. No entanto, não fornece qualquer indicação de como se pode avaliar os espectros. Quanto às normas referentes às vibrações globais das diversas classes de máquinas [ISO 2372] [ISO 3945], em geral elas devem ser usadas como referência a partir da qual níveis de alarme podem ser estipulados, levando em conta principalmente a experiência adquirida com cada máquina.

Assim, os procedimentos de interpretação dos sinais não possuem métodos completos e gerais que possam ser encontrados na literatura e que conduzam a resultados satisfatórios. Uma das razões para tanto é a própria falta de ferramentas de trabalho adequadas.

2.2 VISÃO INICIAL DAS VIBRAÇÕES MECÂNICAS

A vibração mais simples que pode ser analisada a título de exemplo seria um sistema massa-mola ideal. Afastando-se a massa de seu ponto de equilíbrio, após liberada ela entrará em movimento harmônico simples. O deslocamento dessa massa pode ser descrito através de uma senoide onde a amplitude máxima corresponde ao afastamento inicial e sua fase varia com o tempo proporcionalmente ao período de oscilação, o qual é determinado pela massa e constante da mola [Inman, 89]. A representação espectral correspondente consiste em uma raia de amplitude igual à amplitude da senoide, na frequência determinada pelo período de oscilação. A figura 2.1 apresenta uma ilustração desses elementos.

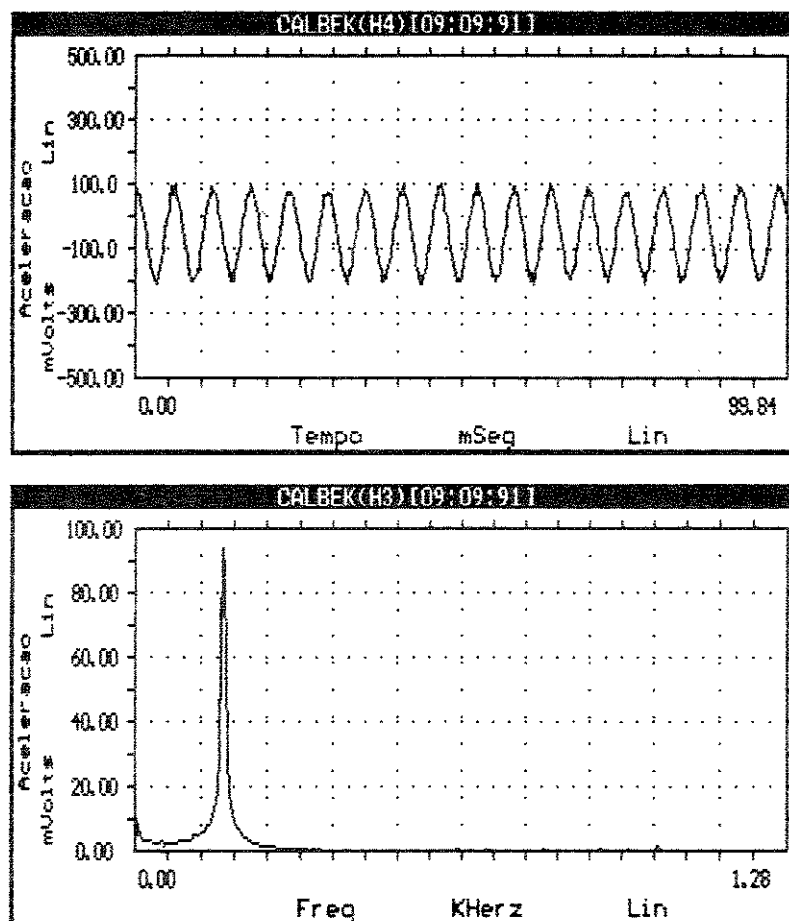


Fig. 2.1) Senoide representando a vibração de um sistema massa-mola e seu espectro com uma única raia.

Tratando-se de um sinal periódico, o cálculo da Série de Fourier correspondente levaria a dois componentes, nas frequências positiva e negativa, com a metade da amplitude da oscilação, conduzindo assim a um espectro de dois lados, ou seja, com frequências positivas e negativas [Randall, 87]. Para estabelecer uma compreensão para a frequência negativa, uma vibração com as características descritas será entendida como dois vetores girantes na frequência considerada, porém em sentidos opostos, com fases iniciais complementares e módulos com valor da metade da amplitude da vibração. Desse modo a soma será sempre real, com um módulo equivalente à amplitude da vibração.

Um sinal de vibração de uma máquina rotativa será muito mais complexo que uma senóide pura, com diversos componentes significativos em várias frequências, fundamentais e harmônicas. Será visto portanto como um conjunto de fasores nessas frequências, onde a fase será tomada em relação a uma referência única. O espectro de um único lado, usado normalmente em todas as análises, levará em conta apenas os fasores girando em um único sentido, porém considerando seu módulo com o dobro do valor, ou seja, equivalente à amplitude máxima da vibração correspondente.

A aplicação do monitoramento de vibrações é favorecida nas máquinas rotativas através da análise espectral, porque a rotação básica de cada eixo vai constituir uma frequência fundamental, em relação a qual todos os defeitos apresentarão alguma conotação. Existindo várias rotações em um sistema mecânico, haverá várias fundamentais e suas harmônicas, tornando os sinais mais complexos. Ainda, uma vez que todas as máquinas rotativas são essencialmente estruturas mecânicas, existirão as diversas frequências naturais que lhes são características. A excitação eventual dessas frequências acarreta também maior complexidade no sinal resultante.

2.3 CAUSAS COMUNS DE VIBRAÇÕES MECÂNICAS

As vibrações mecânicas resultam de forças dinâmicas atuando nos sistemas e dando origem a diversos movimentos, tanto angulares como lineares, e com frequências, amplitudes e fases diferentes. A energia dissipada pelas vibrações tem sua origem na energia básica transmitida ao sistema, representando assim perda na eficiência. Entre as causas mais comuns de vibrações, podem ser citadas as forças resultantes de desbalanceamentos, inerciais, e do efeito giroscópio [Collacott, 77] [Nepomuceno, 89]. A partir da atuação inicial dessas forças pode se dar um processo de desgaste, desalinhamento, envergamento ou fratura, acarretando eventualmente movimentos mais complexos com choques aleatórios, batimentos e atritos entre peças, além de ressonâncias e turbilhonamento dos fluidos envolvidos, com pulsações de pressão e vórtices.

O estudo das causas das vibrações é muito extenso e foge ao escopo desse trabalho. O que se pretende é apenas uma visão genérica das origens das vibrações, uma vez que o objetivo é sua detecção. Serão analisadas algumas causas principais de vibrações, tendo em vista o tipo de sinal respectivo gerado, para se poder especificar adequadamente o procedimento necessário ao seu diagnóstico.

Algumas dessas causas de vibrações representam problemas muito comuns. Entre eles podem ser citados os seguintes:

- desbalanceamentos;
- desalinhamentos;
- folgas mecânicas;
- instabilidades;
- defeitos em mancais;
- defeitos na transmissão;
- problemas com máquinas elétricas.

Esses problemas serão analisados a seguir do ponto-de-vista de como eles se revelam através dos espectros, e quais os aspectos que devem ser ressaltados em uma análise. Algumas informações serão frequentemente utilizadas para a caracterização dos diversos problemas, associadas à picos específicos existentes nos espectros. São elas:

- a frequência dos picos;
- o formato;
- a amplitude;
- o plano dominante;
- a relação de fase.

Outras informações também relevantes referem-se ao comportamento do pico ao longo do tempo e à forma como ele surgiu, se gradativa ou subitamente. Outros aspectos ainda estão ligados à constituição física dos sistemas mecânicos. Tanto essa avaliação das informações significativas quanto a sintomatologia apresentada a seguir estão baseadas em alguns textos de escopo geral [Wavetek, 84] [Bate, 88] [Nepomuceno, 89] e em artigos que apresentam casos específicos.

2.3.1 Desbalanceamentos

A existência de desbalanceamento em pequeno grau faz parte de qualquer máquina rotativa. Assim o problema não é exatamente detectar o desbalanceamento, mas quando ele passa de um valor limite. A evolução do desbalanceamento ocorre pela acumulação de detritos em algum ponto das peças rotativas, por exemplo nas pás de uma turbina ou ventilador, ou por desgaste irregular do rotor. Ou seja, por uma variação da distribuição de massa nos componentes rotativos. Pode aparecer no entanto de forma gradual, nos casos expostos acima, ou subitamente, quando ocorre por exemplo a quebra de

uma pá de turbina. Deformações térmicas, dando origem à curvatura do eixo ou no acoplamento, também aparecem como forma de desbalanceamento.

Os desbalanceamentos aparecem como um pico de alta amplitude e energia na frequência de rotação da peça desbalanceada. Em geral consiste em um pico único de formato estreito, podendo ser detectado nas direções radial e axial, com predominância para a radial quando o rotor é apoiado entre mancais, e axial quando o rotor está em suspenso ("overhung").

O desbalanceamento de massa pode ser estático ou dinâmico, o que pode ser detectado através da avaliação da fase entre sinais de sensores equivalentes posicionados em linha nos dois mancais do rotor. O desbalanceamento estático indicará defasagem nula, enquanto o dinâmico indicará um valor entre zero e 180 graus. Caso haja deformações na região do acoplamento, dando origem à curvatura do eixo, a defasagem será de 180 graus [Wavetek, 84] [Bate, 88]. A figura 2.2 mostra um espectro indicativo de desbalanceamento, obtido na medição de uma máquina centrifugadora em um processo de produção de margarina.

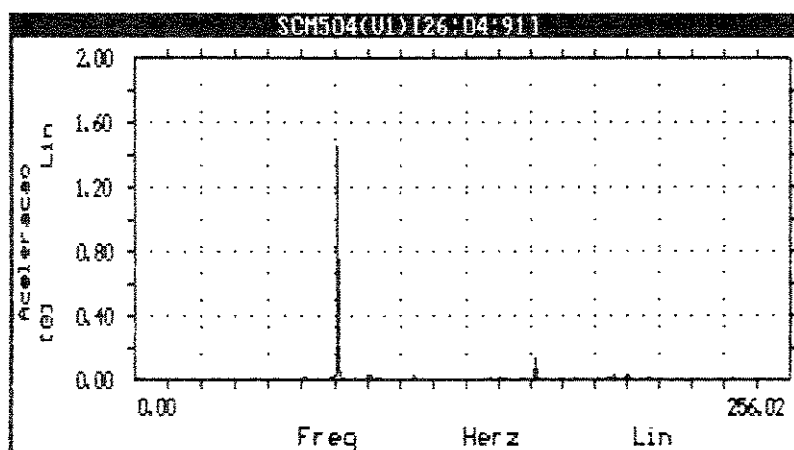


Fig 2.2) Espectro representativo de desbalanceamento.

2.3.2 Desalinhamentos

O desalinhamento pode ser angular, paralelo ou misto. O desalinhamento angular ocorre quando há um ângulo não nulo entre os dois eixos rotativos acoplados; o paralelo quando o ângulo entre os dois eixos é nulo porém eles não estão na mesma linha. É possível ainda encontrar simultaneamente os dois problemas.

A evidência principal para os dois tipos é a ocorrência de um pico único de alta amplitude na frequência dupla da rotação, de formato normalmente estreito. Também nesse caso o problema consiste em se determinar se o valor do pico, existente normalmente, ultrapassou o valor limite. A direção axial é predominante para o desalinhamento angular e a radial para o paralelo, conquanto possam existir componentes de pequena amplitude nas direções não predominantes. Quando a amplitude é alta nas duas direções significa a ocorrência de desalinhamento misto [Wavetek, 84] [Bate, 88].

A figura 2.3a apresenta um espectro obtido na medição de um compressor de amônia. A figura 2.3b apresenta um espectro obtido no mesmo ponto, porém após a correção do problema. É muito nítida a variação de amplitude do pico da segunda harmônica da rotação, que na primeira medição era superior à fundamental.

A diferença de fase para o desalinhamento angular será diferente para as duas direções, de 180 graus para a direção radial e nula para a axial. Para o desalinhamento paralelo, a diferença de fase será de 180 graus nas duas direções.

Em acoplamentos com grande distância entre os mancais, deverão ocorrer altas amplitudes também para o pico da rotação.

2.3.3 Folgas Mecânicas

A ocorrência de desgaste em peças deslizantes entre si é uma decorrência natural da operação das máquinas. Assim, folgas mecânicas excessivas tendem a surgir com o tempo, de forma inevitável, porém acentuadamente quando houver algum outro problema associado, causando uma raspagem entre as peças.

O resultado nos espectros respectivos aparece como o truncamento dos sinais no domínio do tempo, devido à ocorrência de cerceamento da vibração através de pancadas ou roçamento. O truncamento dá origem à várias harmônicas da frequência fundamental de rotação, podendo aparecer inclusive picos na metade da rotação, uma vez e meia a rotação, duas vezes e meia, etc. Picos de amplitude significativa em frequências até dez vezes a rotação são possíveis.

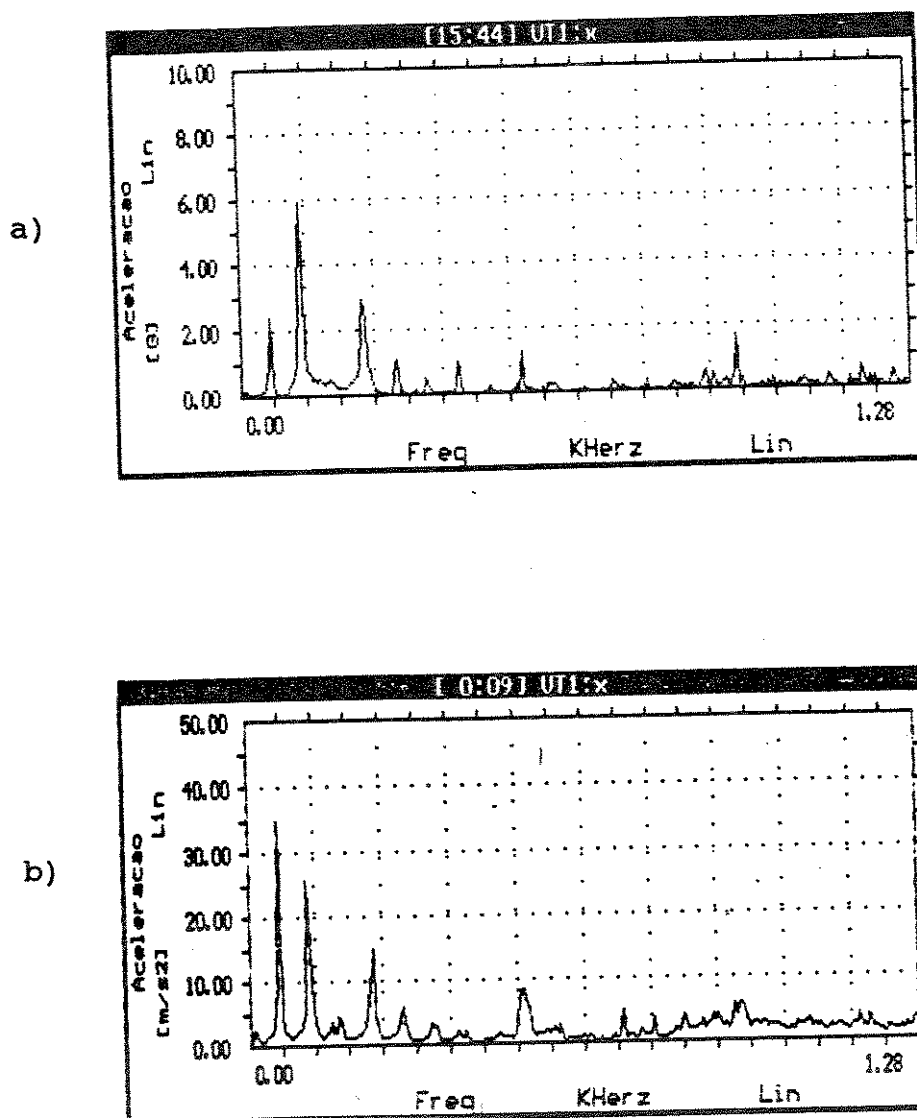


Fig. 2.3) Espectros indicativos de desalinhamento, antes (a) e após (b) a correção do problema.

O plano predominante da vibração é sempre a direção radial, porém com relação de fase variável e dependente do tipo de folga [Wavetek, 84] [Bate, 88].

Um exemplo claro pode ser visto na figura 2.4, onde o espectro obtido sobre um compressor de amônia apresenta vários múltiplos da rotação e alguns picos intermediários entre os harmônicos.

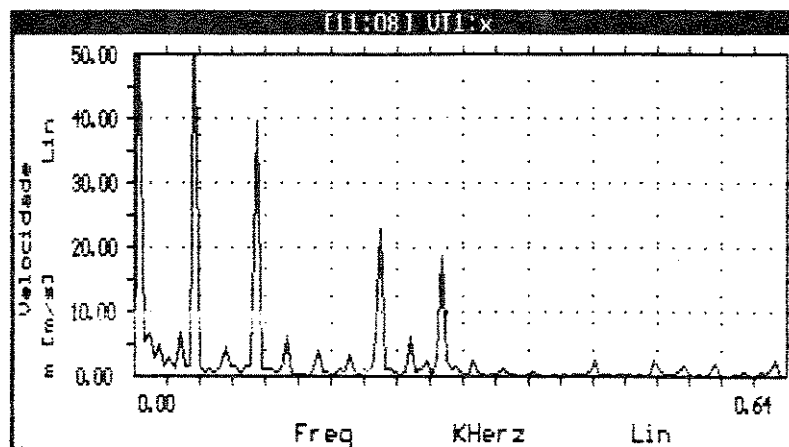


Fig. 2.4) Espectro ilustrativo de folga mecânica, apresentando vários harmônicos da rotação e picos intermediários.

A folga pode se dar ainda entre componentes naturalmente deslizantes, ou entre peças que não deviam se mover relativamente. Por exemplo, um parafuso mal fixado no pedestal de uma máquina ocasionando folga entre ela e suas fundações. Assim, as folgas podem ser classificadas como de componentes rotativos e não-rotativos.

No caso da existência de folga mecânica em componente rotativo, ocorrem variações de amplitude e fase devido ao deslocamento do centro de gravidade do eixo em relação aos mancais. Desse modo a amplitude será estável após a partida da máquina, variando entre partidas diferentes. As folgas de componentes mecânicos não-rotativos geram uma amplitude estável, variando apenas com a evolução dos problemas associados.

2.3.4 Instabilidades

Dois tipos de instabilidades (vibrações auto-excitadas) serão consideradas: turbulência no óleo em mancais de escorregamento e roçamento do rotor nos mancais. A turbulência no óleo ("oil whirl and whip") está associada à

tendência de um movimento sub-rotacional de precessão no eixo na direção contrária à da rotação, acarretando picos de baixa amplitude em frequências da ordem de quarenta a cinquenta por cento da frequência de rotação, com predominância do plano radial [Wavetek, 84] [Zimmer, 86].

A amplitude desses picos se apresenta estável, e deve ser considerada excessiva quando atinge a metade da folga normal do mancal. Durante o processo de ligação da máquina, ocorrerá inicialmente os picos de pequena amplitude ("oil whirl"). Porém aumentando-se a rotação, ao coincidir com os valores das frequências naturais do rotor, elas podem ser excitadas segurando a frequência do pico apesar da variação da rotação ("oil whip"), e dando origem a vibrações de grandes amplitudes com risco de danos sérios para a máquina. A passagem pela frequência de ressonância ocasiona também uma inversão de fase do sinal.

O roçamento do rotor se apresenta de forma semelhante, porém com picos em frequências sub-harmônicas que são subdivisões exatas da rotação, aparecendo principalmente a metade da rotação, porém também um terço, um quarto, etc. Pode excitar a frequência de ressonância do rotor, deslocando o pico respectivo para a mais próxima fração da rotação. O roçamento ocorre devido à existência de outros problemas, como o desalinhamento, folgas insuficientes, vibração excessiva, variações da rigidez do rotor, etc. Pode ser parcial atingindo apenas um certo ângulo do mancal, ou apresentar choques múltiplos entre o eixo e o mancal, ou completo, atingindo toda a extensão anular do mancal. Pode ainda apresentar todos esses comportamentos ao longo de um processo de variação da rotação.

2.3.5 Mancais Defeituosos

Os mancais mais comuns podem ser classificados de modo geral quanto ao seu tipo de apoio, ou seja como mancal de rolamento ou de escorregamento, os quais apresentam seus problemas de forma muito diferente. Dessa forma, serão analisados separadamente.

Os defeitos em mancais de rolamentos excitam normalmente a frequência de ressonância do conjunto rotor, mancal e suporte, necessariamente rígido, resultando assim em picos de alta frequência. Os defeitos em um rolamento, normalmente um desgaste, podem ser na pista interna, externa ou no elemento rolante, acarretando uma excitação sob a forma de impulsos transitórios cada vez que uma bola (ou rolo, dependendo do mancal) passa pelo desgaste, quando este é em uma pista, ou o desgaste de uma bola defeituosa se choca com uma pista. O fenômeno é semelhante ao toque de um sino, onde a frequência excitada é a de ressonância natural do sino, e nada tem a ver com a frequência das badaladas.

Assim, modulações referentes às frequências básicas do rolamento, calculadas a partir do número de elementos, dos diâmetros da pista externa e interna e demais parâmetros do mancal, acarretam a ocorrência de múltiplos picos na região da frequência de ressonância da estrutura do mancal. Os fabricantes apresentam os dados para o cálculo dessas frequências em seus catálogos, para cada modelo de rolamento. Para conhecer a região de ressonância, é suficiente uma medição do sistema parado e excitado por uma martelada.

Desse modo picos múltiplos e de valores próximos se desenvolvem em consequência da evolução do defeito, podendo ocorrer um aumento da linha base em todo o espectro. Com a evolução, na medida da gravidade do problema, picos harmônicos da rotação podem surgir. As amplitudes dos sinais provenientes de defeitos nos mancais de rolamento é crescente com a evolução do problema. No entanto, pode ocorrer um súbito desaparecimento dos picos envolvidos, o que é indicativo de falha imediata [Wavetek, 84] [Nepomuceno, 89].

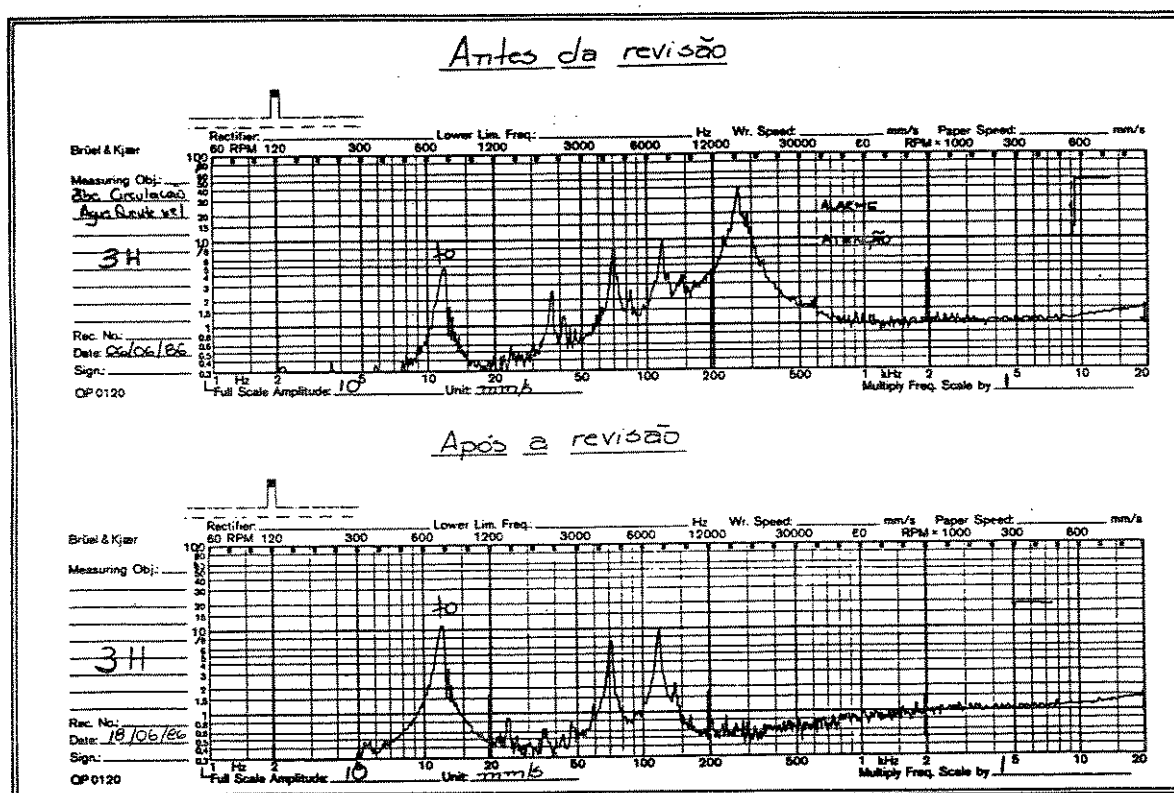


Fig. 2.5) Espectros indicando problema em rolamento, antes e após a revisão, reproduzido de [Nepomuceno, 89].

A figura 2.5, reprodução da literatura [Nepomuceno, 89] apresenta dois espectros, obtidos sobre um mancal de rolamento inicialmente com problema, antes e após sua correção. Note-se a existência de um pico múltiplo de alta amplitude e com uma larga banda base no primeiro espectro, que praticamente desapareceu no segundo, quando o rolamento foi substituído.

Os mancais de rolamento podem ser cilíndrico ou cônicos. Os mancais cilíndricos apresentam o plano dominante da vibração na direção radial, enquanto os cônicos o apresentam na direção axial. Na verdade, um mancal é utilizado em um projeto prevendo-se a necessidade da ação radial ou axial ou mista, e nesse caso a vibração acompanhará as forças envolvidas.

Para os mancais de escorregamento, o problema em geral está associado a outros, apresentando-se como roçamento do eixo, turbulência no óleo ou como folga mecânica. No caso de folga mecânica, no estágio inicial surgem picos com frequências sub-harmônicas da rotação e de pequena amplitude, na direção radial. Com a evolução do problema, harmônicos da rotação se desenvolvem, principalmente a fundamental, dupla e tripla, podendo apresentar uma linha base de alta energia. É indicado o monitoramento da posição da linha central do eixo, o que pode ser feito através do traçado da órbita entre dois sinais radiais do mesmo mancal, defasados de noventa graus. Deve-se notar que os problemas de instabilidades apresentados na seção 2.3.4 são característicos de mancais de escorregamento. Assim, eles serão tratados como casos de problemas com mancais de escorregamento.

2.3.6 Defeitos na Transmissão

As formas mais comuns para a transmissão de potência fazem uso de engrenagens (caixas de redução), correias, e acoplamento direto.

A análise das caixas de redução depende de sua estrutura interna, ou seja, número de eixos, tipos e formatos das engrenagens, etc. No entanto, as relações básicas podem ser estabelecidas para um par de engrenagens, e estendidas para cada caso nas aplicações específicas.

Uma referência importante é a chamada frequência de engrenamento, resultante da multiplicação da rotação da engrenagem pelo seu número de dentes. Os defeitos se manifestam em geral através da evolução do pico nessa frequência e de seus harmônicos, ou de lobos laterais, com amplitude variável com a potência transmitida e com a gravidade do defeito [Nepomuceno, 89][Wavetek, 84][Angelo, 87].

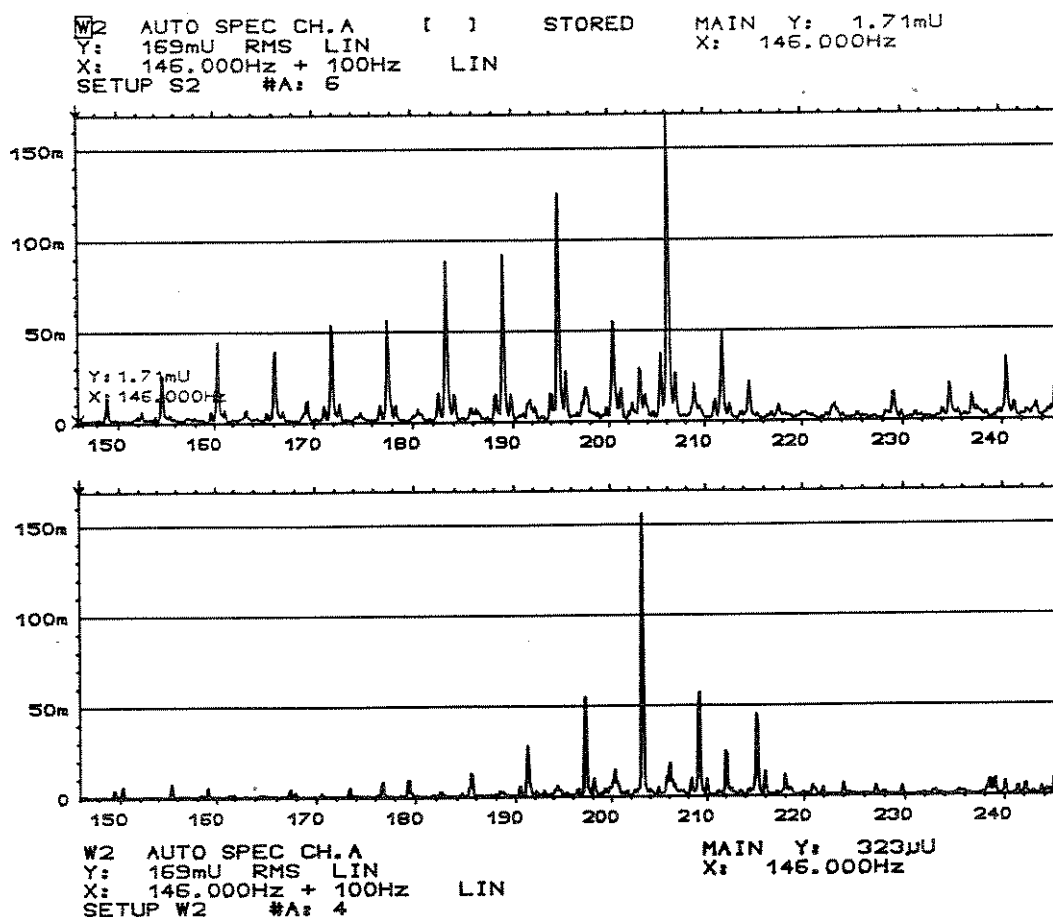


Fig. 2.6) Exemplo de desbalanceamento simulado pelo autor em engrenagem em bancada de testes.

Na figura 2.6 podem ser vistos dois espectros ampliados com o método zoom-TFR em torno da frequência de engrenamento, representada pelo pico de maior amplitude em cada gráfico, onde as rotações foram ligeiramente diferentes. No gráfico de baixo, com um par de engrenagens normal, ocorrem alguns lobos laterais. No gráfico de cima, onde foi simulado um desbalanceamento em um dente da segunda engrenagem, ocorrem diversos lobos laterais com evidente aumento na amplitude. O espaçamento entre os lobos é igual à frequência de rotação da engrenagem com o defeito. Pequenos picos intermediários resultam do batimento entre as duas frequências de rotação, na modulação.

Os problemas que se repetem uma vez a cada rotação apresentarão a modulação da frequência de engrenamento, e em caso mais graves também o pico da rotação respectiva. É o caso por exemplo da falta de um dente. Outros múltiplos da frequência de rotação podem também serem excitados, quando

existirem outros problemas associados, por exemplo desalinhamento.

Os problemas que ocorrem ao longo de toda a rotação da engrenagem, por exemplo uma superfície inadequada para o acoplamento dos dentes, excitarão de forma mais significativa apenas a frequência de engrenamento e seus múltiplos, com uma variação maior para a terceira e a segunda harmônica.

O plano dominante para engrenagens cilíndricas é a direção radial, enquanto para engrenagens helicoidais ou "espinhas de peixes" é a axial.

No caso de transmissão por correia as frequências envolvidas são as de rotação dos dois eixos, a de ressonância da correia, e a frequência de passagem da correia, que consiste em uma relação entre a rotação, a distância entre os centros das polias e o comprimento da correia [Wavetek, 84].

O desgaste na correia, desajuste ou excesso de tensão, aparecem como múltiplos da frequência de passagem da correia, com predominância normal da segunda harmônica. A amplitude pode ser instável, e ocorrerem batimentos quando picos diferentes possuam frequências próximas. O plano dominante é o radial, com a amplitude máxima na direção da transmissão.

Correias excêntricas ou polias desbalanceadas apresentam um pico de amplitude estável na frequência de rotação do eixo respectivo, na direção radial. A defasagem entre sinais colhidos nos mancais das duas polias deverá ser nula.

O desalinhamento entre polias deverá apresentar picos nas frequências de rotação dos dois eixos, na direção axial, com amplitude estável e defasagem nula entre sinais obtidos nas duas polias.

A ressonância da correia ocorrerá para uma dada relação entre a velocidade, dimensões da correia, densidade e tensão, não possuindo nenhuma relação com as frequências rotacionais. Tem predominância no plano radial e pode apresentar amplitude instável. Pode ser facilmente confirmada com o uso de luzes estroboscópicas sincronizadas. A variação nos parâmetros apresentados, como por exemplo a tensão da correia, pode eliminar o problema.

2.3.7 Problemas com Máquinas Elétricas

A máquina elétrica mais comum no ambiente industrial é o motor de indução, sendo portanto o mais abordado na literatura. As idéias apresentadas a seguir foram retiradas principalmente de um texto geral [Wavetek, 84] e um outro específico sobre motores de indução [Bate, 88]. A análise será referida basicamente aos motores de indução, porém podem ser estendidas para todos os tipos de máquinas elétricas.

As máquinas elétricas constituem um caso particular em relação aos problemas gerais discutidos acima, uma vez que podem sofrer diversos deles, além dos problemas específicos envolvendo eletricidade que serão abordados nessa seção, ampliando o leque dos sintomas e diagnósticos. Todos os demais problemas, de ordem puramente mecânica, serão analisados de acordo com o que foi apresentado nas seções anteriores.

De uma forma geral, os problemas com motores elétricos podem ser relacionados como mecânicos ou eletro-magnéticos. Os problemas eletro-magnéticos envolvem variações dos campos devido à perturbações de ordem mecânica ou de correntes elétricas. As causas são várias, resultando porém em dois efeitos básicos: variações na distância do entreferro, ou variação das correntes elétricas. Ambos os efeitos acarretam uma variação do fluxo magnético a que o rotor está sujeito, e são difíceis de serem discriminadas as diversas causas dos problemas apenas com o monitoramento da vibração.

Os problemas eletro-magnéticos podem ser classificados como "estacionários" ou "rotativos", de acordo com a peça onde o problema se localiza. Ou seja, se a peça respectiva é rotativa ou não. Como estacionários e envolvendo variação do entre-ferro, pode-se relacionar a excentricidade estática e problemas no suporte do estator, e envolvendo variações de corrente, problemas no enrolamento do estator. Como rotativos e com variação no entre-ferro, pode-se referir excentricidade dinâmica e barras do rotor frouxas. Rotativos com variações de corrente pode-se mencionar barras do rotor quebradas e lâminas do rotor em curto.

Os problemas estacionários apresentam um pico na frequência dupla da linha de alimentação elétrica, enquanto os rotativos apresentam picos na frequência de rotação com lobos laterais, devido ao batimento entre as frequências síncronas e de rotação. A frequência síncrona é a de rotação do campo magnético, correspondendo por exemplo a 60 Hz no caso de um motor de 3600 RPM. A frequência de rotação será um pouco menor, devido ao deslizamento do motor de indução, ocasionando assim o batimento. A frequência de deslizamento, a rigor, corresponde à metade da distância entre os lobos, porém pode ser considerada em uma interpretação livre como igual à distância entre os lobos.

As descontinuidades das forças magnéticas que resultam em vibrações e variações do torque, acarretam variação da velocidade angular do rotor. Em consequência, as vibrações apresentam modulação em frequência e em amplitude. O efeito porém é proporcional à inércia do rotor. Ou seja, para grandes inércias as variações de rotação são minimizadas, e assim o grau de modulação será menor. Por outro lado, devido às ranhuras para a passagem dos condutores tanto no rotor como no estator, ocorre uma deformação local das linhas de fluxo magnético, o que resulta em uma modulação existente em todos os motores, em frequências múltiplas da rotação e

proporcionais à relação entre o número de ranhuras e de pares de polos, conhecidas por frequências de ranhura.

Assim, problemas envolvendo excentricidade podem ser detectados através do desenvolvimento dos picos relacionados com as frequências de ranhuras e seus lobos laterais.

A excentricidade estática do rotor pode ocorrer devido a um desalinhamento interno, desgaste no rolamento ou aquecimento no estator. Apresenta um pico na frequência dupla da linha na direção radial, como todos os problemas estacionários, e picos em frequências múltiplas da rotação, onde a relação de multiplicação é a razão entre o número de ranhuras e o de pares de polos, com lobos laterais cuja distância é a frequência de deslizamento.

A excentricidade dinâmica pode resultar do empenamento do eixo, desgaste do rotor ou seu aquecimento. Nesse caso surgem picos na direção radial na frequência de rotação, com lobos laterais devido ao deslizamento, por ser um problema rotativo. Surgirão também os picos nas frequências de ranhuras, múltiplos da rotação e com lobos laterais, porém deslocados em relação aos picos excitados estaticamente.

A ocorrência de barras do rotor quebradas se revela da mesma forma, sendo impossível diferenciar apenas através da vibração. Como consiste em um problema rotativo porém de variação de corrente, o monitoramento das correntes pode permitir a identificação entre os dois problemas. Outros problemas envolvendo os rotores, como barras trincadas ou frouxas, curto-circuito nas lâminas do rotor, ou contatos gastos ("poor end-ring joints"), apresentarão os mesmos sintomas. Como não podem ser diferenciados serão todos englobados genericamente em excentricidade dinâmica, para uma eventual discriminação posterior.

Os demais problemas estacionários, que apresentam apenas o pico na frequência dupla da linha, podem ser o desbalanceamento de uma das fases através de sua indutância ou resistência, o aquecimento ou curto-circuito no estator, ou folga no suporte do estator ("loose iron"). Em todos o plano dominante é radial. Os picos são estáveis porém de baixa amplitude para o desbalanceamento de uma das fases, e alta para a folga no estator. Esses problemas aparecem de forma independente da carga a que o motor esteja submetido, e mesmo sob carga nula.

Há uma exceção apenas para folgas nas lâminas do estator, onde existe a evidência empírica da ocorrência de picos, além da frequência dupla da linha, em uma faixa de frequência da ordem de 1KHz, com lobos laterais com distanciamento na frequência dupla da linha. Pode apresentar altas amplitudes, porém não é usualmente destrutiva. Picos nas frequências de ranhuras podem ocorrer similares ao caso de excentricidade estática. O plano dominante é o radial.

Diversos problemas podem acarretar aquecimento do motor, o que, de uma forma geral, acarreta aumento da vibração respectiva. O aquecimento do rotor pode ser causado por lâminas em curto-circuito ou barras do rotor quebradas. O aquecimento do estator em geral é causado por lâminas do estator em curto-circuito.

A ocorrência de problemas puramente mecânicos resulta também em problemas eletro-magnéticos. Caso haja modulações em amplitude ou frequência nos sinais serão devido a problemas eletro-magnéticos. Eles porém podem ser isolados facilmente, através da interrupção da corrente elétrica, o que eliminará todos os componentes envolvidos com as relações eletro-magnéticas.

2.4 ABSTRAÇÃO DA METODOLOGIA

No item 2.3 foi apresentado o conhecimento básico que será incorporado à base do conhecimento do módulo de determinação de diagnósticos. Deve-se ressaltar que esse conhecimento é incompleto, e ainda assim não foi utilizado em sua totalidade no protótipo construído. O objetivo aqui é fundamentalmente o de estruturar o conhecimento, e para tanto faz-se necessário uma parcela significativa principalmente no aspecto qualitativo. Será buscada agora uma generalização dos procedimentos a fim de se abstrair um método que utilize esse conhecimento para o diagnóstico de máquinas.

Deve-se ressaltar que o trabalho foi realizado baseado no estudo de casos apresentados na literatura e não da interação com um especialista. Procurou-se, a partir dos procedimentos descritos, abstrair a metodologia. As referências básicas estão citadas a seguir [Zimmer, 86] [Ericsson, 86] [Angelo, 87] [Krishnan, 87] [Luukkanen, 87] [O'Sullivan, 90] [Bate, 88] [Frarey, 84] [Taylor, 88]. Os conceitos básicos da metodologia podem ser listados:

- Episódio;
- Gatilho;
- Estado;
- Tendências;
- Sintomas;
- Diagnósticos;
- Providências;
- Resultados;

2.4.1 O Conceito de Episódio

O conjunto de procedimentos a serem executados após se detectar uma vibração anormal na máquina monitorada, para diagnosticar e corrigir o problema será denominado de episódio. Por outro lado, um episódio deverá englobar todas as atividades que estejam de algum modo relacionadas ao mesmo problema, ou a outros problemas que tenham surgido em

consequência do primeiro. Um episódio poderá ter duração de vários dias, ou meses, envolvendo o acompanhamento da evolução dos problemas detectados e tarefas a serem realizadas pela equipe de manutenção envolvida. Assim, em um dado momento, diversos episódios podem estar em andamento. Eventualmente, episódios diferentes podem ser englobados em um único, ao se descobrir uma relação entre eles.

Através da Agenda o monitoramento contínuo de todos os pontos de medição é mantido, e realizada a consequente avaliação do estado do sistema monitorado. Ao se atingir um estado **Anormal**, um episódio é então iniciado. Caso já exista um episódio em andamento relacionado com a mesma máquina, as atividades serão a ele associadas. Dentro da metodologia proposta para o sistema, um episódio deverá envolver as seguintes atividades:

- disparo de gatilhos;
- avaliação de estado;
- realização de medições;
- comparação de espectros;
- avaliação de tendências;
- determinação de diagnósticos;
- identificação de sintomas;
- realização de novas medições e análises;
- sugestão de métodos complementares;
- análise de resultados complementares;
- sugestão de providências;
- análise de resultados de providências;
- encerramento do episódio.

A forma como essas atividades são acionadas e concluídas, e como estão interrelacionadas, será objeto de maior detalhamento na seção 2.5, ao se analisar alguns casos da literatura. Os conceitos envolvidos serão abordados a seguir.

2.4.2 Avaliação de Estado

O conceito de Estado será representado por uma variável lógica que assumirá valores associados ao nível da amplitude da vibração global ou de picos do espectro. Existirá assim um estado para cada ponto de medição. O estado do sistema monitorado será caracterizado como o de mais alto nível, ou seja o de maior gravidade, entre os estados de seus pontos de medição. Serão utilizados três níveis relativos para a classificação da amplitude dos picos dos espectros. Os estados serão classificados em termos da gravidade crescente como:

- Normal;
- Alerta;
- Alarme;
- Emergência.

Os estados que indicam algum problema potencial, **Alerta**, **Alarme** e **Emergência**, serão genericamente chamados de estados "**Anormais**". Ao se constatar que uma medição realizada em um ponto de medição qualquer acarretou um estado anormal, um gatilho será acionado levando a uma ação de determinação de diagnóstico, conforme será visto a seguir.

2.4.3 Disparo de Gatilhos

Existe necessidade de um fator que acione o procedimento para avaliação do estado de uma máquina, de determinação de diagnóstico ou de sugestão de providências. Para tanto foi criado o conceito de "gatilho", o qual está associado ao de "ação", que consiste no procedimento a ser executado ao ser disparado o gatilho. Um gatilho possui portanto dois componentes: a condição e a ação. Existem dois tipos de gatilhos: o temporal e o eventual. O gatilho temporal é aquele que é disparado ao se atingir um determinado momento, quando então uma ação será executada. O gatilho eventual consiste na ocorrência de algum fato que acarrete a execução de uma ação. Uma lista dos gatilhos constitui o corpo central da **Agenda**, a qual verifica periodicamente as tarefas a serem realizadas.

Em programas de manutenção preditiva de monitoramento periódico manual, é comum que o nível global da vibração cumpra o papel de gatilho, motivando a realização de análises posteriores. Isso se deve ao fato de que a vibração global é um bom indicativo do estado da máquina. Assim, o nível global da vibração é um parâmetro significativo, o qual deve ser complementado com a observação periódica da variação de picos específicos, ou o surgimento de novos picos, em um sistema de monitoramento contínuo.

Uma conclusão relevante atingida ao longo do procedimento de diagnóstico pode também atuar como gatilho, disparando uma complementação do procedimento. Por exemplo, o acionamento de um alarme sonoro ao ser identificado um nível da vibração com perigo de danos materiais ou de segurança.

Um ponto de medição pode ter um gatilho indicativo de vibração anormal, que, ao ser disparado, aciona o cálculo do espectro respectivo e a comparação com sua referência. As discrepâncias encontradas serão traduzidas em termos admissíveis pelo sistema de inferência, ao qual serão repassadas, dando início então à determinação do diagnóstico.

A análise de tendências tem o objetivo de determinar a forma como as amplitudes dos picos vêm evoluindo, e estimar quando serão ultrapassados os limites para os níveis de **Alarme** ou de **Emergência**. Será realizado o cálculo de uma regressão exponencial para cada pico que tenha acusado pelo menos o estado de **Alerta** pela segunda vez consecutiva, antes do início do procedimento de diagnóstico.

2.4.4 Determinação de Diagnósticos

A determinação de diagnósticos procura relacionar os sintomas existentes com possíveis causas mecânicas ou elétricas que possam apresentar uma explicação satisfatória para os fatos observados. Para tanto faz uso da matriz de sintomas e diagnósticos utilizada como base para o conhecimento representado no sistema, da realização de novas medições e análises, e de métodos complementares. Assim, um passo essencial é a identificação de todos os sintomas. Em função da análise desses sintomas, novas medições podem ser realizadas, e/ou métodos complementares podem ser sugeridos. A matriz de sintomas e diagnósticos será apresentada na seção 3.2.

A identificação de sintomas consiste basicamente na busca de ocorrências características nos picos dos espectros, a serem cruzadas com informações disponíveis relativas à estrutura e ao funcionamento do sistema monitorado (por exemplo, a frequência de um pico comparada com a rotação do eixo onde foi realizada a medição), a fim de se estabelecer todas as evidências possíveis. Além dos dados extraídos dos espectros, diversas informações relativas à constituição física da máquina e das condições de medição serão também consideradas sintomas. Os dados relativos aos espectros serão fornecidos ao módulo de inferência no início do procedimento para determinação de diagnósticos, enquanto as informações complementares serão solicitadas na medida em que se tornarem necessárias à análise.

Após a avaliação das informações referentes à medição da vibração de um ponto, diversos diagnósticos em geral serão apontados como prováveis. A realização de novas análises pode então ser indicada, em função desses diagnósticos, para confirmá-los ou eliminá-los da lista, eventualmente necessitando de novas medições.

Ao se esgotar a determinação de diagnóstico a partir da interpretação exclusiva de espectros de vibração, seus resultados podem ser corroborados através de métodos tradicionais que envolvam atividades da equipe de manutenção. Por exemplo, o uso de luz estroboscópica pode ser um bom indicativo da existência ou não de desbalanceamento. Assim, após atingido um diagnóstico, métodos complementares podem ser sugeridos e programados pelo sistema.

Em consequência do uso de um método complementar, o sistema agenda um gatilho eventual para disparar uma avaliação dos resultados assim atingidos. Após a realização da tarefa exigida pelo método, esses resultados serão transmitidos ao sistema, para a devida ponderação e novas conclusões. Tendo sido programado o gatilho o sistema pode interromper o episódio em que se encontrava, até que um novo gatilho seja disparado.

2.4.5 Sugestão de Providências

A sugestão de providências refere-se às medidas de caráter geral que devem ser tomadas para corrigir os problemas diagnosticados, ou para que se evite qualquer dano maior em consequência de tendências detectadas. Assim, alguns casos, mesmo sem terem sido diagnosticados, podem exigir atitudes imediatas, devido ao risco da ocorrência de falha.

Métodos diversos de manutenção podem ser sugeridos, tais como o balanceamento ou alinhamento de rotores, ou a substituição de mancais, para citar apenas alguns. O operador deverá selecionar a providência a ser tomada, dentre aqueles que estiverem cadastrados no sistema.

A seleção de uma providência pelo operador resultará também na programação de um gatilho, semelhante ao que ocorre no caso dos métodos complementares. Ou seja, o sistema ficará aguardando que o operador transmita os resultados atingidos.

A confirmação final do diagnóstico poderá ser realizada através da inspeção visual ou instrumentada das peças trabalhadas ou substituídas. Ou através da comprovação de que os sintomas desapareceram, após terem sido tomadas as providências sugeridas.

O retorno às condições satisfatórias de operação do ponto-de-vista da vibração deve ser assegurado como condição fundamental para o encerramento do episódio. Assim, após a avaliação dos resultados das providências sugeridas, novas medições e comparações entre espectros deverão ser realizadas para assegurar que os problemas foram de fato eliminados. Ou seja, enquanto existir algum estado anormal, em consonância com o episódio em questão, ele não poderá ser encerrado. Eventualmente, alterações mais radicais podem ter sido realizadas, com as condições anteriores não podendo mais ser atingidas. Nesse caso, os parâmetros do gatilho respectivo devem ser alterados.

Finalmente, tendo retornado todos os estados a níveis satisfatórios, o episódio pode ser encerrado, com o arquivamento definitivo de suas informações.

2.5 ANÁLISE DE CASOS ESPECÍFICOS

Serão apresentados a seguir alguns casos extraídos da literatura, onde o conhecimento da análise de vibrações foi usado para a interpretação dos espectros. Esses casos serão analisados resumidamente sob a ótica de seus autores e também sob a metodologia proposta, como forma de esclarecer e detalhar a sua aplicação.

2.5.1 Alta Vibração em Ventilador

Alto nível de vibração global foi detectado em um ventilador acionado por motor elétrico a 1400 RPM, com acoplamento direto [Krishnan, 87].

Os níveis medidos para o deslocamento em microns pico a pico no mancal de escorregamento do ventilador foram:

Horizontal	580
Vertical	130
Axial	180

No mancal do motor os níveis obtidos foram:

Horizontal	220
Vertical	46
Axial	75

Tendo sido realizada uma análise espectral no mancal do ventilador, verificou-se que o pico na frequência de rotação era de 520 microns e na frequência dupla da rotação era de 150 microns, na direção horizontal, portanto muito altos.

Três possibilidades foram inicialmente consideradas: desbalanceamento, desalinhamento e folga mecânica. O desalinhamento entre o motor e o ventilador foi negado através da análise de fase, uma vez que foi constatado que em todas as direções os sinais do motor e do ventilador estavam em fase. Assim, desbalanceamento e folga mecânica foram consideradas as explicações para a vibração, e sugerido o procedimento de balanceamento do ventilador.

Tendo sido realizado o balanceamento para o rotor do ventilador, os novos níveis globais obtidos foram:

	Mancal do ventilador	Mancal do motor
Horizontal	190	120
Vertical	120	20
Axial	40	40

Observa-se pelos números que houve uma melhora significativa na vibração, porém com alguns valores ainda muito altos. Nova análise espectral indicou que o pico da rotação obteve uma redução satisfatória, porém o pico duplo da rotação tornou-se predominante. A conclusão foi de que a folga mecânica, associada ao desgaste nos mancais e à mistura do óleo com a água de refrigeração não permitiam diminuir o nível de vibração.

Sugeriu-se então uma alteração no projeto do sistema, trocando-se o mancal de escorregamento por um de rolamento, o que, após efetuada a substituição, deixou a vibração com níveis aceitáveis.

Tendo em vista a metodologia proposta na seção 2.4, a análise do ventilador poderia ser abordada conforme apresentado a seguir. Considerando cada procedimento de análise como um estado (de uma máquina de estados), o diagrama de transição apresentado na figura 2.7 reflete um modelo lógico para a sequência de eventos.

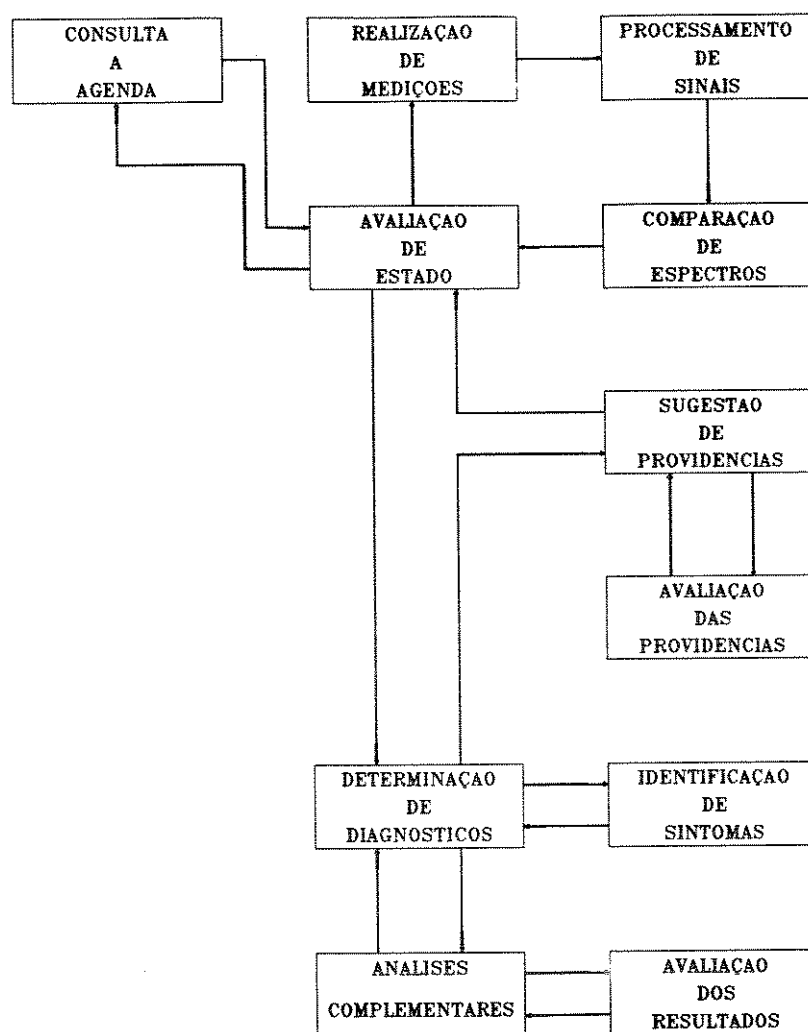


Fig. 2.7) Diagrama de estados para a análise do ventilador.

- Disparo de gatilho: o nível global da vibração atuou como gatilho, dando início ao episódio. Uma avaliação do estado da máquina é encaminhada, após uma consulta à agenda.
- Avaliação do Estado: a avaliação do estado envolveu quatro transições internas. Inicialmente, a transição para a realização de medições, realizada no ponto de maior nível de vibração, a seguir para o processamento dos sinais e a comparação de espectros com níveis de referência. Foram identificados e retornados os picos com valores anormais. Em consequência, o procedimento foi para o estado de Determinação de Diagnósticos.
- Determinação de Diagnósticos: o primeiro passo foi a transição para o estado Identificação dos Sintomas, onde os picos com valores excessivos foram identificados como as frequências fundamentais e segunda harmônica da rotação do rotor, e retornados. Em função dos sintomas, foram determinados como possíveis os diagnósticos desbalanceamento, desalinhamento e folga mecânica. Para diferenciá-los, uma análise de fase foi realizada. Em consequência, foi negado o desalinhamento, e excluído da lista de diagnósticos. O procedimento foi para o estado de Sugestão de Providências.
- Sugestão de Providências: foi sugerido a realização do balanceamento, devido ao diagnóstico correlato, e o procedimento se dirigiu para a Avaliação das Providências. Após o balanceamento, os valores globais foram novamente analisados, para avaliar a condição do gatilho inicial. Verificou-se uma diminuição porém ainda havia um alto nível de vibração. Em consequência, o procedimento retornou para nova Avaliação do Estado, para repetição de todo o ciclo.
- Avaliação do Estado: foram realizadas novas análises espectrais e comparações de valores, indicando estado ainda anormal.
- Determinação de Diagnósticos: a Identificação de Sintomas concluiu que o pico da rotação havia diminuído, porém o pico duplo da rotação tornara-se dominante. O diagnóstico assim indicou que continuava a existir uma folga mecânica, provavelmente ocasionada pelo desgaste dos mancais.
- Sugestão de Providências: sugeriu-se então que o mancal de escorregamento fosse substituído por um de rolamento, para evitar o desgaste. A avaliação dos resultados, após realizada a troca, constatou que os níveis globais de vibração retornaram ao normal.
- Encerramento do Episódio: como o nível global de vibração voltou ao normal, e não havia outros picos indicando estado anormal, o episódio foi encerrado.

2.5.2 Vibração Causada por Correia

Seguindo um programa de monitoramento periódico, medições realizadas em uma máquina diesel de 1500 RPM que acionava um gerador elétrico indicaram que os níveis globais da velocidade da vibração, obtida no mancal do ventilador de resfriamento, apresentaram os seguintes valores em mm/s, considerados excessivos [Krishnan, 87]:

Horizontal	25
Vertical	14
Axial	4

A análise espectral do sinal constatou que o pico predominante era próximo a 1500 RPM, com os demais picos com valores não significativos. Assim, o desbalanceamento do ventilador foi a hipótese considerada, uma vez que as polias do acoplamento a correia do ventilador apresentavam aparentemente o mesmo diâmetro.

No entanto, tendo sido usada uma luz estroboscópica sincronizada na frequência do eixo do motor, verificou-se que o eixo do ventilador se deslocava lentamente, o que eliminou a possibilidade de desbalanceamento, que exige a frequência de rotação. Usando-se a luz no eixo da máquina diesel, constatou-se que o seu rotor permanecia parado. Concluiu-se assim que a correia, único meio de conexão entre as duas máquinas, deveria estar conduzindo a vibração.

Através de inspeção ficou evidenciado o desalinhamento entre as polias da correia. Tendo sido corrigido o problema, os níveis de vibração tornaram-se aceitáveis.

Considerando a metodologia proposta, a análise desse caso envolveria as fases abaixo. A figura 2.8 apresenta um diagrama de transição entre estados que reflete o procedimento.

- Disparo de Gatilho: o gatilho foi o nível global da vibração obtido no mancal do ventilador, tendo sido iniciado o episódio e disparada uma avaliação do estado, após consulta à agenda.
- Avaliação do Estado: foi realizada a análise espectral de um sinal obtido no mesmo ponto do gatilho, confirmando a anormalidade.
- Determinação de Diagnóstico: foi identificado como sintoma principal um pico aparentemente na frequência de rotação do ventilador. Em consequência, o diagnóstico de desbalanceamento foi considerado. O procedimento foi dirigido para o estado de Análises Complementares, onde foi sugerido o uso da luz estroboscópica, para se confirmar o diagnóstico. O resultado foi de que o diagnóstico não foi

confirmado. Assim, foi realizada uma nova identificação de sintomas, onde a frequência do pico foi identificada como a da rotação do motor. Em consequência foi considerada a possibilidade de desalinhamento entre as polias. Foi outra vez sugerido o uso da luz estroboscópica, porém agora no motor. Foi confirmado que o desbalanceamento normal do motor estava associado à vibração detectada inicialmente. O diagnóstico de desalinhamento entre as polias da correia foi corroborado. Foi sugerido um outro método complementar, a avaliação do desalinhamento através de sua medição direta. O resultado foi a confirmação do desalinhamento.

- Sugestão de Providências: corrigir o desalinhamento entre as polias.
- Encerramento do Episódio: os níveis globais da velocidade voltaram ao normal, encerrando o episódio.

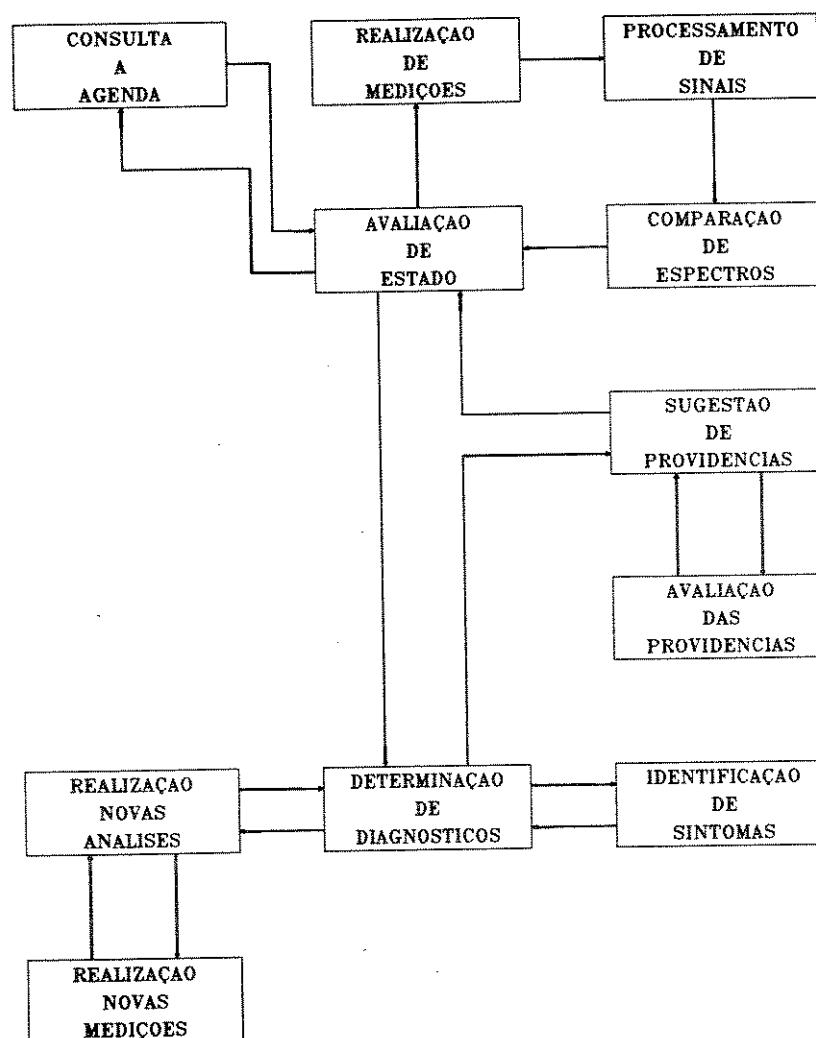


Fig. 2.8) Diagrama de estados para a análise da correia.

2.5.6 Motor Elétrico com Rotor Excêntrico

Um espectro adquirido em um motor elétrico de 3600 RPM e alimentação a 60 Hz, onde já se encontrara um nível alto da vibração global, indicou um pico de alta amplitude na frequência de 60 Hz e um pico ainda maior na frequência de 120 Hz [Taylor, 88]. O fundo de escala era de 500 Hz em um espectro de 400 linhas, portanto com uma resolução em frequência de 1,25 Hz.

Os diagnósticos possíveis eram eixo curvo, desalinhamento ou rotor excêntrico, porém a resolução em frequência não permitia distinguir entre o pico da rotação e o da frequência da linha. Aplicando-se o algoritmo zoom-TFR na faixa entre 50 e 70 Hz, obtêm-se uma resolução satisfatória. Foi possível então identificar picos em 59,5 Hz, 60 Hz, e 60,5 Hz, caracterizando assim uma frequência de deslizamento de 0,5 Hz. Aplicando-se novamente o zoom-TFR na faixa de 110 a 130 Hz, foram encontrados picos em 119,1 Hz e 120,1 Hz, com pequena amplitude para o primeiro e bem maior para o segundo.

A conclusão portanto foi de que o rotor do motor estava excêntrico, uma vez que a segunda harmônica da rotação correspondia ao pico de 119,1 Hz, de baixa amplitude, eliminando assim o desalinhamento, e também o eixo curvo porque a fundamental era de pequena amplitude. Além disso, os componentes da frequência da linha e a segunda harmônica apresentaram lobos laterais, indicativo de conotações com origem elétrica.

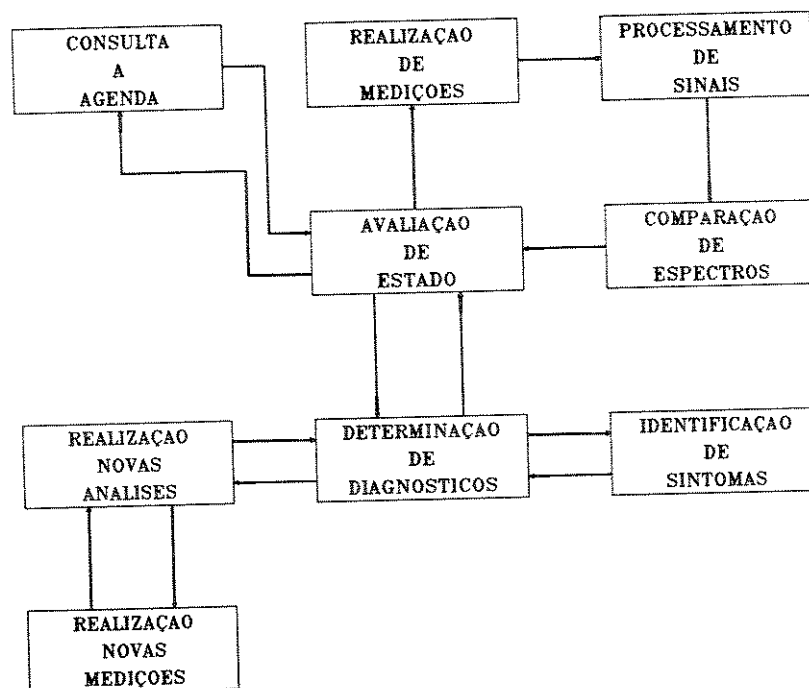


Fig. 2.9) Diagrama de estados para a análise do motor elétrico.

Considerando a metodologia proposta, o episódio pode ser assim analisado:

- Disparo de Gatilho: foi constatado um alto nível global da vibração em um motor elétrico, o que deu início ao episódio.
- Avaliação do Estado: Foi realizada medição e análise espectral no ponto com problema, tendo sido encontrados dois picos com alta amplitude, em 60 Hz e 120 Hz.
- Determinação de diagnósticos: foram identificados os sintomas como picos na frequência da rotação e sua dupla, porém os mesmos valores também correspondiam às frequências da linha de alimentação elétrica (60 Hz) e dupla da linha. Três diagnósticos eram possíveis: eixo curvo, desalinhamento ou rotor excêntrico. Para diferenciar entre os diagnósticos, foram realizadas novas análises usando o método do zoom-TFR para aumentar a resolução. Foram identificados novamente os sintomas, concluindo-se que a fundamental e a segunda harmônica da rotação eram de pequena amplitude, e que existiam picos com lobos laterais na frequência da linha e dupla da linha. Dois dos diagnósticos possíveis foram então eliminados e o terceiro reforçado, concluindo-se pela excentricidade do rotor do motor elétrico.

O autor não relata, porém devem ter sido sugeridas as providências para a correção do rotor excêntrico. O diagrama da figura 2.9 apresenta os estados envolvidos na análise apresentada.

2.5.7 Falha no Rolamento em Máquina de Papel

Seguindo-se um programa de monitoramento periódico em uma fábrica de papel, constatou-se o crescimento de picos em frequências não harmônicas da rotação, no lado oposto ao acoplamento de um motor de grande porte que acionava um dos rolos de uma máquina de papel [o'Sullivan, 90]. Verificou-se que as frequências de 61,3 Hz, 86,6 Hz e 173,2 Hz, dos picos em desenvolvimento, correspondiam às frequências típicas do rolamento onde foram obtidos os sinais, com os valores duas vezes BSF ("ball spinning frequency"), duas vezes BPFO ("ball passing frequency, outer") e quatro vezes BPFO. O gráfico da tendência do pico 2BPFO indicou que atingiria um crescimento de 20 decibéis em três dias. O mancal foi prontamente substituído, e constatou-se o desgaste na pista externa do rolamento. Após a substituição os picos retornaram ao normal.

Normalmente, esse tipo de problema não apresentaria energia suficiente para tornar o pico significativo perante o restante da vibração, exigindo uma análise de envelope para completa segurança do diagnóstico. No entanto, devido à grande massa do rolo da máquina de papel, forças muito

grandes são exercidas sobre os mancais, o que explica a ocorrência desses picos com alta energia.

Dentro da metodologia proposta, a análise desse episódio encontra-se a seguir e pode ser acompanhada pela figura 2.10.

- Disparo de Gatilho: medições rotineiras foram realizadas e constataram picos anormais.
- Avaliação do Estado: a comparação de espectros mostrou picos inesperados indicando o estado anormal. A avaliação das discrepâncias acarretou a realização de medições periódicas para acompanhar a evolução desses picos. A comparação entre espectros indicava que os picos estavam se desenvolvendo. Pela análise de tendências foi verificado que os níveis estavam crescendo muito e atingiriam o limite em três dias.
- Determinação de diagnósticos: a identificação dos sintomas mostrou coincidências dos valores das frequências dos picos com frequências do rolamento do mancal onde foram realizadas as medições. O diagnóstico indicado era que o rolamento estava apresentando problemas.

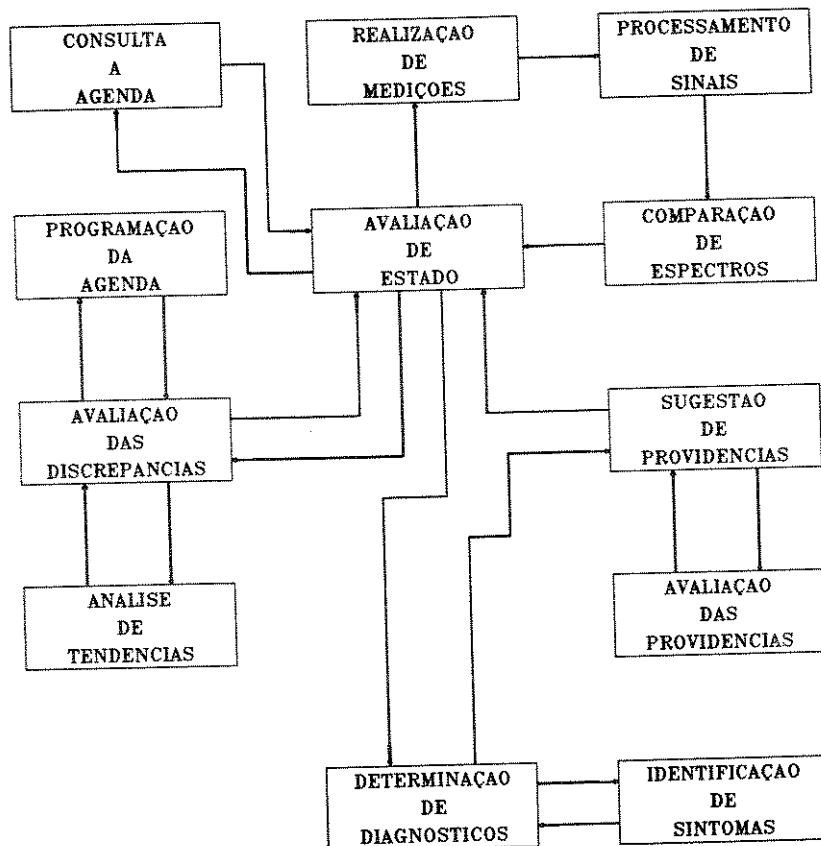


Fig.2.10) Diagrama para a análise da máquina de papel.

- Sugestão de providências: foi sugerida a parada imediata da máquina e a substituição do rolamento. Na avaliação de resultados, constatou-se através de inspeção visual um defeito na pista externa do rolamento.
- Encerramento do episódio: os níveis de vibração voltaram ao estado normal.

2.6 PROCEDIMENTO GENERALIZADO

Em função da metodologia proposta na seção 2.4 e de sua aplicação nos casos colhidos da literatura e apresentados, pode-se então atingir um procedimento generalizado que englobe todos os conceitos expostos.

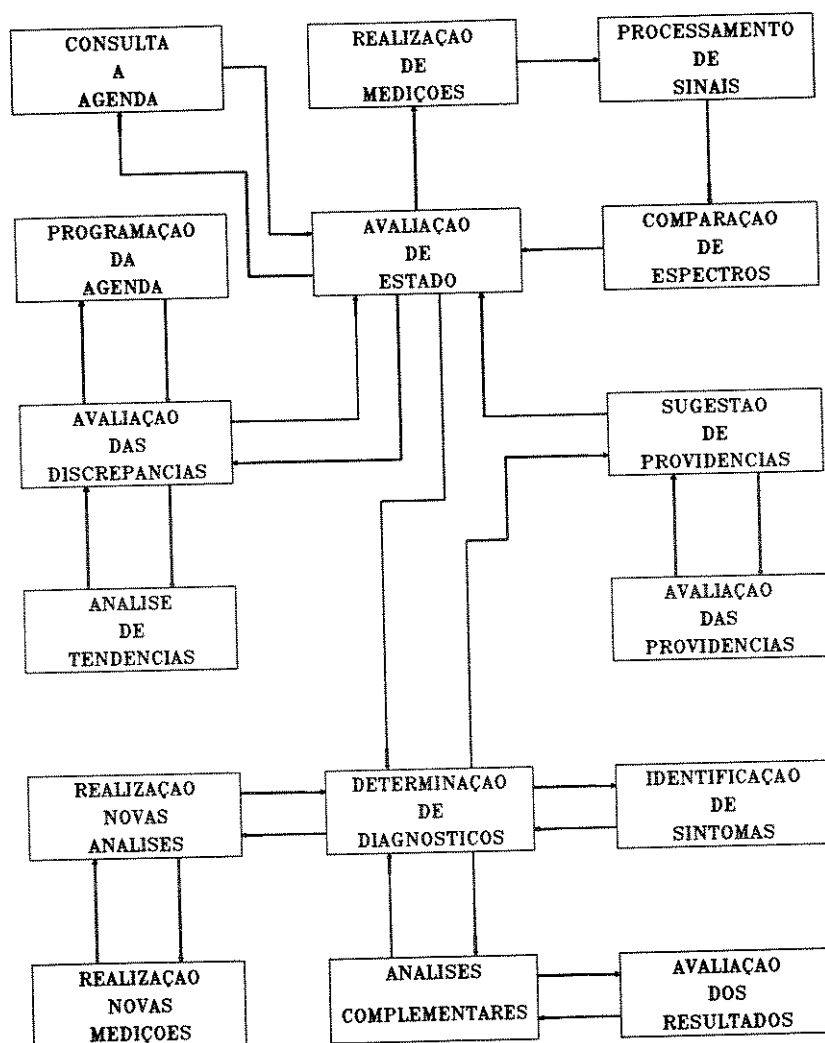


Fig. 2.11) Diagrama de estados do procedimento generalizado.

O resultado abstraído para a metodologia generalizado é o diagrama de transição de estados que consta na figura 2.11, onde qualquer um dos episódios comentados pode ser enquadrado, ressaltando-se que alguns módulos nem sempre serão usados em todas as análises. Esse diagrama portanto será adotado para a representação global das atividades de um sistema de monitoramento e diagnóstico de máquinas rotativas, através da análise de vibrações.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA PARA A DETERMINAÇÃO DE DIAGNÓSTICOS

3.1 Estrutura para o Diagnóstico

3.2 Matriz de Sintomas e Diagnósticos

3.2.1 Diagnósticos Básicos e Detalhados

3.2.2 Sintomas

3.2.2.1 Constituição Física dos Sistemas Mecânicos

3.2.2.2 Faixa de Frequência do Espectro

3.2.2.3 Plano Dominante dos Problemas

3.2.2.4 Frequência dos Picos

3.2.2.5 Análise de Fase Relativa

3.2.2.6 A Estabilidade dos Sinais

3.2.2.7 Existência de Lobos Laterais

3.2.2.8 O Formato dos Picos

3.3 Procedimento para a Determinação de Diagnósticos

3.3.1 Sequência de Análise dos Sintomas

3.3.2 Seleção dos Diagnósticos Básicos

3.3.3 Seleção dos Diagnósticos Iniciais

3.3.4 Expansão em Diagnósticos Detalhados

3.3.5 Seleção dos Diagnósticos Detalhados

3.3.6 Seleção dos Diagnósticos Possíveis

3.3.7 Análise de Diagnósticos Inadequados

3.3.8 Novas Análises e Medições

3.3.9 Análises Complementares

A metodologia adotada para o módulo de determinação de diagnósticos é apresentada nesse capítulo. É iniciado com os aspectos gerais para a arquitetura usada, e continua com a estruturação do conhecimento, envolvendo a especificação da matriz de sintomas e diagnósticos, baseada no conteúdo do conhecimento apresentado no capítulo 2. Conclui com o detalhamento da metodologia para o diagnóstico, com a apresentação de exemplos típicos das regras de produção, que representam a inferência para se atingir o diagnóstico.

3.1 ESTRUTURA PARA O DIAGNÓSTICO

Na seção 2.3 foi apresentado um levantamento básico do conhecimento necessário para a determinação de diagnósticos baseados na análise de vibrações mecânicas. Esse conhecimento será estruturado e resumido nas seções seguintes, tendo em vista sua utilização dentro da metodologia adotada para a realização dos procedimentos de diagnóstico. Na seção 2.6 foi estabelecido o procedimento generalizado e global para um sistema de monitoramento e diagnóstico como um todo, envolvendo as atividades que são normalmente executadas pelos especialistas no desempenho de suas tarefas, as quais foram resumidas em quatro blocos principais na seção 1.3:

- Consulta à Agenda;
- Avaliação de Estado;
- Determinação de diagnósticos;
- Sugestão de providências.

Dentre esses quatro blocos, o que apresenta maior complexidade é sem dúvida o de determinação de diagnósticos. Para esse módulo, uma arquitetura baseada no **processamento simbólico** das informações foi usada, garantindo a necessária flexibilidade à manutenção do conhecimento, uma vez que essa tarefa deve ser executada pelos usuários de um sistema, e não por aqueles que o desenvolveram. Ou seja, o conhecimento deve ser mantido através de uma atuação externa ao sistema, que não exija a alteração da estrutura dos programas, o que seria condição obrigatória se fosse adotado um **método procedural** para o diagnóstico. Para esclarecimento entre as diferenças entre métodos de processamento procedurais e simbólicos vejam-se as referências [Winston, 84] e [Harmon, 88].

Deve-se observar que os módulos apresentados na figura 2.11, relativos ao procedimento generalizado global, não serão traduzidos necessariamente em módulos de programação, o que ocorreria em uma programação procedural. Consistem antes em atividades que necessitam ser realizadas, mas que podem estar distribuídas ao longo de um sistema de processamento simbólico.

A metodologia que foi adotada para a determinação de diagnósticos foi baseada em decisão pessoal do autor, uma vez que existiriam diversas possibilidades arquiteturais, e que não eram conhecidas soluções completas apresentadas na literatura. As características fundamentais dessa solução, que pode ser vista como uma proposta de arquitetura para o diagnóstico através da análise de vibrações, podem ser assim resumidas:

- Utilização de processamento simbólico;
- Processamento por níveis de conhecimento;
- Conhecimento estático baseado em rede semântica;
- Utilização de uma rede de inferência.

A utilização de processamento simbólico está associada à necessidade já mencionada de flexibilidade para a manutenção do conhecimento. O processamento por níveis de conhecimento implica em um procedimento gradativo, onde os sintomas serão agrupados de acordo com alguma característica básica, sendo analisados cada grupo por vez. A utilização de níveis facilita a estruturação do conhecimento para a implantação de um sistema bem como para sua manutenção, tornando mais simples as tarefas tanto de correção como de evolução do sistema. A utilização de uma rede semântica, para a representação das informações estáticas do sistema, e de uma rede de inferência, para a implementação dos raciocínios, serão objeto dos capítulos 5 e 6, onde serão devidamente apresentadas as redes e seus elementos estruturais.

A compilação do conhecimento sob a forma de sintomas e diagnósticos será apresentado na seção 3.2. O procedimento adotado para a classificação de cada nível e o sequenciamento da análise está na seção 3.3, onde o conhecimento será apresentado sob a forma de regras de produção.

3.2 MATRIZ DE SINTOMAS E DIAGNÓSTICOS

A determinação de um diagnóstico depende basicamente de se constatar a existência dos sintomas respectivos. Assim, a matriz de sintomas e diagnósticos é uma peça fundamental que representa resumidamente o conhecimento a ser utilizado pelo sistema. O conteúdo das próximas seções, referentes à especificação das relações entre diagnósticos e sintomas, foi baseada em revisão da literatura [Wavetek, 84] [Bate, 88] [Nepomuceno, 89] [Collacott, 77], e representa uma sistematização do conhecimento que já foi apresentado no capítulo 2.

3.2.1 Diagnósticos Básicos e Detalhados

A determinação de um diagnóstico no sentido geral pode apresentar diversos níveis, desde uma classificação do problema até a especificação do ponto exato onde o problema se apresenta, como e quando foi iniciado, quais outros problemas dele decorreram e como corrigi-lo, além de outros possíveis aspectos. No entanto, para se atingir tal profundidade seria necessário o monitoramento de máquinas específicas, e a criação de uma base de conhecimento também específica das máquinas monitoradas. Não é esse o escopo do trabalho. Assim, serão criadas as ferramentas para a representação de dois tipos de diagnósticos, os básicos e os detalhados, que ainda assim são genéricos e não específicos. Essas ferramentas deverão ter no entanto a capacidade para expandir o conhecimento, permitindo introduzir outros níveis quando necessário.

Os diagnósticos básicos são aqueles mais gerais e que podem existir em qualquer tipo de sistema mecânico,

entendendo-se como sistema mecânico uma composição mínima de duas máquinas, contendo um propulsor, um propulsado e um acoplamento. Alguns diagnósticos básicos estão presentes em todas as máquinas enquanto outros dependem de sua constituição física. Os diagnósticos básicos consistem assim na lista inicial para a análise, devendo ser expandidos, em uma fase posterior, em diagnósticos mais detalhados, os quais estarão mais próximos da causa das vibrações. A tabela 3.1 apresenta a lista dos diagnósticos básicos.

Tabela 3.1) Diagnósticos Básicos

Desbalanceamentos
 Desalinhamentos
 Folgas Mecânicas
 Problemas com Mancais de Rolamento
 Problemas com Mancais de Escorregamento
 Problemas com Correias
 Problemas com Engrenagens
 Problemas de Operação
 Problemas com Máquinas Elétricas

Tabela 3.2) Diagnósticos Detalhados

Desbalanceamentos	Desalinhamentos
Desbalanceamento Estático;	Desalinhamento Paral.
Desbalanceamento Dinâmico;	Desalinhamento Angular
Eixo Curvo;	
Acoplamento Empenado;	
Folga Mecânica	Prob. Mancal Rolamento
Folga Não Rotativa;	Problema em Rolamento
Prob. Mancal Escorreg.	Prob. Engrenagens
Folga Excessiva;	Transmissão Irregular
Rozamento do Rotor;	Problema Síncrono
Turbulência no óleo;	
Problemas com Correia	Prob. de Operação
Correia Tensionada;	Lâminas com Problemas
Polia Desbalanceada;	Turbulência no Fluido
Polias Desalinhas;	
Ressonância da Correia;	
Prob. com Máquinas Elétricas	
Excentricidade Estática;	
Excentricidade Dinâmica	
Lâminas do Estator Frouxas;	
Problemas no Estator;	

Após constatada a possibilidade de algum diagnóstico básico, em função da compatibilidade dos dados com as informações existentes na descrição do sistema mecânico, os diagnósticos detalhados deverão então ser considerados. Cada diagnóstico básico possível será então expandido nos diversos tipo de diagnósticos, que são na verdade as várias formas como cada tipo de problema pode ocorrer em um sistema mecânico. Através da existência dos sintomas respectivos para cada diagnóstico detalhado, a lista inicial será então filtrada. Os diagnósticos detalhados estão apresentados na tabela 3.2.

3.2.2 Sintomas

O conceito de sintoma deve aqui ser generalizado, englobando não apenas informações específicas do problema avaliado, porém também os dados sobre o sistema mecânico e as condições de medição, o que de uma forma geral condiciona os diagnósticos possíveis.

Os sintomas que serão tratados são:

- a constituição física dos sistemas monitorados;
- a faixa de frequência do espectro;
- o plano dominante para a manifestação do problema;
- a frequência dos picos nos espectros;
- a defasagem entre sinais correlatos;
- a estabilidade dos sinais;
- a existência de lobos laterais;
- o formato dos picos.

3.2.2.1 Constituição Física dos Sistemas Mecânicos

A constituição física dos sistemas mecânicos será considerada com o objetivo de tornar mais eficiente a busca de diagnósticos. Baseado na descrição dos sistemas monitorados, o procedimento poderá incluir ou excluir análises compatíveis com os componentes mecânicos, identificando a existência de itens que possam influenciar os sinais analisados.

Na interpretação de um espectro obtido em um certo ponto de medição é possível que sejam encontradas informações referentes a outros pontos da mesma máquina ou a outra máquina do mesmo sistema. Por exemplo, se o propulsor é um motor elétrico, problemas com máquinas elétricas devem ser considerados, mesmo que se esteja analisando um ponto de medição do propulsado. Por outro lado, se o acoplamento não é por correia, problemas com correias não devem ser considerados.

A análise da constituição física deve responder assim às seguintes questões, formuladas de forma implícita ou explícita ao longo do procedimento de determinação de diagnósticos:

- se o propulsor é um motor elétrico;
- se o propulsado é um gerador elétrico;
- se o mancal é de rolamento;
- se o mancal é de escorregamento;
- se o acoplamento é por correia;
- se o acoplamento é por engrenagens;
- se o sistema possui lâminas;

3.2.2.2 Faixa de Frequência do Espectro

A relação entre a frequência de Nyquist e a curva de resposta do filtro determina, a partir da frequência de amostragem do sinal, qual a máxima frequência observável no espectro. Dessa forma, uma vez que cada tipo de diagnóstico causa vibração em frequências bem determinadas, um dado fundamental para a análise é a faixa de frequência usada para a aquisição do sinal. Considerando um dado espectro e um diagnóstico que terá um pico principal em uma certa frequência, três casos poderão acontecer:

- a frequência do pico ser superior à máxima frequência observável, não aparecendo portanto no espectro;
- a frequência do pico estar bem posicionada no espectro respectivo, perto do centro do espectro, e portanto em situação ideal;
- a frequência do pico estar mal posicionada no espectro, em suas extremidades, podendo ser visualizada porém em condições não plenamente adequadas.

No primeiro caso a análise será eliminada do procedimento, no segundo considerada e no terceiro incluída porém exigindo uma nova medição em condições ideais.

Na tabela 3.3 estão atribuídos os valores para a faixa de frequência que serão usadas nas medições. A tabela 3.4 apresenta as faixas de frequências para cada diagnóstico básico, considerando a faixa ideal para captar os picos envolvidos, e uma segunda faixa, onde os picos podem aparecer, porém deslocados da região central do espectro, considerada assim como uma faixa inadequada.

Tabela 3.3) Classificação das faixas de frequência

Sub-Harmônica;
Baixa;
Média;
Alta;

Tabela 3.4) Diagnósticos e faixas de frequência.

Diagnóstico	Faixa Ideal	Faixa Inadequada.
Desbalanceamento	Baixa	Média
Desalinhamento	Baixa	Média
Folga Mecânica	Média	Baixa
Mancal de Rolamento	Alta	-
Mancal de Escorregamento SubH		Baixa
Engrenagens	Média	Alta
Correias	Baixa	Média
Operação	Média	Alta
Máquinas Elétricas	Média	Alta

3.2.2.3 Plano Dominante dos Problemas

Alguns diagnósticos se apresentam sempre com um plano preferencial para a obtenção do espectro porque a amplitude das vibrações é maior nesse plano, independentemente da máquina em questão. Em outros casos, o plano depende do projeto da máquina. Desse modo, o plano dominante para a manifestação do problema é uma informação a ser comparada com a direção do sensor onde foi realizada a medição sob análise, ou para orientar a realização de medições específicas. A tabela 3.5 apresenta as direções possíveis para os sensores, e a tabela 3.6 as relações entre os diagnósticos e os planos dominantes respectivos. A coluna *Dependência* determina quando o plano dominante é dependente da configuração do sistema mecânico.

Tabela 3.5) Direções possíveis para os sensores.

Radial
Horizontal
Vertical
Axial

Tabela 3.6) Diagnósticos e seus planos dominantes.

Diagnóstico	Plano	Dependência
- Desbalanceamento Estático	Radial	Suporte entre mancais
- Desbalanceamento Estático	Axial	Suporte em balanço
- Desbalanceamento Dinâmico	Radial	Suporte entre mancais
- Desbalanceamento Dinâmico	Axial	Suporte em balanço
- Eixo Curvo	Axial	
- Acoplamento Empenado	Axial	
- Desalinhamento Paralelo	Radial	
- Desalinhamento Angular	Axial	
- Folga Não Rotativa	Radial	
- Problema no Rolamento	Radial	Ação radial
- Problema no Rolamento	Axial	Ação axial
- Folga Excessiva	Radial	
- Roçamento do Rotor	Radial	
- Turbulência no óleo	Radial	
- Correia Tensionada	Radial	
- Polia Desbalanceada	Radial	
- Polias Desalinhadas	Axial	
- Ressonância da Correia	Radial	
- Transmissão Irregular	Radial	Tipo dentes retos
- Transmissão Irregular	Axial	Tipo helicoidal
- Transmissão Irregular	Axial	Tipo espinha-de-peixe
- Problema Síncrono	Radial	Tipo dentes retos
- Problema Síncrono	Axial	Tipo helicoidal
- Problema Síncrono	Axial	Tipo espinha-de-peixe
- Lâminas com Problemas	Radial	
- Turbulência no Fluido	Radial	
- Excentricidade Estática	Radial	
- Excentricidade Dinâmica	Radial	
- Lâminas Estator Frouxas	Radial	
- Problemas no Estator	Radial	

3.2.2.4 Frequências dos Picos

O principal sintoma considerado para se estabelecer a possibilidade de um diagnóstico é a existência de um ou mais picos em evolução, nas frequências relacionadas com cada diagnóstico. Assim, uma classificação de todos os picos possíveis de ocorrer em um espectro qualquer, em relação à frequência, é apresentada na tabela 3.7. É conveniente ressaltar o significado do código de cada pico. Por exemplo, assegurada a existência do pico N1 para dois pontos de medição diferentes, significa que existem picos nos dois espectros correspondentes à rotação de cada ponto, mesmo com

rotações eventualmente diferentes. A tabela 3.8 apresenta a relação entre os diagnósticos detalhados e as frequências dos picos a eles associados, de acordo com o conhecimento baseado nas referências já citadas.

Tabela 3.7) Classificação dos picos quanto à frequência

Relacionadas com a rotação:

- Frequência da Rotação (N1);
- Frequência Dupla da Rotação (N2);
- Frequência Tripla da Rotação (N3);
- Frequência Múltipla da Rotação (Nn);
- Frequência de Rotação do Segundo Eixo (SN1);
- Frequência Dupla de Rotação do Segundo Eixo (SN2);
- Frequência Múltipla da Rotação do Segundo Eixo (SNn);
- Frequência Metade da Rotação (FMeR);
- Frequência um Terço da Rotação (FTeR);
- Frequência Inter-Harmônica Rotação (FINR);
- Frequência Sub-Harmônica (FSuH);

Relacionada com rolamentos:

- Frequência do Rolamento (FRol);

Relacionada com óleo:

- Frequência do Óleo (FOil);

Relacionadas com lâminas:

- Frequência da Lâmina (FLam);
- Frequência Múltipla da Lâmina (FLan);

Relacionadas com correias:

- Frequência da Correia (FCor);
- Frequência Dupla da Correia (FCo2);
- Frequência Múltipla da Correia (FCon);
- Frequência de Ressonância da Correia (FRCo);

Relacionadas com engrenagens:

- Frequência de Engrenamento (FEng);
- Frequência Dupla do Engrenamento (FEg2);
- Frequência Tripla do Engrenamento (FEg3);

Relacionada com ressonância:

- Frequência de Ressonância (FRes);

Relacionadas com causas desconhecidas:

- Frequência Aleatória (FAle);

Relacionadas com eletricidade:

- Frequência da Linha Elétrica (L1);
 - Frequência Dupla da Linha (L2);
 - Frequência de Deslizamento (FDes);
 - Frequência do Estator (FEst);
 - Frequência de Ranhura (FRan);
 - Frequência de Ranhura Deslocada (FRaD);
 - Frequência Síncrona (FSin);
-

Tabela 3.8) Diagnósticos e frequências associadas

- Desbalanceamento Estático	N1
- Desbalanceamento Dinâmico	N1
- Eixo Curvo	N1
- Acoplamento Empenado	N1 e N2
- Desalinhamento Paralelo	N2
- Desalinhamento Angular	N2
- Folga Não Rotativa	N1, N2, N3 e FIHR
- Problema em Rolamento	FROl
- Folga Excessiva	FSuH ou N1, N2, N3 e FIHR
- Roçamento do Rotor	FMeR ou FTeR ou FIHR
- Turbulência no óleo	FOil ou FRes
- Correia Tensionada	FCor ou FCo2
- Polia Desbalanceada	N1 ou SN1
- Polias Desalinhadas	N1 ou SN1
- Ressonância da Correia	FRCo
- Transmissão Irregular	FEg3 ou FEg2 ou FEng
- Problema Síncrono	N1 ou SN1 ou FEng
- Lâminas com Problemas	FLam
- Turbulência no Fluido	FAle
- Excentricidade Estática	L2 e FRan
- Excentricidade Dinâmica	N1 e FRaD
- Lâminas do Estator Frouxas	L2 e FEst
- Problemas no Estator	L2

Tabela 3.9) Relação entre diagnósticos e fases dos picos.

Diagnóstico	Dir. Radial	Dir. Axial
Desbalanceamento Estático	Fase Nula	-
Desbalanceamento Dinâmico	Fase Não Nula	-
Eixo Curvo	Fase Nula	Fase Oposta
Acoplamento Empenado	Fase Nula	Fase Oposta
Desalinhamento Paralelo	Fase Oposta	Fase Oposta
Desalinhamento Angular	Fase Nula	Fase Oposta
Polia Desbalanceada	Fase Nula	-
Polias Desalinhadas	Fase Nula	-

3.2.2.5 A Análise da Fase Relativa

Alguns diagnósticos possuem uma relação de fase claramente estabelecida [Wavetek, 84] [Bate, 88]. A tabela 3.9 apresenta as relações entre a fase de cada pico característico desses diagnósticos, entre dois sinais adquiridos simultaneamente em posições equivalentes nos dois mancais da máquina. Na direção axial, os valores apresentados correspondem à orientação dos sensores no mesmo sentido.

A ocorrência de **fase nula** corresponde a uma defasagem de zero graus; **fase oposta** corresponde à cento e oitenta graus; **fase não nula** significa qualquer valor entre zero e cento e oitenta graus.

3.2.2.6 A Estabilidade dos Sinais

A análise quanto à estabilidade dos sinais pode ser conduzida em termos da amplitude ou da energia de um pico qualquer. O objetivo é verificar se está ocorrendo alguma variação em medições diferentes. A variação da amplitude em um mesmo sinal, ou seja, a ocorrência de batimentos ou modulações, será constatada de outra forma, apresentada na seção seguinte.

A tabela 3.10 apresenta a classificação quanto à estabilidade da amplitude dos picos.

Tabela 3.10) Classificação quanto à estabilidade

Crescente;
Decrescente;
Estável;
Flutuante.

3.2.2.7 Existência de Lobos Laterais

A ocorrência dos fenômenos de modulação em amplitude ou frequência, em geral devido à proximidade entre dois picos, será detectada através da avaliação da existência de lobos laterais em torno do pico principal. As modulações são encontradas normalmente nas máquinas elétricas e nas engrenagens, e a existência dos lobos pode ser usada como forma de confirmar um possível diagnóstico. O aspecto principal a ser analisado é a diferença em frequência entre os picos. No caso de máquinas elétricas corresponde à frequência de deslizamento, e no caso de engrenagens à rotação do eixo apresentando algum problema.

Para se constatar a existência de lobos laterais, é adequado o uso do algoritmo zoom-TFR, aplicado sobre a frequência central, para atingir uma alta resolução em uma faixa pequena do espectro. Assim, espectros de referência resultantes da aplicação desse algoritmo devem ser armazenados na estrutura do ponto de medição respectivo, para comparações futuras.

3.2.2.8 O Formato dos Picos

O formato de um pico pode apresentar informações adicionais, quando ocorrem mudanças ao longo do tempo. A maior parte dos picos existe em um espectro normal como um pico único de banda estreita. Porém, deformações podem ocorrer por exemplo quando dois picos únicos e próximos se transformam em um agregado com dois picos devido ao desenvolvimento de um deles. O aparecimento de modulações também pode transformar um pico em duplo ou triplo.

Assim, a transformação do formato de um pico é um dos sintomas que deve ser acompanhado pelo sistema. Porém a caracterização final de cada pico e de suas possibilidades de transformações serão baseadas no espectro de referência respectivo, não tendo sentido buscar aqui uma generalização.

A tabela 3.11 apresenta apenas como indicação a relação entre os picos com frequências classificadas e os formatos normais esperados para esses picos. Esses formatos serão estabelecidos de fato na seleção dos espectros de referência de uma aplicação real. Posteriormente, acompanhando-se casos de alteração de formatos, regras que possam associar essas mudanças com os diagnósticos respectivos podem ser criadas. A tabela 3.12 apresenta a classificação adotada para o formato dos picos, baseada nesses valores.

Em virtude da digitalização dos sinais, um pico qualquer pode aparecer como pico chato, o que pode mascarar o valor real da sua amplitude. Desse modo, para os quatro tipos de picos acima, na verdade aglomerados de picos, poderá ocorrer a transformação de um pico qualquer em um pico chato, o que pode implicar na realização de novas medições, caso seja necessária uma avaliação mais precisa de sua amplitude.

Deve-se considerar que a metodologia apresentada deve ser capaz de extrair um conjunto de sintomas maior do que a capacidade atual de analisá-los. Ou seja, é de se esperar que, com o uso dessas ferramentas, sejam introduzidas novas formas de interpretação. O sistema deve apresentar relatórios contendo essas informações, possibilitando assim que o especialista, encarregado da manutenção do conhecimento, venha a descobrir correlações e criar novas análises.

Tabela 3.11) Relação entre picos e formatos.

Frequência	Formato
N1	Único, banda estreita
N2	Único, banda estreita
N3	Único, banda estreita
N4	Único, banda estreita
N5	Único, banda estreita
N6	Único, banda estreita
N7	Único, banda estreita
N8	Único, banda estreita
N9	Único, banda estreita
N10	Único, banda estreita
FIHR	Único, banda estreita
N1 com lobos	Duplo ou triplo, banda média
N2 com lobos	Duplo ou triplo, banda média
L1	Único, banda estreita
L2	Único, banda estreita
FRan	Único, banda estreita
FRan com lobos	Triplo ou múltiplo, banda média
FEst	Único, banda estreita
FEst com lobos	Duplo ou triplo, banda média
FRol	Múltiplo, banda larga
FSuH	Único, banda estreita
FEng	Único, banda estreita
FEgn	Único, banda estreita
FEng com lobos	Triplo ou múltiplo, banda larga
FCor	Único, banda estreita
FCo2	Único, banda estreita
FRCr	Único, banda estreita
FSuH	Único, banda estreita
FMER	Único, banda estreita
FTeR	Único, banda estreita
FOil	Único, banda estreita
FLam	Único, banda larga
FAle	Único, banda larga
FLiv	Único, banda estreita
FRes	Único, banda larga

Tabela 3.12) Classificação dos picos quanto ao formato

Quanto ao número de picos:

Único;
Duplo;
Triplo;
Múltiplo;

Quanto à sua banda base:

Banda Estreita;
Banda Média;
Banda Larga.

3.3 PROCEDIMENTO PARA A DETERMINAÇÃO DE DIAGNÓSTICOS

O procedimento global para análise de um sinal é iniciado quando um gatilho dispara a realização de uma medição de rotina para avaliar o estado do sistema monitorado. Se forem encontrados picos em estado anormal, será acionada a determinação de diagnósticos. Para tanto, há a necessidade inicialmente de se identificar os sintomas, e talvez de se realizar novas medições e análises (com métodos e pontos de medição diferentes ou não dos primeiros), e/ou análises complementares. As listas dos sintomas identificados e diagnósticos atingidos deverão ser apresentados pelo procedimento como resultado final. Rotinas de diálogos para esclarecimento dos raciocínios são interessantes para a manutenção do conhecimento, porém não essenciais ao funcionamento do sistema, e portanto não serão incluídas no escopo atual.

3.3.1 Sequência de Análise dos Sintomas

Na seção 3.2.2 foram relacionados os sintomas básicos que deverão ser considerados para se atingir um diagnóstico a partir da análise de um sinal de vibração. Esses sintomas estão abaixo agrupados na ordem em que entrarão na análise:

- a constituição física dos sistemas monitorados;
- a faixa de frequência do espectro;
- o plano dominante para a manifestação do problema;
- a frequência dos picos nos espectros;
- a realização de novas medições.
- a defasagem entre sinais correlatos;
- sintomas adicionais significativos.

O procedimento para se atingir um diagnóstico será realizado através de diversos níveis de conclusões, onde em cada nível será considerada um dos tipos de sintomas acima. O procedimento consiste assim em um processo de seleção, iniciado com uma lista de diagnósticos que serão filtrados gradativamente. Dessa forma a lista de diagnósticos vai diminuindo até atravessar a última etapa do processo, quando então será considerada a lista dos diagnósticos prováveis.

Dois dos fatores acima não eliminam a possibilidade do diagnóstico apenas porque os dados não combinam com o sintoma esperado. A faixa de frequência do espectro, como foi exposto na seção 3.2.2.2, possui para cada tipo de diagnóstico um valor ideal e um inadequado. Igualmente, a avaliação do plano dominante para a manifestação do problema, comparado com a direção do sensor onde foi adquirido o sinal, também gera dois tipos de diagnósticos.

Os seguintes conceitos serão usados: **MétodoCorrente** é o método usado para a análise; **PontoCorrente** é o ponto de medição onde foi realizada a medição; **MancalCorrente** é o mancal onde fica o ponto corrente; **MáquinaCorrente** é aquela que contém o ponto corrente; **SistemaCorrente** é o sistema mecânico que inclui a máquina corrente.

3.3.2 Seleção dos Diagnósticos Básicos

De início, serão considerados todos os diagnósticos básicos, chamados de **DiagBásicos**, os quais serão avaliados em vista da constituição física do sistema corrente. O objetivo é considerar apenas os diagnósticos básicos que possam de fato ocorrer em vista do sistema sob análise. Os diagnósticos resultantes da seleção pela constituição física serão chamados de **DiagIniciais**. A figura 3.1 apresenta um esquema simbólico da seleção.

Apresenta-se a seguir alguns exemplos de regras para a seleção dos diagnósticos básicos, cujo conteúdo é bastante claro e está baseado nas tabelas apresentadas na seção 3.2.

RPC1.1

Se o DiagBasico é ProbCorreia

e o Acoplamento do SistemaCorrente é por Correia

então ProbCorreia é um DiagInicial

Em geral há necessidade de se responder a questões específicas levantadas pela regra. No caso exemplificado faz-se necessária uma rotina de consulta à descrição do sistema mecânico para determinar se o acoplamento do sistema corrente é por correia. As rotinas externas ao processamento das regras, e que devem ser executadas para responder a questões por elas formuladas, são conhecidas pelo nome genérico de "**fontes de conhecimento**" [Liu, 85].

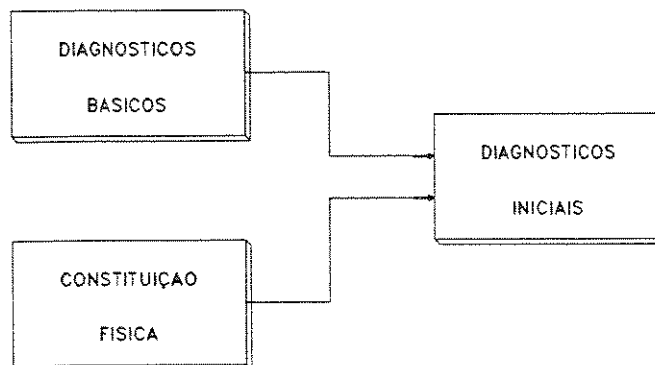


Fig. 3.1) Seleção dos Diagnósticos Básicos.

As regras RP01.1 e RP01.2 apresentadas abaixo são exemplos equivalentes, porém nesse caso levantando a possibilidade de um mesmo diagnóstico a partir de configurações de máquinas diferentes.

RP01.1:

se o DiagBásico é ProblemasOperação
e a MáquinaCorrente é uma Turbina ou
o Propulsor do SistemaCorrente é uma Turbina
então ProblemasOperação é um DiagInicial

RP01.2:

se o DiagBásico é ProblemasOperação
e a MáquinaCorrente é um Ventilador ou
o Propulsado do SistemaCorrente é um Ventilador
então ProblemasOperação é um DiagInicial

Diagnósticos básicos como Desbalanceamento, que são independentes da constituição física, existindo portanto em todas as máquinas, terão regras simples que apenas os transformam em um diagnóstico inicial, mantendo a coerência da rede de conhecimento criada. É o caso da regra RDB1.1.

RDB1.1:

se o DiagBásico é Desbalanceamento
então Desbalanceamento é um DiagInicial

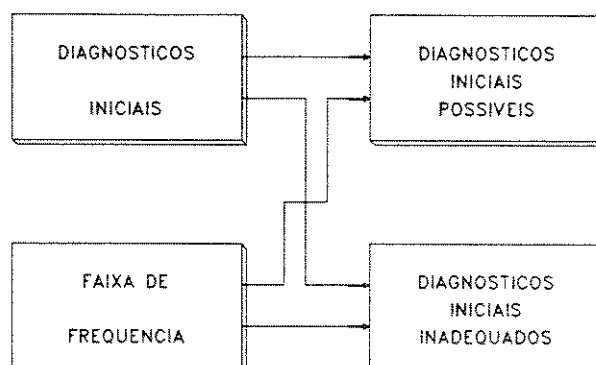


Fig. 3.2) Seleção dos Diagnósticos Iniciais.

3.3.3 Seleção dos Diagnósticos Iniciais

A seguir os **DiagIniciais** são selecionados em função da faixa de frequência do sinal adquirido. Novamente, o objetivo é centrar a análise apenas nas possibilidades reais. As informações processadas são portanto a lista dos diagnósticos iniciais e a faixa de frequência do sinal. Além dos diagnósticos eliminados da lista por incompatibilidade total, dois conjuntos resultam dessa etapa, os **DiagIPossíveis**, e os **DiagIInadequados**. A figura 3.2 apresenta um esquema dessa seleção.

Duas regras típicas estão listadas a seguir, exemplificando a seleção de um diagnóstico como possível e inadequado.

RDB2.1

Se o **DiagInicial** é Desbalanceamento
e a **FaixaFrequencia** do MétodoCorrente é Baixa
então Desbalanceamento é um **DiagIPossível**

RPC2.2

Se o **DiagInicial** é ProbCorreia
e a **FaixaFrequencia** do MétodoCorrente é Média
então ProbCorreia é um **DiagIInadequado**

3.3.4 Expansão em Diagnósticos Detalhados

Os diagnósticos iniciais, tanto os possíveis quanto os inadequados, são agora expandidos em diagnósticos detalhados (**DiagDPossíveis** e **DiagDInadequados**), os quais serão em sequência filtrados contra as informações referentes ao espectro em questão. A expansão se dá de forma incondicional, conforme pode ser visto na figura 3.3. Uma regra típica encontra-se a seguir.

RDB3.1

Se o DiagIPossível é Desbalanceamento
então DesbEstático é um DiagDPossível
e DesbDinâmico é um DiagDPossível
e EixoCurvo é um DiagDPossível
e AcoplamentoEmpenado é um DiagDPossível

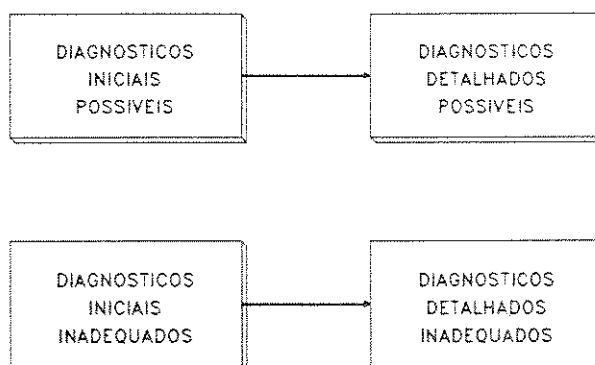


Fig.3.3) Expansão dos Diagnósticos Detalhados.

3.3.5 Seleção dos Diagnósticos Detalhados

A seguir será considerada a direção do sensor, que mais uma vez separa os diagnósticos em dois, em adequados e inadequados. Assim quatro conjuntos de diagnósticos são atingidos nesse ponto:

- os possíveis adequados (**DiagPossíveis**);
- os possíveis mas inadequados devido à direção do sensor (**DiagIDS**);

- os possíveis mas inadequados devido à faixa de frequência (DiagIFF);
- os possíveis mas inadequados devido à faixa de frequência e à direção do sensor (DiagIFFDS).

A figura 3.4 apresenta o esquema para a seleção dos diagnósticos detalhados. Duas regras típicas estão apresentadas abaixo:

RDB4.1

Se o DiagDPossível é DesbEstático
e a Direção do PontoCorrente é Radial
e o Suporte da MáquinaCorrente é EntreMancais
então DesbEstático é um DiagPossível

RPC4.13

Se o DiagDInadequado é CorreiaTensionada
e a Direção do PontoCorrente é Axial
então CorreiaTensionada é um DiagIFFDS

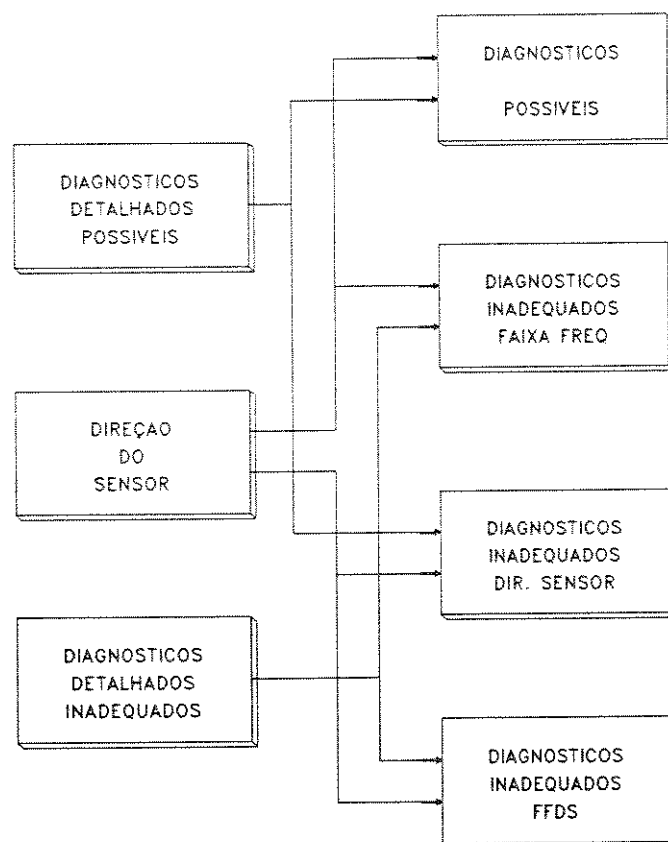


Fig. 3.4) Seleção dos Diagnósticos Detalhados.

3.3.6 Seleção dos Diagnósticos Detalhados Possíveis

As frequências dos picos em alarme vão por sua vez determinar entre os quatro conjuntos de diagnósticos detalhados possíveis, quais os diagnósticos prováveis, tanto para os adequados como os inadequados. Mantém-se os quatro tipos de diagnósticos, com a existência de picos na frequência característica de cada tipo de diagnóstico transformando diagnósticos possíveis em diagnósticos prováveis. Aqueles que forem classificados, após essa etapa, como adequados e prováveis serão considerados prioritariamente. Os inadequados porém prováveis deverão propiciar a realização de novas medições. Os diagnósticos serão chamados: DiagProvável, DPIFF, DPIDS e DPIFFDS.

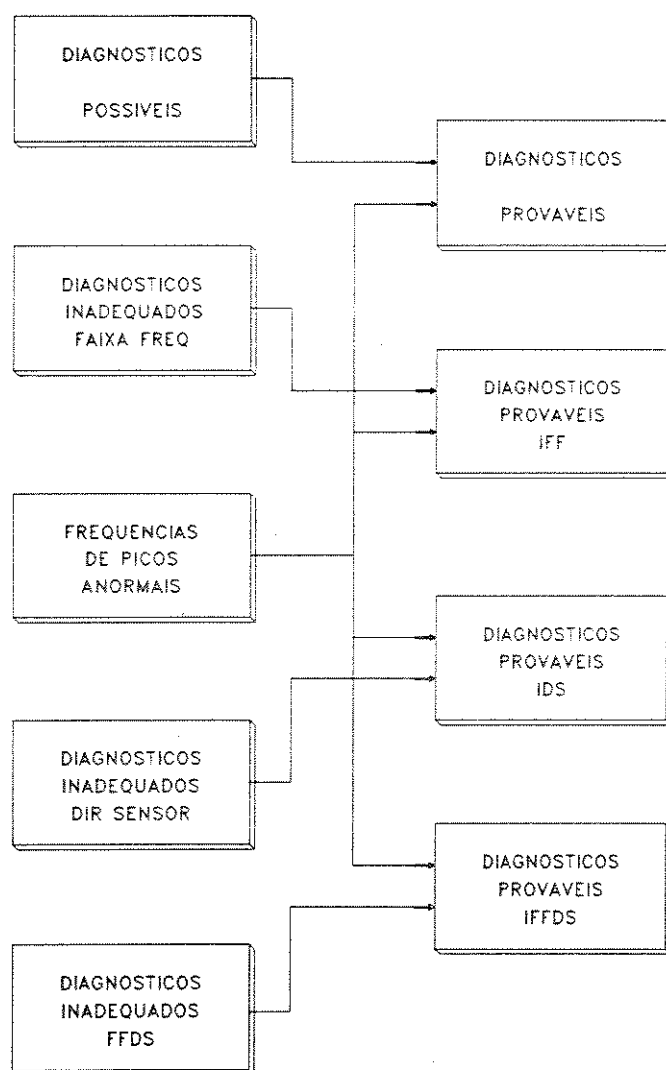


Fig. 3.5) Seleção de Diagnósticos Possíveis Detalhados.

A figura 3.5 apresenta o esquema da seleção dos diagnósticos possíveis. Abaixo estão duas regras típicas.

RDB5.1

Se o DiagPossível é DesbEstático
e o Estado do Pico N1 é Anormal
então DesbEstático é um DiagProvável

RPC5.5

Se o DiagIDS é CorreiaTensionada
e o Estado de FCo2 é Anormal ou
o Estado de FCor é Anormal ou
o Estado de FCon é Anormal
então CorreiaTensionada é um DPIDS

3.3.7 Análise de Diagnósticos Prováveis Inadequados

Tendo sido caracterizados assim todos os diagnósticos adequados e prováveis de explicarem os sintomas detectados, serão realizadas novas medições, para avaliar os diagnósticos prováveis porém inadequados. Inicialmente serão consideradas as listas de inadequados devido à faixa de frequência, com medições portanto na mesma posição e direção, porém agora na faixa ideal para cada diagnóstico. Cada medição sofrerá uma análise específica, gerando uma lista de sintomas, onde serão investigados os sintomas característicos do diagnóstico em questão. Ou seja, a análise leva em conta de forma implícita que o diagnóstico já foi analisado e considerado provável. O resultado é a eventual classificação do diagnóstico como provável e adequado.

Em seguida serão realizadas as medições ainda na mesma posição e na mesma faixa de frequência da primeira medição, porém em direções diferentes, considerando os diagnósticos inadequados devido à direção do sensor. Após isso, serão realizadas medições na mesma posição, em direções diferentes e faixas de frequência diferentes, considerando a última lista de diagnósticos prováveis. Tendo sido realizadas todas as medições possíveis na mesma posição, serão cruzadas as diversas listas de diagnósticos prováveis e adequados, para gerar uma lista final.

A figura 3.6 apresenta um esquema da análise dos diagnósticos inadequados. A seguir estão dois exemplos de regras típicas.

RDB6.1

Se o DPIFF é DesbEstático
e Análise Baixa foi Realizada
e o Estado do Pico N1 é Anormal
então DesbEstático é um DiagProvável

RPC6.1

Se o DPIFF é CorreiaTensionada
e Análise Baixa foi Realizada
e o Estado de FCo2 é Anormal ou
o Estado de FCor é Anormal ou
o Estado de FCon é Anormal
então CorreiaTensionada é um DiagProvável

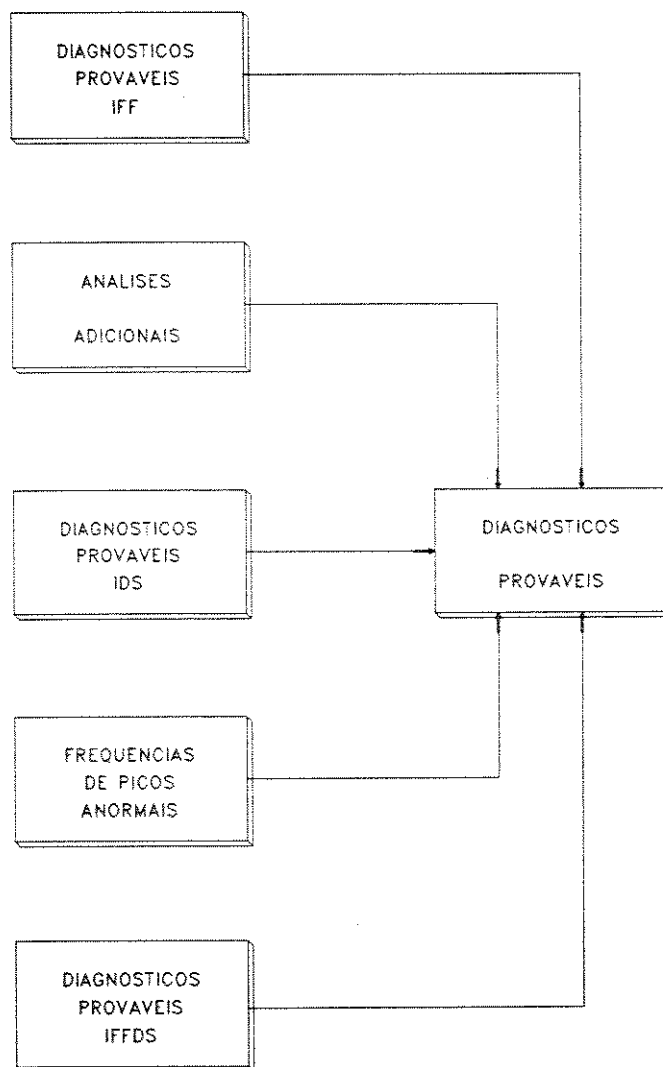


Fig. 3.6) Esquema para análise dos diagnósticos inadequados.

3.3.8 Novas Análises e Medições

Para confirmar a possibilidade de um diagnóstico deverão ser realizadas novas análises e possivelmente novas medições. Em alguns casos, a existência de sintomas ainda não analisados no próprio espectro original pode confirmar o diagnóstico, sem necessidade de novas medições. Em outros, serão necessárias medições tendo em vista análises específicas para atingir o resultado esperado de confirmar ou eliminar um certo diagnóstico.

Serão então realizadas análises de fase, caso entre os diagnósticos prováveis estejam os diagnósticos constantes da tabela 3.9, passíveis de serem confirmados ou negados através dessa análise. A figura 3.7 apresenta a seleção de diagnósticos prováveis. Duas regras típicas estão apresentadas a seguir.

RDB7.1

Se o DiagProvável é DesbEstático

e Análise FaseRadial foi Realizada

e a DFaseRadial é Nula

então DesbEstático é um DiagMProvável

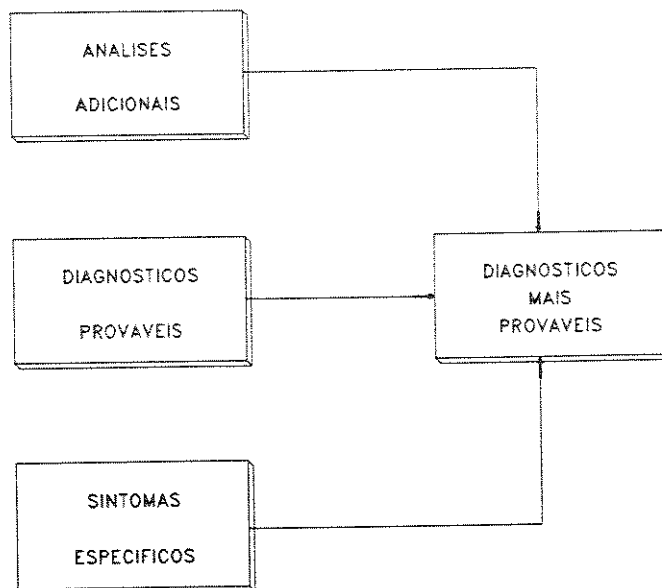


Fig. 3.7) Seleção dos diagnósticos prováveis.

RFM7.1

Se o DiagProvável é FolgaNRotativa
 e o Estado de FIHR é Anormal
 e o Estado de N4 é Anormal ou
 o Estado de N5 é Anormal ou
 o Estado de N6 é Anormal ou
 o Estado de N7 é Anormal ou
 o Estado de N8 é Anormal ou
 o Estado de N9 é Anormal ou
 o Estado de N10 é Anormal
 então FolgaNRotativa é um DiagMProvável

Após a análise de fase, serão realizadas medições em posições diferentes, com o objetivo de reforçar as evidências em relação aos diagnósticos da lista final. Serão usadas regras específicas para a programação de medições, baseadas na expectativa de que se um dado diagnóstico está correto, outras observações são esperadas em pontos correlatos. Caso obtenha-se o resultado esperado o diagnóstico será confirmado. Caso contrário, ele não será negado, porém o operador será informado sobre as conclusões.

3.3.9 Análises Complementares

Nesse ponto terá sido esgotada a capacidade de análise utilizando-se apenas as medições que possam ser realizadas diretamente pelo sistema. Serão pesquisados a seguir os métodos de inspeção complementares, que exijam a atuação de uma equipe para a sua realização, com o objetivo de confirmar a possibilidade de um dos diagnósticos selecionados ou de excluí-lo da lista. O operador seleciona entre os métodos possíveis aquele que será aplicado, podendo repetir a seleção para outros métodos após o primeiro.

Após a realização da inspeção, os seus resultados são comunicados ao sistema e considerados para atingir assim a lista final de diagnósticos, em ordem de prioridade.

A lista final dos diagnósticos encerra o procedimento de determinação de diagnósticos.

CAPÍTULO 4

RECONHECIMENTO GRAMATICAL DOS ESPECTROS

- 4.1 Procedimento Básico para a Análise dos Espectros**
 - 4.2 Análise para a Identificação dos Sintomas**
 - 4.3 Reconhecimento de Padrões Gramatical**
 - 4.4 Gramática para o Reconhecimento dos Picos**
 - 4.4.1 Definição dos Tipos de Picos**
 - 4.4.2 Definição dos Aglomerados**
 - 4.4.3 Segmentação do Espectro**
 - 4.4.4 Geração da Sentença Inicial**
 - 4.4.5 Gramática de Picos Desenvolvida**
 - 4.5 Gramática de Árvores Desenvolvida**
 - 4.6 Autômato para o Reconhecimento dos Picos**
 - 4.6.1 Classificação dos Vértices**
 - 4.6.2 Autômato Implementado**
-

Nesse capítulo será apresentado o método estrutural de reconhecimento de padrões utilizado para identificar e caracterizar os picos existentes nos espectros. Será inicialmente apresentado o procedimento para a análise dos espectros, o qual será automatizado pelo método desenvolvido. A seguir serão apresentados os conceitos básicos do reconhecimento de padrões gramatical e explicadas a gramática desenvolvida para o reconhecimento de aglomerados de picos e a gramática de árvores para criar uma representação interna do espectro. Em sequência, serão apresentadas as máquinas de estado respectivas usadas para a implementação do método.

4.1 PROCEDIMENTO BÁSICO PARA A ANÁLISE DOS ESPECTROS

Ao se iniciar um programa de monitoramento, faz-se necessário um período de estudo das máquinas envolvidas para a avaliação dos diversos espectros que deverão representar adequadamente o seu estado de normalidade. Serão selecionados através desse estudo os pontos de medição para cada máquina, os parâmetros e a periodicidade para a aquisição de dados, e os espectros de referência respectivos.

Uma vez estabelecidos esses espectros padrões a serem adotados como referência, os valores dos parâmetros devem ser cadastrados e utilizados para cada medição a ser realizada futuramente. Os espectros então obtidos podem ser comparados com os padrões e as suas discrepâncias avaliadas, através do método de análise.

Não existem critérios que possam ser usados baseados em valores absolutos, uma vez que o comportamento de cada máquina pode ser considerado único. Assim, a alternativa consiste na análise relativa, comparando-se a variação em cada medição em relação aos valores de referência. Na medida em que o conhecimento do comportamento da máquina evolui, em consequência do uso do sistema de monitoramento, os critérios iniciais podem ser gradativamente refinados.

No entanto, a comparação entre espectros executada como um procedimento simples sobre o valor de cada ponto do vetor no domínio da frequência não conduz a bons resultados, por possibilitar o disparo de alarmes inexistentes. Variações na operação das máquinas acarretam variações nos espectros, sem contudo significar qualquer anomalia. Em geral existirão diversas máquinas operando em conjunto, ou na mesma região, transmitindo vibrações através das conexões e estruturas de suporte, e com isso introduzindo também variações nos espectros. Diversas outras causas podem ser citadas para justificar pequenas variações nos espectros, sem significar problemas mecânicos.

Para solucionar esse problema, alguns métodos de comparação entre espectros têm sido usados [Frarey, 84] [Randall, 87]:

- listagem antecipada dos picos significativos esperados para cada espectro, comparando-se assim os valores respectivos;
- a criação de máscaras sobre os espectros de referência, acrescentando-se uma faixa de tolerância tanto na frequência como na amplitude;
- a criação de um certo número de faixas de frequências básicas que contenham picos significativos para cada espectro, comparando-se os valores máximos respectivos com os valores de referência.

No entanto, esses métodos não satisfazem às necessidades da automação da interpretação dos sinais, por não se aplicarem a muitos casos de variação dos espectros. Para solucionar o problema de automatizar a análise dos espectros faz-se necessário o desenvolvimento de um método de reconhecimento de padrões que permita ao computador simular o comportamento da análise visual do ser humano, identificando quantitativa e qualitativamente os picos significativos e criando uma descrição do espectro. Adicionalmente, o algoritmo baseado nesse método deve ser computacionalmente eficiente, para permitir a sua utilização em um grande número de sinais, e fazer frente a situações de emergência.

4.2 ANÁLISE PARA A IDENTIFICAÇÃO DE SINTOMAS

A comparação entre espectros faz parte da avaliação do estado da máquina. No entanto, a identificação dos sintomas, necessária à determinação de diagnósticos, faz uso também da descrição interna criada pelo método de reconhecimento de padrões para cada espectro. Após o cálculo do espectro faz-se necessária a identificação de seus picos significativos. Através da comparação desses picos com os padrões do espectro de referência será constatada a existência eventual de alguma discrepância. Avaliadas as discrepâncias, pode ser acionada a determinação de diagnósticos exigindo a identificação dos sintomas detectados no espectro, baseados nas discrepâncias levantadas.

O método de reconhecimento de padrões desenvolvido está voltado assim para a qualificação e quantificação dos picos identificados, os quais representam a informação decisiva para decidir pela possibilidade de um diagnóstico. Podem ser estabelecidas duas finalidades básicas para a análise realizada sobre os espectros:

- determinação das características relevantes dos picos;
- avaliação do comportamento dos picos ao longo do tempo.

Os sintomas a serem extraídos dos espectros em decorrência da descrição gerada pelo reconhecimento de padrões, devem ser compatíveis com o método para a inferência de diagnósticos. Assim a qualificação dos picos é função dos métodos usados para relacionar os picos e os problemas mecânicos, conforme apresentado no capítulo 3, onde foram estabelecidas as características que devem ser procuradas nos picos dos espectros. Essencialmente, os seguintes aspectos relativos aos picos são importantes:

- amplitude;
- frequência;
- formato;
- banda base;

Para a caracterização de cada pico é necessário assim a determinação desses valores. Para tanto foi desenvolvido um método gramatical de reconhecimento de padrões, que tem por objetivo a identificação dos picos significativos existentes em um espectro, e sua classificação de acordo com o formato. A partir da lista dos picos identificados é gerada uma tabela associada a cada pico contendo informações complementares. Foi desenvolvida ainda uma segunda gramática, para a representação do espectro sob a forma de árvore, onde as informações estarão incluídas sob forma simbólica resumida, garantindo comparações entre espectros de grande eficiência.

O método de reconhecimento de padrões identifica as amplitudes e frequências de todos os picos significativos, e os seus formatos. A variação ao longo do tempo pode ser avaliada a partir da análise de informações similares anteriormente armazenadas. A banda base pode ser extraída dos pontos limítrofes associados aos picos.

4.3 RECONHECIMENTO DE PADRÕES GRAMATICAL

Métodos estruturais de reconhecimento de padrões foram desenvolvidos de forma complementar aos métodos estatísticos tradicionais, em geral mais conhecidos. Dado o caráter interdisciplinar do trabalho aqui apresentado, uma abordagem muito sucinta sobre métodos estruturais de reconhecimento de padrões será vista a seguir. Para um estudo mais detalhado dos conceitos podem ser consultadas as referências [Fu, 78], [Fu, 74] ou [Gonzalez, 78].

Os métodos estatísticos possuem como característica básica a avaliação de parâmetros associados aos objetos analisados para, em função dos valores encontrados para esses parâmetros, selecionarem uma entre diversas classes possíveis para o objeto em questão. Tendo sido escolhida a sua classe, o objeto herda dela as suas propriedades características, as quais serão comuns a todos os indivíduos da classe.

Os métodos estruturais são necessários para a identificação de propriedades dos objetos que são únicas para cada indivíduo de uma classe. Assim, o reconhecimento de impressões digitais ou de caracteres manuscritos, por exemplo, necessitam da avaliação da estrutura de formação de cada objeto analisado, criando dessa forma uma descrição em termos da estrutura que o individualiza. Para tanto, procura-se encontrar em uma determinada classe de objetos um conjunto de padrões mais simples que possam ser combinados para formar um exemplar dessa classe, o qual passará a ser identificado como uma sequência específica desses padrões primitivos. Para possibilitar uma abordagem matemática desses conceitos, constatou-se que a área da Linguística que trata da formalização das linguagens permitia sua aplicação imediata, surgindo assim a denominação do reconhecimento de padrões gramatical ou sintático [Mantas, 87].

Os métodos gramaticais desenvolvidos a partir do estudo das linguagens naturais foram assim estendidos para diversas aplicações. Os conceitos básicos serão apresentados a seguir. Uma **linguagem** (estruturada por frases) consiste em todas as sentenças que podem ser geradas com base em um conjunto de **regras de produção**, um **vocabulário** e um **símbolo inicial**. O vocabulário é sub-dividido em dois: o conjunto dos **símbolos terminais** (ou primitivos) e o conjunto dos **símbolos não-terminais**. Uma **gramática** é uma tupla formada por esses quatro conjuntos. Assim, diz-se que uma linguagem é gerada por uma gramática. Nas linguagens naturais os símbolos terminais correspondem às palavras, os símbolos não-terminais aos elementos sintáticos (sujeito, predicado, objetos, etc.), as regras de produção são as regras sintáticas que permitem a formação de frases e o símbolo inicial é um elemento formal apenas para dar partida ao processo de se produzir uma frase. Uma frase qualquer é formada para se exprimir uma idéia, ou seja, para transmitir um conteúdo semântico, o qual deve existir a priori e será usado para orientar o uso das regras de produção para formar a frase.

Tendo sido definida uma gramática, ela pode ser usada em dois sentidos:

- para gerar sentenças da linguagem;
- para decidir se uma dada sentença é legal.

Para gerar uma sentença em uma linguagem definida por uma gramática, há necessidade portanto do conteúdo semântico da sentença procurada. No caso de uma gramática para o reconhecimento de impressões digitais por exemplo, dada uma certa impressão, deve-se criar uma frase que corresponda à sua descrição estrutural, formada pelos elementos primitivos que compõem uma impressão digital. O processo parte do símbolo inicial, o qual será sucessivamente transformado pela aplicação das regras de produção, selecionadas de acordo com o conteúdo semântico que se deseja exprimir. As regras de produção são aplicadas substituindo gradativamente símbolos não-terminais do vocabulário por outros símbolos, até que existam apenas símbolos do vocabulário terminal, quando então a sentença terá sido formada e o processo pára.

Para se decidir se uma dada sentença, formada com símbolos do vocabulário não-terminal, é legal, ou seja, pertence à linguagem gerada por uma certa gramática, o procedimento é inverso. Ou seja, parte-se de uma sentença formada pelos símbolos terminais da gramática, procurando-se atingir o símbolo inicial pela substituição gradativa de símbolos terminais por outros, de acordo com as regras da gramática. Ao se atingir o símbolo inicial terá sido comprovado que a sentença inicial era legal e ao mesmo tempo extraído o conteúdo semântico da sentença. Para tanto, faz-se uso de um **autômato**, o qual é derivado da própria gramática. Um autômato (de estados finitos) determinístico é uma tupla

definida por cinco elementos: um conjunto finito de símbolos de entrada, um conjunto finito de estados, um mapeamento que explicita transições entre os estados a partir de símbolos de entrada, um estado inicial e um sub-conjunto dos estados que constituem os estados finais. Diz-se que um autômato aceita uma sentença quando, a partir do estado inicial, seguindo-se todas as transições de estados em função do processamento sequencial de cada símbolo da sentença inicial, atinge-se um dos estados finais simultaneamente com o final da sentença. Uma sentença aceita significa que pertence à gramática que gerou o autômato.

Existem diversos níveis de complexidade para as gramáticas. A mais simples é a gramática de **estados finitos**, e portanto a que deve ser procurada preferencialmente. A seguinte na escala de complexidade é a gramática **livre de contexto**, cuja característica básica é que as regras podem ser aplicadas de forma independente dos demais símbolos que componham a sentença. A gramática seguinte é a **dependente do contexto** e finalmente a gramática **irrestrita**. Essas duas últimas são bastante complexas para serem usadas com eficiência, devendo-se portanto evitá-las.

Devido à vastidão do tema, essa revisão não será mais alongada, uma vez que os conceitos básicos já foram apresentados. Para complementá-los, deve-se procurar as referências citadas.

4.4 GRAMÁTICA PARA O RECONHECIMENTO DOS PICOS

Métodos estruturais baseados em gramáticas para o reconhecimento de padrões em formas de onda têm sido balizados por um trabalho pioneiro na área bio-médica [Horowitz, 77], existindo várias publicações aplicadas ao reconhecimento de eletrocardiogramas [Udupa, 80] [Papakonstatinou, 84] [Skordalakis, 86]. A diferença principal para o reconhecimento de espectros de vibrações mecânicas está no tipo de ocorrências procuradas, que, no caso de espectros de vibrações, são muito diversificadas, porém com picos sempre positivos, uma vez que são usados os módulos da amplitude dos vetores complexos no domínio da frequência.

O método de Horowitz para o reconhecimento de eletrocardiogramas consiste em um pré-processamento para substituir um sinal adquirido por diversos segmentos de reta, através de um método de aproximação linear por partes. A seguir é gerada a sentença inicial pela classificação da inclinação de cada segmento de reta, usando-se três caracteres como conjunto dos símbolos terminais:

- o símbolo "/" para inclinações positivas;
- o símbolo "\" para inclinações negativas;
- e o símbolo "0" para inclinações nulas.

No processo de classificação, um nível de tolerância é usado para determinar a inclinação nula. Horowitz apresentou a definição matemática de um pico, através dos pontos limites à esquerda e à direita e do seu valor máximo, definição essa que foi adotada pelos trabalhos posteriores. Um conjunto de regras de produção baseadas na definição é usado para determinar o autômato respectivo. Após gerada a sentença inicial, essa é submetida ao autômato, o qual possui rotinas semânticas associadas a transições que impliquem no reconhecimento de um pico ou de um vale. Essas rotinas têm basicamente a função de estabelecer os valores limítrofes para os picos reconhecidos. O trabalho de Horowitz, bem como outras aplicações de reconhecimento gramatical podem ser encontrados na referência [Fu, 77].

O método desenvolvido para o reconhecimento dos picos é semelhante ao de Horowitz, porém utiliza um maior número de símbolos terminais, o que também ocorre nos trabalhos de Udupa e Papakonstantinou referenciados. Além disso, o objetivo é o reconhecimento de aglomerados de picos, e, em um segundo passo, a geração de uma sentença através de uma gramática de árvores para o espectro como um todo. O uso de um autômato com uma gramática interligados não foi encontrado em qualquer trabalho conhecido pelo autor.

4.4.1 Definição dos Tipos de Picos

Utilizando a definição de Horowitz, um espectro será considerado um vetor no domínio da frequência formado por pontos (x^i, y^i) , onde $i = 1..N(1)$, onde o x representa uma variável que assume valores no eixo das frequências e y o valor da amplitude, podendo ser aceleração, velocidade ou deslocamento. Um pico será caracterizado por três pontos $((x^l, y^l), (x^m, y^m), (x^r, y^r))$, onde $x^l < x^m < x^r$, respectivamente os limites à esquerda, o valor máximo do pico e o limite à direita. Um pico positivo deve satisfazer simultaneamente às seguintes expressões:

```
Para todo i !  $x_l \leq x_i \leq x_r$  ( $y_m \geq y_i$ )
Para todo i !  $x_l \leq x_i \leq x_m$  ( $y_i \leq y_{i+1}$ )
Para todo i !  $x_m \leq x_i \leq x_r$  ( $y_i \geq y_{i+1}$ )
Existe i !  $x_i = x_l$  ( $y_{i-1} \geq y_l$ )
Existe i !  $x_i = x_r$  ( $y_r \leq y_{i+1}$ )
Existe i !  $x_i = x_l$  ( $y_l < y_{i+1}$ )
Existe i !  $x_i = x_r$  ( $y_r > y_{i-1}$ )
```

A existência de picos chatos, com mais de um ponto em sequência com o mesmo valor de amplitude para o máximo, implica na inclusão da seguinte expressão:

```
Existe i, j !  $x_i \neq x_j, y_i = y_j = y_m$ 
 $((y_{i-1} < y_i) \wedge (y_j > y_{j+1}) \wedge (x_m = (x_i + x_j)/2))$ 
```

Em contraposição, a definição de um pico agudo consiste em satisfazer simultaneamente as seguintes expressões:

Para todo i ! $x_l \leq x_i < x_m$ ($y_i < y_m$)
 Para todo i ! $x_m < x_i \leq x_r$ ($y_i < y_m$)

4.4.2 Definição dos Aglomerados

Tendo em vista a natureza dos espectros de vibrações mecânicas, onde costumam ocorrer diversos picos associados, optou-se axiomáticamente pelo reconhecimento de aglomerados de picos, formados por um, dois, três ou mais picos, que possuam uma banda base comum. Eventualmente, e em função de resultados futuros, a gramática pode ser alterada para incluir outros tipos de aglomerados.

Um aglomerado será assim limitado pelos pontos x^e e x^d do eixo das frequências, tal que as seguintes relações sejam simultaneamente satisfeitas:

$y(x^e) = y(x^d) = 0$
 Para todo i ! $x^e \leq x_i \leq x^d$,
 $y(x_i) = 0$ ($y(x_{i+1}) \neq 0$)

Os aglomerados serão classificados como quatro tipos:

- Único (U), onde existe um pico isolado;
- Duplo (D), onde existem dois picos;
- Triplo (T), onde existem três picos;
- Múltiplos (M), onde existem mais de três picos.

O procedimento global consiste na avaliação de uma sentença inicial gerada a partir de cada espectro analisado, buscando-se encontrar frases legais perante as regras da gramática, onde cada frase legal encontrada corresponderá a um dos tipos de aglomerados. Ao longo do processo, ao se identificar cada pico em um aglomerado, ele será adicionado à lista de picos do espectro, juntamente com os valores respectivos dos pontos que determinam o pico de acordo com a definição adotada. As definições são apresentadas a seguir.

O aglomerado de pico único obedece às regras já apresentadas, seja agudo ou chato, e será caracterizado portanto pelos três pontos, limite à esquerda, máximo local e limite à direita.

Os aglomerados duplos ou triplos necessitam do conceito de vale, definido como um ponto de mínimo local entre dois picos em sequência. Um aglomerado duplo será formado assim por um limite à esquerda, um máximo local, um vale, o segundo máximo local e o limite à direita. O aglomerado triplo possui

adicionalmente, após o segundo máximo, um segundo vale e o terceiro máximo local. As seguintes regras adicionais são necessárias para estabelecer o vale, onde x^{m1} representa a coordenada de um máximo, x^{m2} do máximo seguinte e (x^v, y^v) o ponto de vale:

Para todo i ! $x^{m1} < x_i < x^{m2}$ ($y^v \leq y_i$)

As seguintes regras são necessárias para o caso de vales chatos:

Existe i, j ! $x_i \neq x_j$, $x^{m1} < x_i$, $x_j < x^{m2}$, $y_i = y_j = y^v$
 $((y_{i-1} > y_i) \wedge (y_j < y_{j+1}) \wedge (x^v = (x_i + x_j)/2))$

O aglomerado com picos múltiplos será caracterizado pela existência de mais de três picos, sendo definido através de três pontos, como o único: o limite à esquerda e à direita serão os limites do aglomerado, e o máximo local será o máximo de maior amplitude entre os máximos de cada pico do aglomerado. Cada pico obedece às regras do pico único, não havendo necessidade de se determinar os vales ou os limites entre os diversos máximos.

4.4.3 Segmentação do Espectro

A segmentação do espectro será realizada em três passos:

- uma filtragem para eliminação do ruído aleatório e sinais de amplitude insignificante;
- uma segmentação com espaçamento igual no eixo horizontal, equivalente à própria resolução em frequência do espectro;
- e a reunião em um único segmento dos segmentos consecutivos de mesma inclinação, portanto desiguando o espaçamento horizontal de cada segmento.

Inicialmente será aplicada uma função para eliminar as variações do espectro que se encontram abaixo de um certo limiar, o que corresponde à filtragem do espectro. A seguinte função é aplicada:

$f(x_i) = 0$ se $y_i \leq \text{limiar}$
 $f(x_i) = y_i$ se $y_i > \text{limiar}$

A seguir, cada segmento formado por pares consecutivos de pontos do espectro será classificado de acordo com a figura 4.1, onde foram consideradas três inclinações possíveis e dois sentidos, além do horizontal. Ou seja, inclinação nula, baixa, média e alta, no sentido crescente ou decrescente. A cada segmento assim classificado será

atribuído um rótulo ou símbolo, representados também na figura 4.1, pertencente ao conjunto $(0, 1, 2, 3, 4, 5, 6)$, onde o 0 corresponde à inclinação nula, 1, 2 e 3 à inclinações positivas e 4, 5 e 6 à inclinações negativas.

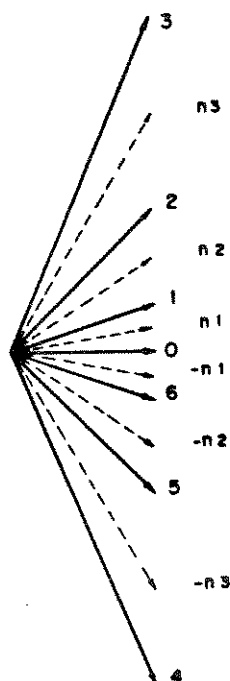


Fig. 4.1) Esquema para a classificação dos segmentos.

Em seguida, todos os segmentos consecutivos que tiverem o mesmo símbolo serão substituídos por um único símbolo, atingindo-se agora uma segmentação com espaçamentos desiguais, porém com segmentos de mesma inclinação.

4.4.4 Geração da Sentença Inicial

Para a geração da sentença inicial a ser processada de acordo com as regras da gramática, será introduzido o conceito de vértice. Um vértice será formado pela junção de cada dois segmentos consecutivos, existindo portanto $s-1$ vértices, considerando-se "s" o número de segmentos. Cada vértice será classificado de acordo com a variação da inclinação de seus segmentos. A tabela 4.1 apresenta a classificação adotada onde os símbolos respectivos vão constituir o vocabulário terminal da gramática. Eles podem ser assim compreendidos:

- quina à direita (a);
- patamar à direita (b);
- pico (c);
- vale (d);
- patamar à esquerda (e);
- quina à esquerda (f).

Tabela 4.1) Classificação dos vértices.

Vértice	Segmento 1	Segmento 2
a	+ ou 0	+
b	+	0
c	+	-
d	-	+
e	0	-
f	-	- ou 0

Na tabela 4.1 "+" significa inclinação positiva; O "-" significa inclinação negativa; O "0" corresponde à inclinação nula. Assim, os vértices podem ser compreendidos da seguinte forma:

- uma quina à esquerda corresponde à passagem de um inclinação positiva ou nula para outra positiva;
- um patamar à esquerda corresponde à passagem de uma inclinação positiva para uma nula;
- um pico corresponde à passagem de uma inclinação positiva para negativa;
- um vale corresponde à passagem de uma inclinação negativa para positiva;
- um patamar à direita corresponde à passagem de uma inclinação nula para uma negativa;
- uma quina à direita corresponde à passagem de uma inclinação negativa para outra negativa ou nula;

Através da aplicação das seguintes regras de produção aos segmentos produzidos pelo método de segmentação descrito, a sentença inicial será então gerada:

```

a -> 01  a -> 02  a -> 03  a -> 12  a -> 13  a -> 23
b -> 10  b -> 20  a -> 21  b -> 30  a -> 31  a -> 32
c -> 14  c -> 15  c -> 16  c -> 24  c -> 25  c -> 26
c -> 34  c -> 35  c -> 36  d -> 41  d -> 42  d -> 43
d -> 51  d -> 52  d -> 53  d -> 61  d -> 62  d -> 63
e -> 04  e -> 05  e -> 06  f -> 54  f -> 64  f -> 65
f -> 40  f -> 45  f -> 46  f -> 50  f -> 56  f -> 60

```

Tendo em vista as regras acima, a segmentação do espectro poderia ser baseada em apenas um único nível, definindo assim apenas três inclinações e não sete. Essa abordagem no entanto perderia informação quanto ao formato do pico, porque seriam diminuídos o número de segmentos e de vértices. Com isso, a área existente sob cada pico, uma medida de sua energia, seria estimada de forma menos precisa.

4.4.5 Gramática para o Reconhecimento de Picos

A estruturação dos diversos tipos de aglomerados em função dos símbolos descritos formam as regras de produção da gramática. O número de picos determina o tipo de aglomerado. Os picos são formados pelos elementos rampa à esquerda (L) e à direita (R), pico agudo (P) ou chato (C) e vale (V). Esses elementos são por sua vez formados pelos vértices. Assim, um pico poderá ser formado por uma quina à direita, um pico agudo e uma quina à esquerda, em sua estrutura mais óbvia. Avaliando-se todas as estruturas possíveis, foi elaborada a gramática livre de contexto e de derivação à esquerda G_P :

$$G_P = \{VN, VT, PP, S\}$$

onde:

$$VN = \{S, U, D, T, M, L, P, C, R, V\}$$

é o conjunto de símbolos não terminais da gramática;

$$VT = \{a, b, c, d, e, f\}$$

é o conjunto de símbolos terminais;

S é o símbolo inicial;

e PP é o seguinte conjunto de regras de produção:

```

S -> U    S -> D    S -> T    S -> M    D -> UU    T -> DU
M -> TU    M -> MU    U -> LP    U -> VP    U -> LC    U -> VC
L -> aL    L -> abL   L -> a    P -> cR    P -> c    C -> beR
C -> be    R -> fR    R -> feR   R -> f    R -> fe    V -> dL
V -> dbL   V -> d

```

4.5 GRAMÁTICA DE ÁRVORES DESENVOLVIDA

O procedimento de identificação dos sintomas é consequência da análise individual de cada pico que compõe o espectro, baseada no estudo das relações, em um mesmo espectro, entre os seus diversos picos, e, em espectros diferentes, entre picos equivalentes. A gramática de picos permite a identificação individualizada dos picos, porém, para a comparação entre os espectros medidos e os de referência, faz-se necessária uma representação global que associe todos os picos de um espectro. Alguns requisitos são importantes e devem estar presentes no método:

- garantir uma grande capacidade de representação;
- permitir procedimentos computacionais eficientes.

Além desses requisitos, tendo em vista a interação com os especialistas encarregados da manutenção do conhecimento, há necessidade de uma boa apresentação visual para a representação dos espectros. O objetivo é possibilitar a compreensão rápida das análises, concentrando as informações pertinentes.

A solução adotada foi a representação do espectro através de uma árvore, onde cada pico constitui um ramo independente. Uma aplicação na área geológica para a análise de traços sísmicos [Cheng, 85] apresenta um bom resumo das possibilidades para a representação de curvas por árvores.

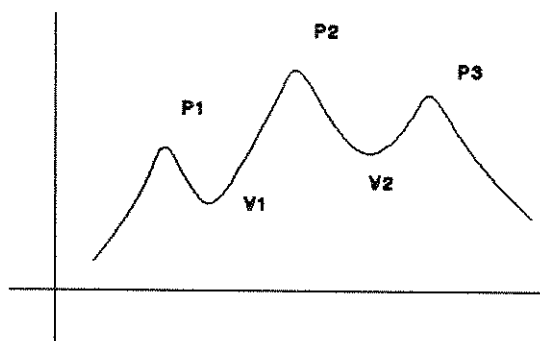
Três tipos de árvores foram consideradas, a partir do texto mencionado:

- relacional;
- esqueleto;
- completa.

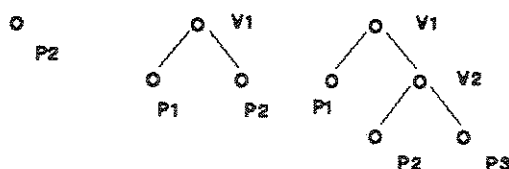
A árvore relacional é criada através de uma sucessão de divisões de uma curva em duas sub-curvas, a partir do pico de maior amplitude de cada sub-curva. Trata-se portanto de uma árvore onde todos os nós são binários. Inicialmente, designa-se o primeiro nó, o nó raiz, para o pico de maior amplitude da curva, considerando-se a curva toda. Existindo apenas um pico na curva, a árvore teria assim apenas o nó raiz representando-o. Caso haja um segundo pico, a curva será subdividida em duas, a partir do vale entre eles, criando-se uma árvore com três nós: o nó-raiz, representando o vale, com duas ramificações e seus nós, representando os dois picos. O nó raiz, que no primeiro momento representava o pico de maior amplitude, após a divisão da curva passou a representar o vale entre os dois picos.

No caso geral, com diversos picos, o procedimento cria inicialmente o nó raiz atribuído ao pico maior. Procura-se então o vale mais profundo e divide-se a curva em duas sub-

curvas nesse vale. São gerados então dois ramos e nós, filhos do primeiro, respectivamente para os dois picos de maior amplitude de cada sub-curva, onde um deles será evidentemente o pico anterior. O nó pai transforma-se assim de sua representação inicial de um pico para a representação do vale respectivo entre as duas sub-curvas. O processo continua repetitivamente, para cada sub-curva, até que não existam mais vales para continuar a sub-divisão. Cada folha da árvore assim gerada corresponderá a um dos picos existentes na curva. A figura 4.2 apresenta uma curva e a sequência para atingir sua árvore.



a



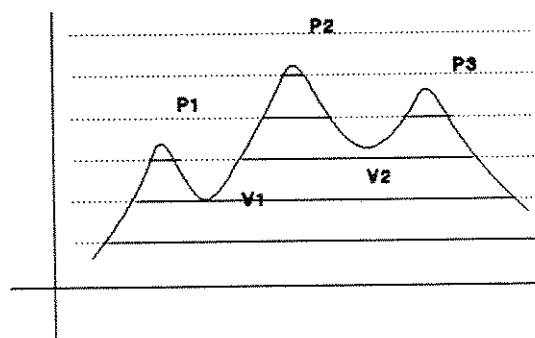
b

Fig. 4.2) Exemplo de árvore relacional.

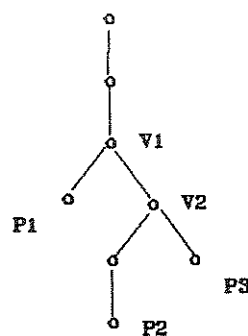
A árvore esqueleto é baseada na quantificação de níveis horizontais de amplitude. Serão avaliados os cruzamentos da curva com os diversos níveis estabelecidos. Para cada pico existente deverá ocorrer pelo menos um par de cruzamentos,

determinando um intervalo horizontal, desde que sua amplitude seja maior do que o primeiro nível, caso contrário, o pico não será considerado. Para cada nível que um certo pico cruzar existirá assim um intervalo, limitado pelos dois pontos de cruzamentos respectivos. Caso haja um vale entre dois picos e a amplitude do ponto correspondente ao fundo do vale seja maior ou igual a um certo nível, existirá apenas um intervalo representativo desses picos, nesse nível. Se a amplitude do fundo do vale for menor que o nível, ocorrerão dois intervalos, um para cada pico. Esses casos podem ser vistos na figura 4.3, onde está representada a curva anterior e a árvore relacional correspondente.

O procedimento inicialmente atribui um nó ao intervalo representado por toda a curva, que será a raiz da árvore, correspondendo ao nível inicial. A seguir serão atribuídos novos nós, um para cada intervalo que existir no próximo nível. Esses nós serão filhos do nó anterior. Ou seja, se um pico cruzar o próximo nível e não existir um fundo de vale abaixo desse nível, existirá apenas um intervalo e será gerado apenas um nó filho. Caso a curva cruze o nível mas exista um vale abaixo do nível e portanto dois picos, serão criados dois novos intervalos nesse nível, e consequentemente dois novos nós, filhos do nó representativo do intervalo do nível anterior. O processo continua até que não haja novos cruzamentos.



a

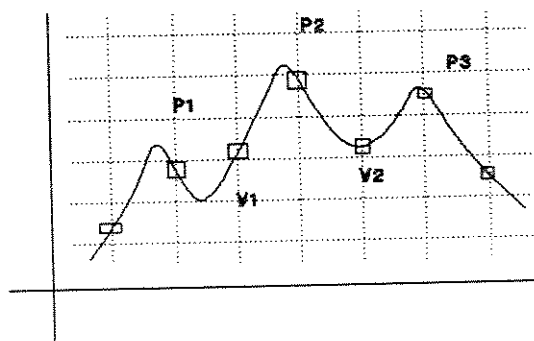


b

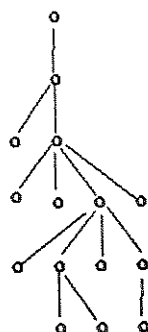
Fig. 4.3) Exemplo de árvore esqueleto.

A árvore completa é uma extensão da esquelito, porém considerando-se a quantização dos dois eixos. A idéia é levar em conta não só o cruzamento com níveis horizontais como também verticais. Ou seja, para cada pico, além dos nós representativos dos intervalos horizontais de cada nível que um pico atravessou, existirão pelo menos mais dois nós associados ao cruzamento de um nível vertical para cada lado do pico.

Inicialmente atribui-se a raiz ao intervalo global da curva. Avalia-se os cruzamentos com o próximo nível, e respectivos intervalos, gerando um nó filho para cada um. Até aqui é semelhante à árvore esquelito. Porém, para cada intervalo poderão existir dois nós folhas a mais, associados a cada cruzamento da curva com um nível vertical. Esses nós podem ser filhos de pais diferentes, uma vez que os cruzamentos verticais podem se dar em níveis horizontais diferentes e o mesmo pico pode apresentar diversos cruzamentos verticais, dependendo de sua largura. A figura 4.4 apresenta a árvore completa da mesma curva anterior.



a



b

Fig. 4.4) Exemplo de árvore completa.

Algumas considerações podem ser tecidas sobre as propriedades desses tipos de árvores, segundo Cheng.

Sobre as árvores relacionais:

- As folhas das árvores são uma descrição linear dos picos;
- Cada nó não-folha corresponderá a um vale.

Sobre as árvores esqueletos:

- As folhas continuam sendo uma descrição linear dos picos;
- O predecessor comum a dois nós corresponde a um vale;
- Para cada nível, picos de amplitude inferior à próxima quantização não serão detectados;
- A profundidade máxima de uma árvore corresponde ao número de níveis horizontais;
- A profundidade de uma folha corresponde à amplitude do pico correspondente.
- Cada nó representa um intervalo em um nível de quantização. Se a largura do intervalo é associada ao nó, a curva pode ser reconstruída a partir da árvore.

Sobre as árvores completas:

- As folhas não são mais uma descrição linear dos picos;
- A largura de cada pico e dos vales resulta da representação.

As características da árvore esqueleto são as que mais se adaptam às necessidades do método de reconhecimento de padrões, uma vez que todas as informações necessárias podem estar disponíveis nessa representação. A árvore completa apresentaria de significativo o fato de que a informação da largura de cada pico está contida na própria representação. No entanto, observando que pequenas variações no formato do pico poderiam alterar consideravelmente uma árvore completa, além de perder a relação linear entre os picos e os nós folhas, é decisivo para se adotar o modelo da árvore esqueleto. Adicionalmente, o algoritmo para a geração de uma árvore completa, e depois para compará-las, seria muito mais complexo.

Assim, a representação desenvolvida faz uso dos conceitos da árvore esqueleto, com a quantificação da amplitude em oito níveis horizontais. Uma vez que os picos já estarão reconhecidos e qualificados, pelo autômato baseado na linguagem de picos e apresentado na seção 4.6.2, cada ramo

vai corresponder a um dos aglomerados reconhecidos, rotulado pelo símbolo correspondente. Dessa forma, através dos pontos associados aos picos conforme exposto na seção 4.4.2, desde que conhecidos, suas larguras podem ser determinadas, não havendo necessidade de um modelo mais complexo. Ainda, a gramática adotada não perde os picos de baixa amplitude que não cruzam o próximo nível, uma vez que eles já serão conhecidos. Acrescenta-se assim mais um nó para cada pico, correspondendo ao ponto de máximo, quando ele não mais ultrapassar o próximo nível, ou for maior que o último nível. A profundidade de um nó-folha será portanto o número de níveis que ele cruza mais um. Com essas adições, a árvore esqueleto acarreta uma representação mais precisa da curva.

A transformação lógica que gera a árvore cria duas representações em paralelo: a visualização gráfica da árvore e uma cadeia de caracteres que corresponde a uma sentença legal da gramática respectiva. As duas representações possuem uma relação biunívoca, e permitem uma comparação imediata entre dois espectros, a visual pelo operador, e a outra através de uma simples comparação de cadeias de caracteres.

A figura 4.5 apresenta um exemplo de todo o processo, onde podem ser visualizados os gráficos do vetor no domínio da frequência, um gráfico ressaltando os picos reconhecidos, e a árvore gerada.

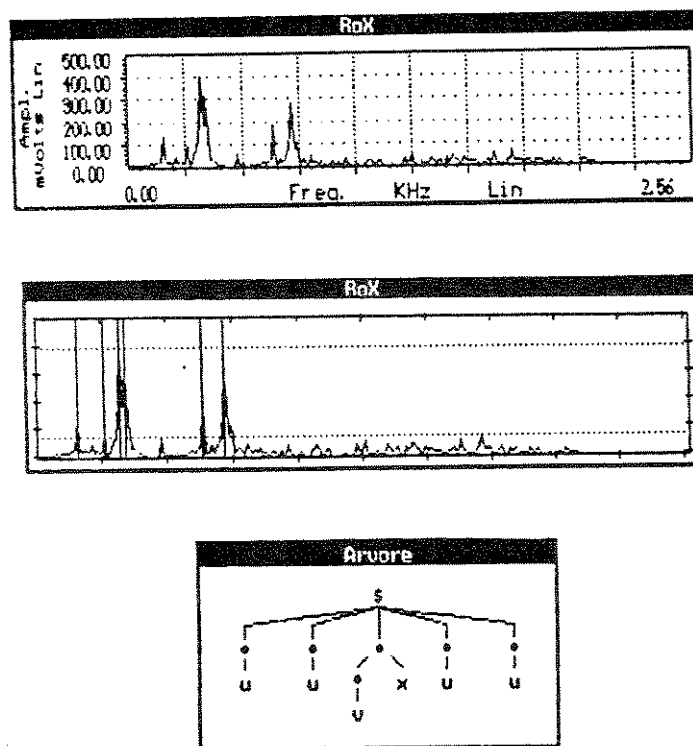


Fig. 4.5) Exemplo da aplicação da gramática de árvores.

A gramática de árvores desenvolvida G_a pode ser representada pelo seguinte conjunto:

$$G_a = (V, r, P_a, S)$$

onde:

$V = N \cup T_a$ é o vocabulário da gramática;

$N = \{P, U, D, T, M\}$ é o conjunto de símbolos não-terminais;

$T_a = \{\$, o, u, d, t\}$ é o conjunto de símbolos terminais;

(V, r) é o alfabeto graduado ("ranking");

S é o símbolo inicial; e

P_a é o seguinte conjunto de regras de produção:

$S \rightarrow PS$	$P \rightarrow \$$ U	$P \rightarrow \$$ D	$P \rightarrow \$$ T	$P \rightarrow \$$ M
$U \rightarrow o$ U	$U \rightarrow o$ u	$D \rightarrow o$ D	$D \rightarrow o$ d	$D \rightarrow o$ / \ $U \quad U$
$D \rightarrow o$ / \ $U \quad u$	$D \rightarrow o$ / \ $u \quad U$	$T \rightarrow o$ T	$T \rightarrow o$ t	$T \rightarrow o$ / \ $U \quad D$
$T \rightarrow o$ / \ $u \quad D$	$T \rightarrow o$ / \ $U \quad d$	$T \rightarrow o$ / \ $D \quad U$	$T \rightarrow o$ / \ $d \quad U$	$T \rightarrow o$ / \ $D \quad u$
$T \rightarrow o$ / ! \ $U \quad U \quad U$	$T \rightarrow o$ / ! \ $U \quad U \quad u$	$T \rightarrow o$ / ! \ $U \quad u \quad U$	$T \rightarrow o$ / ! \ $u \quad U \quad U$	$T \rightarrow o$ / ! \ $u \quad U \quad u$
$M \rightarrow o$ M	$M \rightarrow o$ m			

Considerando que os picos podem ser no máximo triplos, o único nó com um maior número de filhos será a raiz, com tantos filhos quantos forem os aglomerados identificados. Para cada aglomerado reconhecido existirá um ramo iniciado com um símbolo correspondendo ao seu tipo, símbolo esse pertencente ao alfabeto não terminal. Esse símbolo inicial será gradativamente transformado, pela aplicação das regras de produção, em função da morfologia do aglomerado respectivo e da sentença que esteja sendo gerada para descrevê-lo.

Enquanto para o reconhecimento dos aglomerados, o autômato baseado na gramática de picos, recebe uma sentença que deve ser aceita como legal, o que resulta semanticamente no tipo de aglomerado, para a gramática de árvores deve ser gerada uma sentença que o descreva, com a sequência de regras dependendo semanticamente da morfologia do aglomerado. O conjunto de símbolos não-terminais inclui as mesmas letras da gramática de picos e também a letra P, introduzida para permitir a criação dos diversos ramos.

Os símbolos terminais são as letras minúsculas correspondentes aos símbolos não terminais que caracterizam os tipos de picos, além do "\$" como primeiro símbolo de um ramo, e da letra "o" como símbolo geral dos nós não-folhas.

As regras de produção estão baseadas nas possibilidades para cada tipo de pico que tenha cruzado um nível, em relação ao nível seguinte. A figura 4.6 apresenta as possibilidades, onde cada uma vai gerar a regra de produção respectiva.

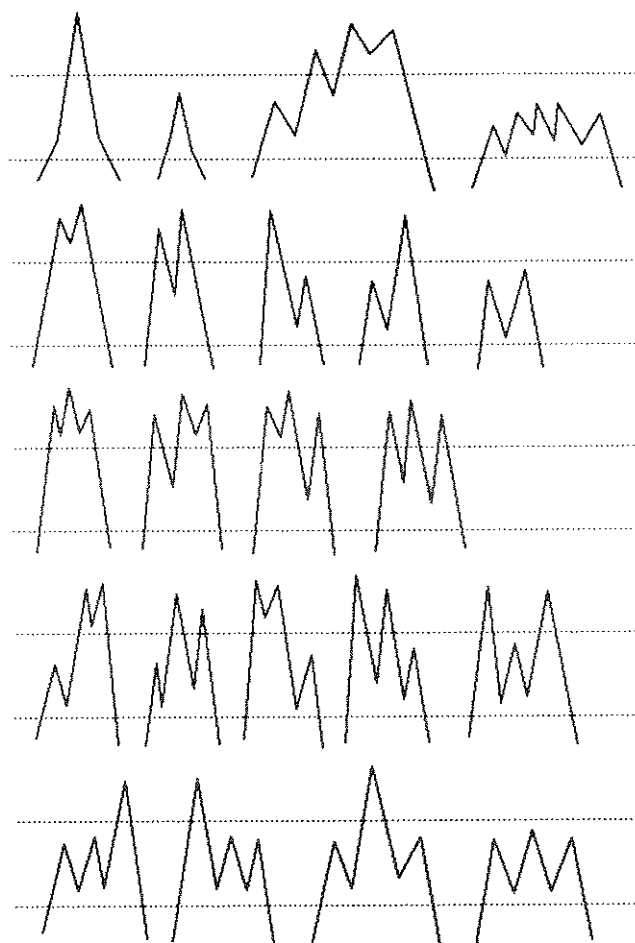


Fig.4.6) Possibilidades morfológicas dos aglomerados.

4.6 AUTÔMATO PARA O RECONHECIMENTO DOS PICOS

Para implementar o reconhecimento dos picos, foram desenvolvidos um algoritmo para a segmentação do espectro, uma máquina de estados para a geração da sentença inicial e um autômato a partir da gramática G_p . Após a segmentação do espectro, conforme apresentado na seção 4.4.3, a máquina de estados trata da geração da sentença inicial, providenciando a transformação dos segmentos em um conjunto de vértices. O autômato processa essa sentença, buscando identificar as ocorrências de símbolos que caracterizam os tipos de aglomerados estabelecidos. A máquina de classificação dos vértices e o autômato estão expostas nas seções seguintes.

4.6.1 Classificação dos Vértices

A máquina de estados finitos para a classificação dos vértices de acordo com a tabela 4.1 tem o seu mapa de transição exposto na figura 4.7. Nesse mapa, os círculos duplos correspondem aos estados finais onde foram identificados os vértices, os círculos simples representam os estados intermediários, e os arcos classificados referem-se à transição entre estados gerada pelo símbolo respectivo.

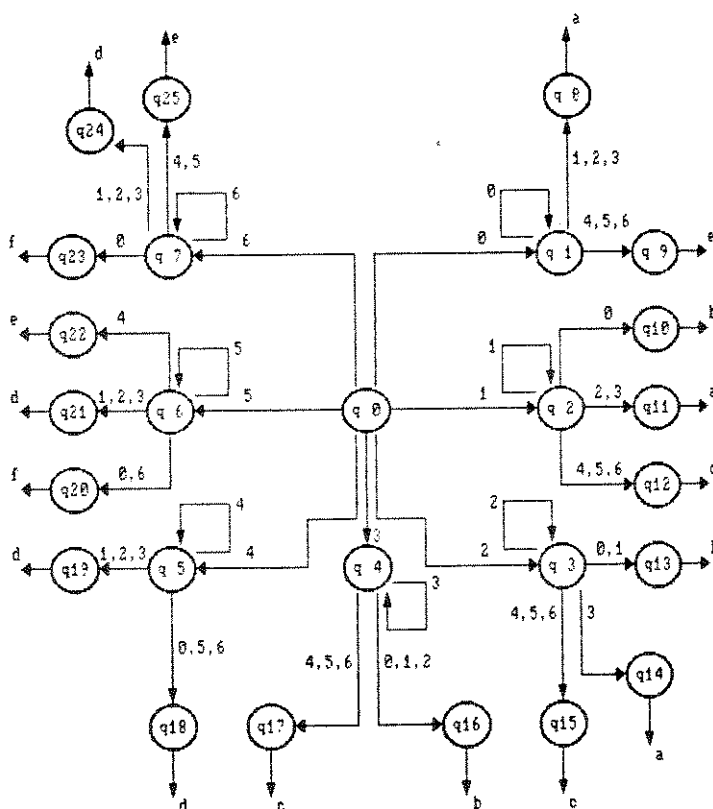


Fig. 4.7) Máquina para classificação dos vértices.

4.6.2 Autômato para Aceitação dos Picos

Após a classificação dos vértices, o autômato para a aceitação dos picos é aplicado sobre a sentença gerada. O autômato pode ser gerado diretamente a partir da gramática G_p conforme definida na seção 4.4.5, através de métodos apresentados na literatura [Fu, 77][Gonzalez, 78], onde cada símbolo do vocabulário não-terminal da gramática transforma-se em um estado do autômato, adicionando-se mais um para o estado final, e cada regra vai gerar uma transição entre estados. No entanto, uma vez que a gramática G_p é livre de contexto, faz-se necessário a princípio um autômato com pilha não determinístico. Procurando-se diminuir a complexidade, atingiu-se uma nova gramática, agora regular, permitindo assim um autômato de estados finitos determinístico.

Para tanto, foram eliminadas as regras que caracterizam os aglomerados duplo, triplo e múltiplo, acrescentando-se rotinas semânticas a alguns estados do autômato para essa classificação. Além disso, a nova gramática $G_{p'}$, equivalente a G_p , foi escrita na forma normal de Greibach (o primeiro símbolo do lado direito da regra de produção é sempre um terminal), o que permite uma transformação imediata para o seu autômato.

O vocabulário não terminal foi diminuído (gerando assim menos estados no autômato), porém mantendo-se o mesmo significado para os símbolos que permaneceram. Foram acrescentados dois símbolos, para refletir a existência dos patamares à esquerda (B) e à direita (E), por exigência da normalização. Foi acrescentado um símbolo ao vocabulário terminal, para a caracterização do fim do aglomerado (%). A gramática $G_{p'}$ foi assim definida:

$$G_{p'} = \{VN', VT', PP', S\}$$

onde:

$VN' = \{S, L, B, P, V, R, E\}$ é o conjunto de símbolos não terminais da gramática;

$VT' = \{a, b, c, d, e, f, \%\}$ é o conjunto de símbolos terminais;

S é o símbolo inicial;

e PP' é o seguinte conjunto de regras de produção:

$S \rightarrow aL$	$L \rightarrow aL$	$L \rightarrow bB$	$L \rightarrow cP$	$B \rightarrow aL$	$B \rightarrow eP$
$P \rightarrow fR$	$P \rightarrow dV$	$V \rightarrow cP$	$V \rightarrow aV$	$V \rightarrow bB$	$R \rightarrow fR$
$R \rightarrow aV$	$R \rightarrow eE$	$R \rightarrow \%$	$E \rightarrow dV$	$E \rightarrow fR$	

O autômato desenvolvido A_p , cujo diagrama de transição dos estados encontra-se na figura 4.8, é representado por:

$$A_p = \{SP, QP, DP, ZP, FP\}$$

onde:

$SP = \{a, b, c, d, e, f\}$
é o conjunto de símbolos de entrada;

$QP = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6, z\}$
é o conjunto de estados;

$ZP = \{q_0\}$ é estado inicial;

$FP = \{z\}$ é o conjunto de estados finais;

DP é o seguinte conjunto de regras de transição:

$d(q_0, a) = q_1$ $d(q_1, a) = q_1$ $d(q_1, b) = q_2$ $d(q_1, c) = q_3$
 $d(q_2, a) = q_1$ $d(q_2, e) = q_3$ $d(q_3, c) = q_4$ $d(q_3, f) = q_5$
 $d(q_4, a) = q_4$ $d(q_4, b) = q_2$ $d(q_4, c) = q_3$ $d(q_5, a) = q_4$
 $d(q_5, d) = q_4$ $d(q_5, e) = q_6$ $d(q_5, f) = q_5$ $d(q_5, \%) = z$
 $d(q_6, d) = q_4$ $d(q_6, f) = q_5$

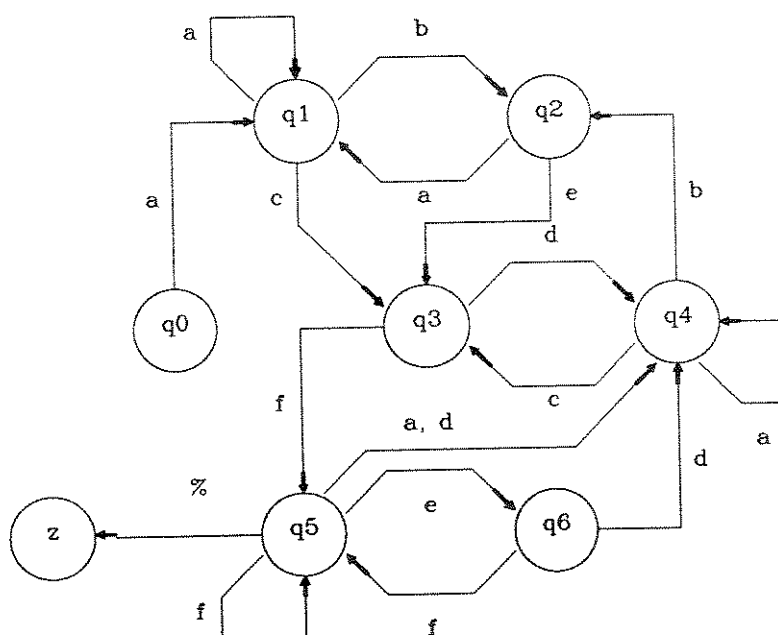


Fig. 4.8) Mapa de transição dos estados para o autômato A_p .

As seguintes rotinas semânticas foram associadas a cada par (q, w) , onde q é um estado de Q_p e w um símbolo terminal, com os seguintes parâmetros assim iniciados:

$j \leftarrow 1; k \leftarrow 1; i \leftarrow 0$

```
(q0, a) : xe(k) = xj; ye(k) = yj;
(q1, c) : xm(k) = xj; ym(k) = yj;
(q2, e) : xm(k) = (xj-1 + xj)/2; ym(k) = (yj-1 + yj)/2;
(q3, d) : xv(k) = xj; yv(k) = yj; k = k+1
(q4, c) : xm(k) = xj; ym(k) = yj;
(q5, a) : xv(k) = (xj-1 + xj)/2; yv(k) = (yj-1 + yj)/2; k=k+1
(q5, %) : xr(k) = xj; yr(k) = yj; i = i+1
(q6, d) : xv(k) = xj; yv(k) = yj;
```

O parâmetro j é incrementado para cada vértice processado pelo autômato.

Dessa forma, ao se concluir o processamento de um aglomerado qualquer, todos os seus pontos significativos estarão armazenados nas variáveis acima definidas, identificando-se o tipo de pico pelo número de pontos armazenados.

CAPÍTULO 5

REDE SEMÂNTICA DOS SISTEMAS MECÂNICOS

- 5.1 Sistemas Baseados em Conhecimento**
 - 5.1.1 Métodos para Representação do Conhecimento**
 - 5.1.2 Fatos e Regras de Produção**
 - 5.1.3 Redes Semânticas**
 - 5.1.4 Esquemas**
- 5.2 Estabelecimento do Modelo Lógico**
 - 5.2.1 Definição dos Sistemas Mecânicos**
 - 5.2.2 Estruturação das Classes Estáticas**
- 5.3 Elementos da Rede Semântica**
 - 5.3.1 A Classe *Classe***
 - 5.3.2 A Classe *Instância***
 - 5.3.3 A Classe *Propriedade***
 - 5.3.4 A Classe *Exemplar***
 - 5.3.5 A Classe *Relação***
 - 5.3.6 A Classe *Ocorrência***
- 5.4 Exemplo da Rede Semântica**

Nesse capítulo será apresentada a rede semântica desenvolvida para representar os sistemas mecânicos. Será iniciado com uma visão resumida dos conceitos básicos relacionados com os sistemas baseados em conhecimento e as técnicas para sua representação. Em seguida será apresentado o modelo lógico para a classificação dos sistemas mecânicos monitorados. Esse modelo é implementado com o uso de classes básicas desenvolvidas através de programação por objetos, e utilizadas para a representação do conhecimento estático. Apresenta-se um exemplo de rede semântica usando os conceitos expostos.

5.1 SISTEMAS BASEADOS EM CONHECIMENTO

Os sistemas baseados em conhecimento constituem um subconjunto das aplicações da **Inteligência Artificial**. Em geral são programas de computador que atuam em uma área específica do conhecimento, e por causa dessa característica são mais conhecidos pela denominação de **sistemas especialistas**. A arquitetura básica desse tipo de sistemas possui alguns pontos em comum mesmo quando se trata de aplicações em áreas completamente diferentes. A característica fundamental é a utilização de uma **base do conhecimento**, onde tudo que o programa conhece está representado. Um segundo componente essencial é um **mecanismo de inferência** que permite a evolução dos dados dentro da base do conhecimento. Os primeiros sistemas especialistas eram programas completos que faziam uso de apenas uma base do conhecimento. Diversos exemplos podem ser encontrados na literatura [Hayes-Roth, 83] [Winston, 84]. As ferramentas de desenvolvimento atuais por outro lado possibilitam o desenvolvimento de módulos baseados em conhecimento integrados em programas convencionais (ditos procedurais), ou o uso de módulos procedurais em sistemas especialistas [IBM, 91a, 91b] [Neuron Data, 90], com uma única base do conhecimento ou várias bases.

Como regra geral, sistemas que fazem uso da programação procedural são mais eficientes computacionalmente. No entanto, determinados tipos de problemas são mais indicados para a arquitetura dos sistemas especialistas, principalmente nos seguintes casos:

- Não é possível um modelamento matemático adequado;
- O modelo é muito complexo para ser usado.

Os sistemas, ou módulos, baseados no conhecimento são portanto a solução indicada quando as informações disponíveis sobre a metodologia (que se vai representar através de um programa de computador) é resultado da experiência profissional de um ou mais especialistas em uma certa área do conhecimento. A determinação de diagnósticos baseados na análise das vibrações mecânicas de máquinas rotativas é um exemplo claro de uma aplicação adequada para essa arquitetura. Por outro lado, os métodos de análise dos sinais são algoritmos matemáticos bem conhecidos, caracterizando dessa forma um sistema híbrido, onde há necessidades de rotinas procedurais atuando como "**fontes do conhecimento**".

Alguns conceitos básicos, referentes aos métodos para a representação do conhecimento e processos de inferência, serão expostos de forma sucinta nas próximas seções, permitindo assim que as opções adotadas na arquitetura desenvolvida possam ser assimiladas com mais facilidade. Para melhor compreensão dos conceitos as referências devem ser consultadas.

5.1.1 Métodos para a Representação do Conhecimento

O conhecimento utilizado nos sistemas especialistas pode ser genericamente dividido em estático e dinâmico. O conjunto de informações imutáveis associado em geral à descrição dos objetos que constituem os elementos básicos a serem manipulados pelos sistema formam o conhecimento estático. Um bom exemplo encontrado na literatura é um sistema para a identificação de agentes poluidores em um complexo de tubulações industriais e rios [Waterman, 83]. A descrição desses elementos e de suas conexões constituem o conhecimento estático. O conhecimento dinâmico está associado a um dado contexto do sistema, referindo-se às informações instantâneas de análise de um caso específico.

A representação do conhecimento de forma adequada é fundamental para a qualidade do programa respectivo, tanto sob o aspecto da eficiência de processamento como da manutenção do conhecimento. Os seguintes métodos para a representação do conhecimento têm sido usados nos sistemas especialistas:

- regras de produção;
- redes semânticas;
- esquemas;

As características de cada um desses métodos serão apresentadas a seguir. As ferramentas desenvolvidas para a representação do conhecimento fazem uso de todos eles.

5.1.2 Fatos e Regras de Produção

O objetivo básico de um módulo baseado em conhecimento é a dedução de novos fatos a partir de um conjunto de fatos conhecidos inicialmente. Um **fato** pode ser compreendido como uma afirmação aceita como verdadeira pelo sistema. Uma **hipótese** é uma afirmação aceita momentaneamente como verdadeira, porém que deverá ser avaliada antes de se tornar um fato. Na avaliação de uma hipótese qualquer, é possível que haja necessidade de se buscar novos fatos, além daqueles originalmente fornecidos ao módulo. O processo de se deduzir novos fatos a partir dos fatos conhecidos é chamado de **inferência**.

O mecanismo de inferência mais comum é baseado no uso de **regras de produção**, semelhantes às regras usadas nas gramáticas (vide capítulo 4), porém de utilização operacionalmente diferente. As regras usadas nos sistemas especialistas são do tipo "**se <antecedentes> então <consequentes>**", onde antecedentes e consequentes constituem uma ou mais cláusulas podendo assumir os valores "verdadeiro" ou "falso" [Harmon, 88] [Winston, 84]. Uma cláusula pode ser vista como uma hipótese que será investigada, por exemplo verificando-se se faz parte da lista de fatos conhecidos.

Assim, através da análise das condições entre as diversas cláusulas de uma regra, se o conjunto de antecedentes resulta em verdadeiro, os consequentes também serão declarados verdadeiros. Através da concatenação entre diversas regras, novos fatos vão sendo gradativamente gerados e incorporados aos demais já conhecidos. A utilização de **fatores de certeza**, encontrados em diversas aplicações, consiste em uma gradação do nível de "verdade" dos fatos, permitindo que o processo possa ocorrer mesmo que não haja certeza dos fatos manipulados.

Um outro aspecto fundamental consiste na estratégia de controle da sequência de regras que serão testadas, em outras palavras, na busca da solução para o problema em questão. As estratégias principais são três:

- dirigida pelos dados;
- dirigida por metas;
- oportunista.

A estratégia dirigida pelos dados é o processo que dispara a análise das regras a partir do conjunto inicial de fatos fornecido ao módulo. É também conhecida como encadeamento para a frente ou progressiva. A estratégia dirigida por metas usa um conhecimento externo ao módulo para gerar hipóteses que deverão ser analisadas. É também conhecida como encadeamento para trás ou regressiva. A estratégia oportunista faz uso das duas estratégias de forma simultânea, tentando atingir o resultado final da maneira mais rápida possível.

Outro aspecto significativo relacionado com o controle da inferência é o tipo de pesquisa da solução do problema, tendo em vista a análise de cada hipótese. A pesquisa pode ser **em profundidade** ("depth-first") ou **em amplitude** (breadth-first). Considerando as regras agrupadas em níveis, estabelecida uma hipótese, na pesquisa em amplitude todas as regras do nível seriam testadas em sequência, antes de se passar ao nível seguinte. Na pesquisa em profundidade, a primeira cláusula da primeira regra do nível seria avaliada, e em sequência a primeira cláusula da primeira regra do nível inferior que possua a cláusula da primeira regra entre seus consequentes, e assim recursivamente, até se atingir uma cláusula que seja um fato diretamente verificável. Essa última regra terá então suas cláusulas testadas uma a uma, do mesmo modo. Após o teste completo dessa regra, o processo retorna então à cláusula do nível superior que a disparou, e assim sucessivamente até atingir a primeira regra para o teste de suas outras cláusulas. Só então será testada a segunda regra do primeiro nível.

Uma rede de inferência consiste na representação de conjuntos de regras sob a forma de símbolos associados às cláusulas e às relações entre elas, normalmente as operações lógicas "E", "OU" e a "negação". Winston apresenta exemplos

de redes de inferência, ressaltando porém que o seu uso mais comum é para a análise do conhecimento. O procedimento de inferência é normalmente baseado no processamento simbólico dos fatos e regras [Stefik, 83], o que implica na comparação do conteúdo de cadeias de caracteres e na manutenção de listas de fatos já testados e de hipóteses a serem avaliadas [Hu, 89][Levine, 88].

As regras de produção são a parcela do conhecimento que possibilita a geração dos dados dinâmicos, através do mecanismo de inferência que controla os testes e armazena os resultados. As regras fazem parte de forma geral de todos os métodos de representação do conhecimento, porém podem ser usadas de forma exclusiva, quando todo o conhecimento do sistema for representado apenas através de regras e dados (fatos) não estruturados. Esse tipo de sistema especialista é dito "baseado em regras" [Winston, 84].

O aspecto preponderante nos sistemas baseados em regras é a simplicidade, permitindo um desenvolvimento rápido e manutenção facilitada. No entanto, apesar da simplicidade do método, a representação exclusiva por regras é bastante poderosa e eficaz, porém apenas quando o tipo e estrutura do conhecimento for adequado ao método, o que nem sempre se verifica. A capacidade de representação dos dados estáticos através de regras é bastante limitada, o que indica sua utilização apenas para os casos em que não há necessidade de um modelo estruturado dos conceitos de que trata o sistema.

5.1.3 Redes Semânticas

As redes semânticas constituem uma alternativa com grande capacidade de representação, e por isso mesmo de arquitetura mais elaborada [Hu, 89]. Como um modelo simplificado do método de representação do cérebro humano, pode permitir diversos níveis de complexidade, existindo várias formas de implementação [Harmon, 88]. O método faz uso de **nós** e **arcos rotulados**. Os nós representam as entidades básicas do sistema que podem ser constituídas por objetos reais ou conceituais, e os arcos estabelecem relações entre dois nós. Qualquer tipo de relação pode ser explicitada através de um arco, o que assegura uma grande flexibilidade na representação.

Algumas relações ocorrem com frequência. A principal é a relação "**é-um**" que acarreta a característica fundamental da **hereditariedade**. É utilizada em geral para representar a relação entre a definição de uma classe e de um indivíduo pertencente à classe. Por exemplo, na frase "Rex é um cão", tem-se as entidades Rex e cão e a relação é-um entre elas indicando que o primeiro é um indivíduo da classe dos cães. Com isso, Rex herda as propriedades comuns aos cães.

Outra relação muito encontrada é a "**tem-um**" que indica uma composição, ou seja, que um objeto é parte de um outro.

Observe-se que as relações são orientadas, uma vez que tomada no sentido oposto o nome da relação deve ser substituído para permitir a compreensão. Assim, o inverso de "tem-um" é "é-parte-de".

Uma característica dos métodos baseados em redes semânticas é a grande capacidade de representação de informações estáticas. Para a análise de vibrações de sistemas mecânicos, essa capacidade é fundamental, uma vez que há necessidade de uma descrição completa dos sistemas monitorados, da interligação entre seus diversos elementos e do próprio sistema de monitoramento. Todos esses dados constituem o conhecimento estático, de onde serão retiradas informações básicas para os processos de interpretação dos sinais.

5.1.4 Esquemas

Entidades de uma forma geral podem ser representadas através da tripla **objeto.propriedade.valor**, onde o primeiro item corresponde à identificação da entidade, o segundo à identificação de uma característica relevante e o último a uma quantificação ou qualificação dessa característica. Uma entidade qualquer possui em geral diversas propriedades, exigindo assim diversas triplas para sua completa descrição.

Por outro lado, é necessária a distinção de dois tipos de objetos que compõem os sistemas: os objetos genéricos e os individuais. As linguagens específicas para a representação do conhecimento apresentam tratamento diferentes para esses dois tipos de objetos [Nebel, 85]. Os objetos genéricos podem ser tratados como **classes**, enquanto os individuais serão **instâncias**, ou seja exemplares específicos de uma certa classe. Um objeto qualquer possui um **estado** e um **comportamento**. O estado está associado ao conjunto de valores de suas propriedades, enquanto o comportamento está relacionado com a forma como esses valores são processados. Um objeto do tipo **classe** corresponde essencialmente à uma descrição das propriedades da classe e de seu comportamento. Assim, retomando exemplo da seção anterior, a classe *Cães* pode apresentar como propriedades o peso, a altura e o tipo de pelo. O indivíduo *Rex*, uma instância da classe *Cães*, possui os valores *10 kg*, *30 cm* e *longo*, para as propriedades respectivas. O comportamento está relacionado à forma como as propriedades são avaliadas ou processadas. Por exemplo, duas outras propriedades da classe *Cães* poderiam ser *ferocidade*, e *espécie*, com a primeira sendo avaliada em função do valor da segunda.

Para englobar essas capacidades, o conceito original da tripla **objeto.propriedade.valor** deve ser estendido, transformando-se assim em **esquemas** ("frames") [Hu, 89] [Harmon, 88] [Winston, 84]. Cada esquema representa portanto um conceito, ao qual será atribuído o nome de "**Classe**". Um indivíduo será explicitado através de uma "**Instância**" de sua

classe respectiva. Uma classe será descrita através de suas "Propriedades", que determina o estado da instância, e de seus "Métodos", que determina o comportamento da classe. Para permitir a implementação de redes semânticas, uma classe possui também uma ou mais "Relações". Dessa forma, as classes e instâncias constituem os nós de uma rede semântica.

Uma instância possui um conjunto de valores específicos para as propriedades de sua classe, os quais são calculados e processados pelos seus métodos (da classe). Possui também relacionamento com outros indivíduos, da mesma classe ou de outras, de acordo com as relações constantes da definição da classe.

Uma nova relação muito útil a ser incluída nas redes semânticas montadas com esquemas é a relação "sub-de", que indica que uma classe é sub-classe de outra, ou seja, que ela herda todas as propriedades, métodos e relações da segunda.

Tendo sido apresentados os conceitos básicos a serem utilizados na representação do conhecimento, na próxima seção serão definidos os esquemas das entidades que fazem parte do modelo usado para a determinação de diagnósticos, e na seção 5.3 as classes básicas desenvolvidas para implementação de redes semânticas.

5.2 ESTABELECIMENTO DO MODELO LÓGICO

Para dispor das informações referentes aos sistemas mecânicos monitorados, necessárias para a interpretação de um espectro qualquer, há necessidade de uma classificação das máquinas e de seus componentes. Para o processamento das informações desse modelo lógico será necessário por sua vez a implantação de uma rede semântica que o represente.

5.2.1 Definição dos Sistemas Mecânicos

O passo inicial para se definir o modelo do conhecimento para o módulo de determinação de diagnóstico é a delimitação do escopo do sistema, quanto aos objetos que podem ser nele representados, e o nível de detalhamento das informações. No caso dos sistemas mecânicos rotativos, os seguintes pontos são relevantes quanto à vibração:

- os tipos de sistemas mecânicos monitorados;
- os sub-sistemas e componentes considerados;
- as condições de operação dessas máquinas;
- o processo em que elas atuam.

No entanto, três restrições foram admitidas inicialmente visando simplificar o problema, sem no entanto interferir com a capacidade das ferramentas desenvolvidas:

- As condições de operação serão assumidas como constantes, não sendo necessário levá-las em consideração.
- O ambiente de instalação será tal que não ocasiona interferência entre os sistemas mecânicos.
- Os processos em que estão inseridos não serão considerados como passíveis de introduzir alterações nos modos de vibração.

Com essas restrições, apenas os dois primeiros pontos, quanto à definição dos sistemas mecânicos e ao detalhamento de seus componentes serão considerados. Dentro do objetivo do desenvolvimento de um conjunto de ferramentas para a implementação de sistemas de monitoramento e diagnóstico, deve-se trabalhar com um conjunto de máquinas que caracterize uma parte significativa dos problemas possíveis de serem encontrados em casos concretos. Porém esse universo não deve ser muito extenso para que possa permitir uma exposição coesa e clara de todas as idéias. Assim, optou-se por limitar a aplicação a cinco tipos de máquinas:

- compressores;
- ventiladores;
- motores elétricos;
- geradores elétricos;
- turbinas a vapor.

Com essas máquinas, os seguintes sistemas mecânicos, fáceis de serem encontrados em indústrias e apresentando porte médio ou grande, podem ser representados:

- um compressor com motor elétrico;
- um compressor com turbina a vapor;
- um ventilador com motor elétrico;
- um gerador com turbina a vapor;

Três tipos de acoplamentos serão considerados:

- direto;
- correia;
- engrenagem (caixa de redução).

As seguintes definições foram admitidas para a criação dessa classificação, a qual deverá se limitar às máquinas previamente mencionadas:

- um sistema mecânico é composto por pelo menos duas máquinas e um acoplamento;
- cada máquina individualmente pode ser um propulsor (fornece energia) ou propulsado (recebe energia);
- em cada sistema mecânico devem existir pelo menos um propulsor e um propulsado;
- entre um propulsor e um propulsado existe um acoplamento;

5.2.2 Estruturação das Classes Estáticas

As classes ditas estáticas são aquelas que representam os conceitos que devem ser englobados nas descrições dos sistemas mecânicos, ou seja na parcela estática do conhecimento. Considerando portanto as máquinas especificadas na seção anterior e as informações significativas do ponto de vista das vibrações, as seguintes classes foram incluídas no modelo lógico e terão seus esquemas apresentados a seguir:

- SistemaMecânico;
- Máquina;
- Propulsor;
- Propulsado;
- MotorElétrico;
- TurbinaVapor;
- Compressor;
- Ventilador;
- GeradorElétrico;
- Acoplamento;
- Mancal;
- PontoMedição;
- Sensor.
- Método;

Essas classes serão apresentadas a seguir. O conteúdo dos esquemas é baseado no conhecimento apresentado nos capítulos 2 e 3. Nas figuras uma elipse representa uma classe e um retângulo representa uma propriedade ou uma relação. Considerando o sentido da esquerda para a direita, uma ligação entre uma elipse e um retângulo implica em que este representa uma propriedade da classe, enquanto a ligação entre um retângulo e uma elipse indica uma relação.

A classe **SistemaMecânico**, cujo esquema está apresentado na figura 5.1, possui como propriedades um **Nome**, uma **Descrição**, uma **Localização** e um **Processo**. Possui ainda relações "tem-um" com as classes **Propulsor**, **Propulsado** e **Acoplamento**.

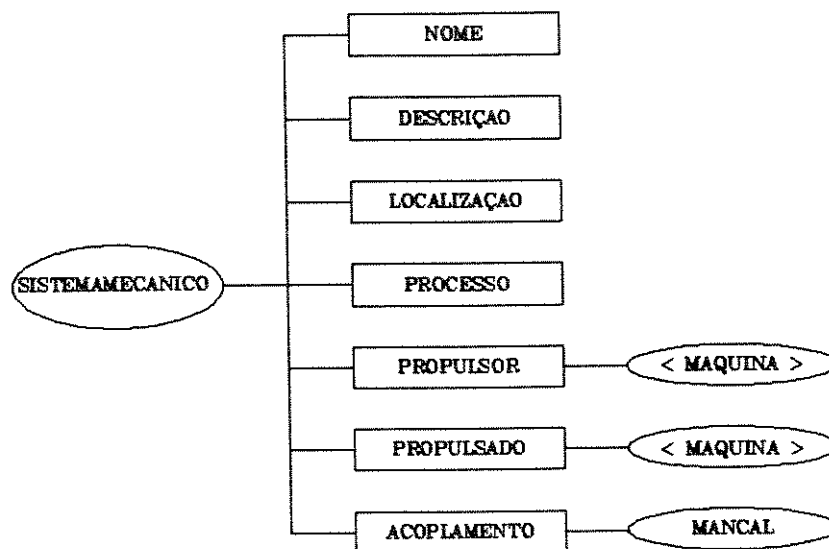


Fig. 5.1) Esquema da classe SistemaMecânico.

A classe **Máquina**, cujo esquema está na figura 5.2, possui um **Nome**, uma **Rotação**, um **Suporte**, e uma relação "tem-um" com a classe **Mancal**. O asterisco na figura 5.2 significa que podem existir várias instâncias de **Mancal** ligadas a uma instância de **Máquina**. As cinco máquinas especificadas serão sub-classes de **Máquina**.

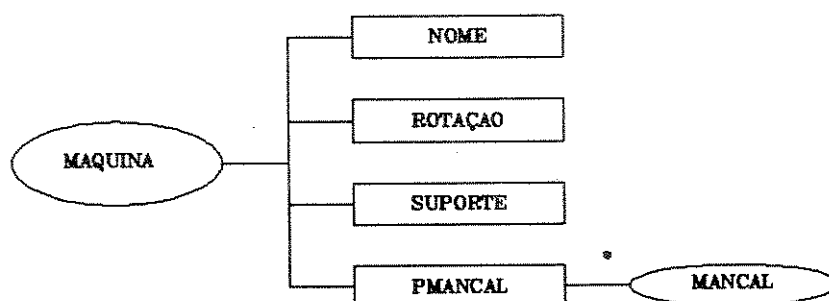


Fig. 5.2) Esquema da classe Máquina.

As classes **Propulsor** e **Propulsado** foram criadas como uma classe virtual, constituindo um passo intermediário para caracterizar os diversos tipos de máquinas possíveis. Possuem apenas uma relação com uma das sub-classes de **Máquina**, respectivamente **MotorElétrico** ou **TurbinaVapor**, para a classe **Propulsor**, e **GeradorElétrico** ou **Ventilador** ou **Compressor** para a classe **Propulsado**. A interdependência entre essas classes está representada na figura 5.4, e os esquemas das sub-classes de **Máquina** estão nas figuras 5.5 e 5.6.

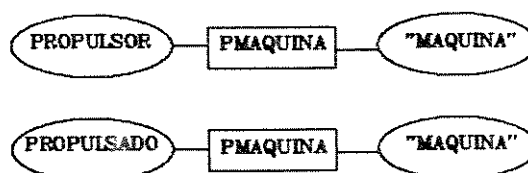


Fig. 5.3) Esquemas das classes Propulsor e Propulsado.

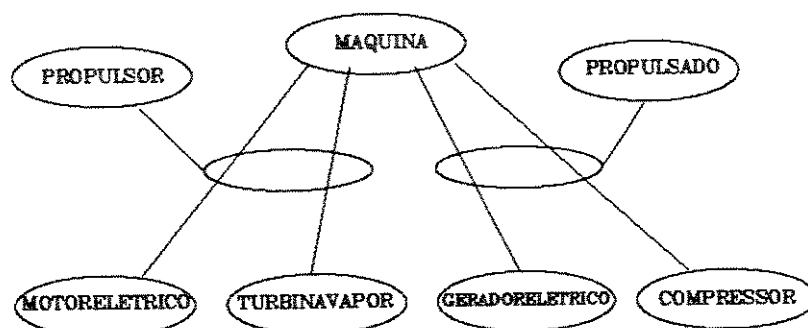


Fig.5.4) Relações entre as classes que representam as máquinas especificadas para o sistema.

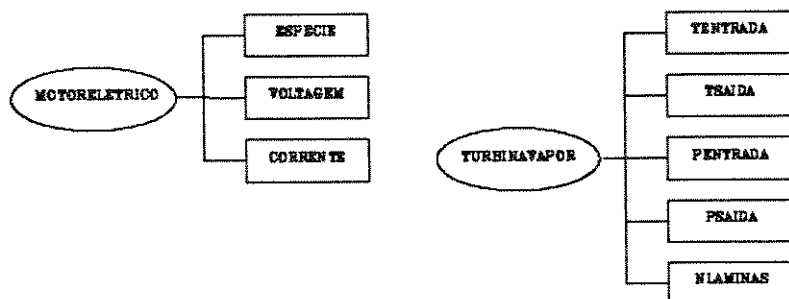


Fig. 5.5) Esquemas dos propulsores sub-classes de Máquina.

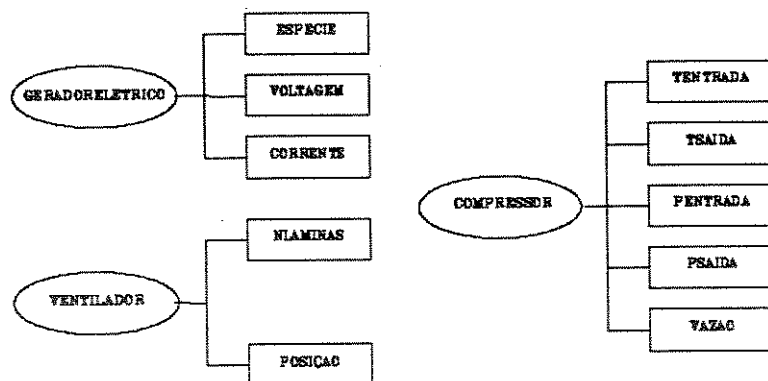


Fig. 5.6) Esquemas dos propulsados sub-classes de Máquina.

Para o **Acoplamento** há necessidade de se identificar o **Tipo**, e a **Razão** de rotação entre as máquinas acopladas. O seu esquema está na figura 5.7. Os tipos do **Acoplamento** já foram definidos nessa seção. A propriedade **Sub-Tipo** apenas possui significado para o acoplamento por **Engrenagem**, que pode ser **DentesRetos**, **Helicoidal** ou **EspinhaPeixe**. A classe **Acoplamento** pode possuir a relação "tem-um" com **Mancal**, quando houver um mancal no acoplamento modelado.

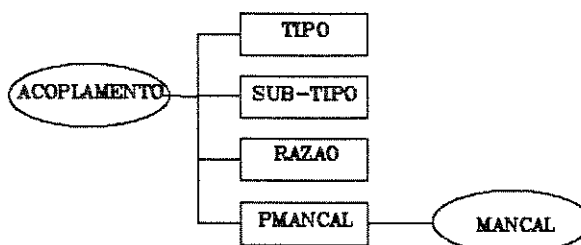


Fig. 5.7) Esquema da classe Acoplamento.

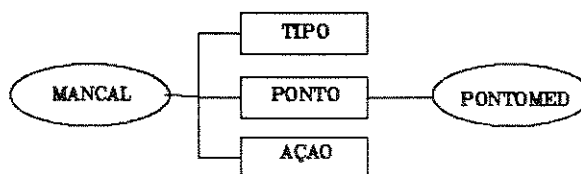


Fig. 5.8) Esquema da classe Mancal.

Para a classe **Mancal** são necessárias as propriedades relativas ao **Tipo**, se **Rolamento** ou **Escorregamento**, e à **Ação**, se **Radial**, **Axial** ou **Mista**, e a relação "tem-um" com a classe **PontoMedição**. Seu esquema está na figura 5.8.

A classe **PontoMedição** representa cada ponto onde podem ser realizadas medições. O esquema de **PontoMedição** está na figura 5.9. Suas propriedades são **Nome**, **Direção** (o plano de medição), o **Período** (tempo entre duas medições consecutivas do mesmo ponto) e **Referência** que são os espectros de referência do ponto. Possui uma relação "tem-um" com a classe **Sensor**, referente ao sensor instalado nesse ponto de medição, e a relação "usa-o" com a classe **Método**.

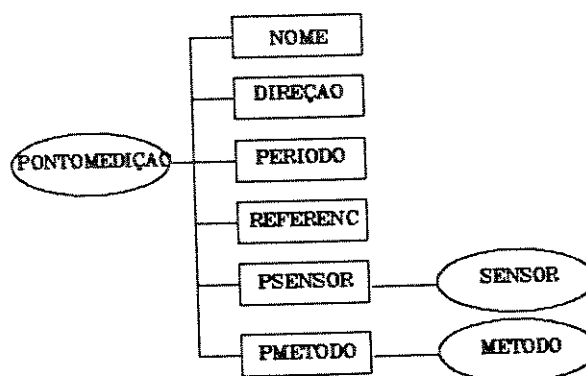


Fig. 5.9) Esquema da classe PontoMedição.

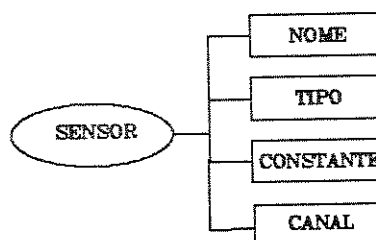


Fig. 5.10) Esquema da classe Sensor.

O esquema da classe **Sensor**, apresentado na figura 5.10, possui como propriedades **Nome**, **Tipo**, **Constante**, resultante da curva de calibração do sensor respectivo, e **Canal**, indicativo do canal físico do sistema de aquisição de dados a que o ponto de medição está associado.

A classe **Método** contém a definição dos parâmetros que serão usados para a realização das medições e a especificação do algoritmo para o cálculo dos espectros respectivos. A figura 5.11 apresenta o esquema da classe **Método**. Suas propriedades são **Nome**, **FaixaFrequência**, **NPontos** (indicando o número de pontos a ser colhido na amostra) e **Algoritmo** (indicando o processamento dos sinais adquiridos).

Para monitorar e analisar um sistema mecânico qualquer o primeiro passo é criar as instâncias dessas classes, estabelecendo-se assim o conhecimento estático da rede semântica respectiva. Para o conhecimento dinâmico, há necessidade das classes que representam a metodologia de medição e análise dos dados, apresentadas no próximo capítulo.

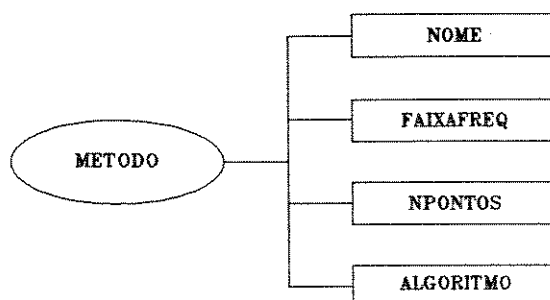


Fig. 5.11) Esquema da classe Método.

5.3 ELEMENTOS DA REDE SEMÂNTICA

As seguintes classes básicas foram desenvolvidas para permitirem a construção de redes semânticas, implementando os conceitos apresentados na seção 5.1:

- Classe;
- Instância;
- Propriedade;
- Exemplar;
- Relação;
- Ocorrência;
- Conjunto;
- Valor;
- Operador.

As classes básicas foram desenvolvidas em linguagem de programação orientada a objetos (C++) [Strastrup, 84] [Hu, 89], e constituem a interface entre ela e as classes do sistema definidas na seção anterior. São portanto classes compiladas. A implementação da rede faz uso apenas dessas estruturas e de seus métodos, criando em tempo de execução as classes do sistema. Uma instância de uma classe básica corresponde ao conceito desse termo na área de programação por objetos. Para evitar dubiedade, em todos os desenhos as classes básicas serão representados por círculos e no texto será utilizado sempre o seu nome em *itálico*. Assim, sempre que o texto se referir a uma instância de classe básica, estará implícita uma instanciação por objeto, conforme C++. Instâncias das classes do sistema referentes ao modelo do conhecimento, são instâncias da classe básica *Instância*, no sentido objeto. As classes do sistema por sua vez são instâncias no sentido objeto da classe *Classe*. As classes básicas serão apresentadas nas seções seguintes.

5.3.1 A Classe *Classe*

O conceito de "classe" já foi apresentado na seção 5.1. Uma classe consiste na descrição de um conceito através de um conjunto de propriedades. Compreende também um conjunto de métodos, e de relações que possam ocorrer entre classes.

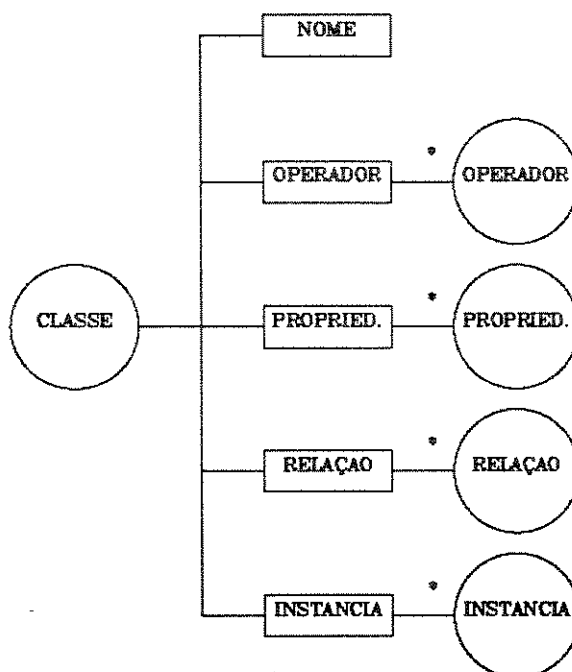


Fig. 5.12) Esquema da classe *Classe*.

Uma classe do sistema é portanto uma instância da classe *Classe*. A figura 5.12 apresenta o esquema da classe *Classe*, que possui listas de propriedades, de relações, de operadores e de suas instâncias ativas na memória. Os *Operadores* permitem implementar os métodos da classe. O esquema de *Propriedade* será apresentado na seção 5.3.3, e o de *Relação* na seção 5.3.5. A figura 5.13 apresenta um desenho de duas classes com a relação "sub-de", *Classe_1* e *Classe_2*. Através dessa conexão as propriedades, relações e operadores de *Classe_1* são acessados pela *Classe_2*. A relação *Rela3* da lista respectiva da *Classe_2* corresponde assim à relação "sub_de".

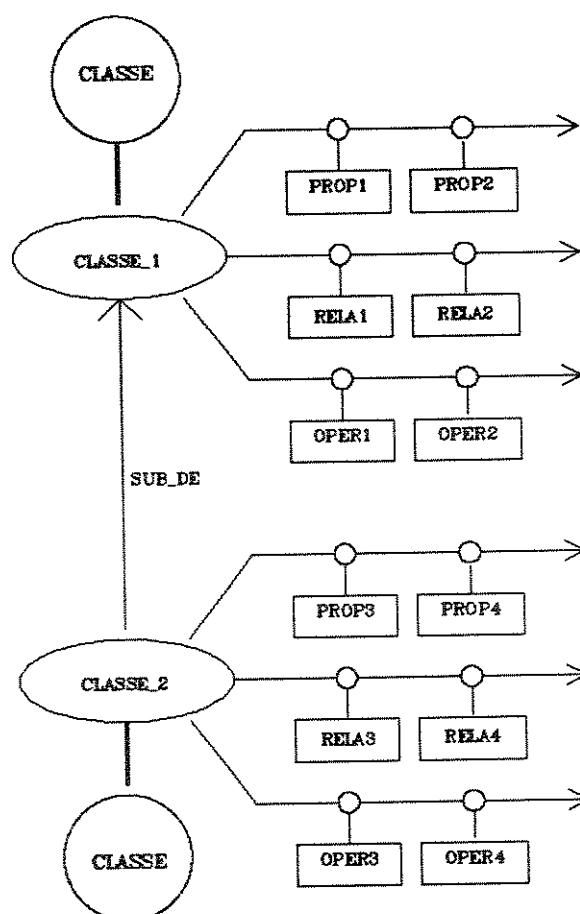


Fig. 5.13) Relação de hereditariedade entre classes.

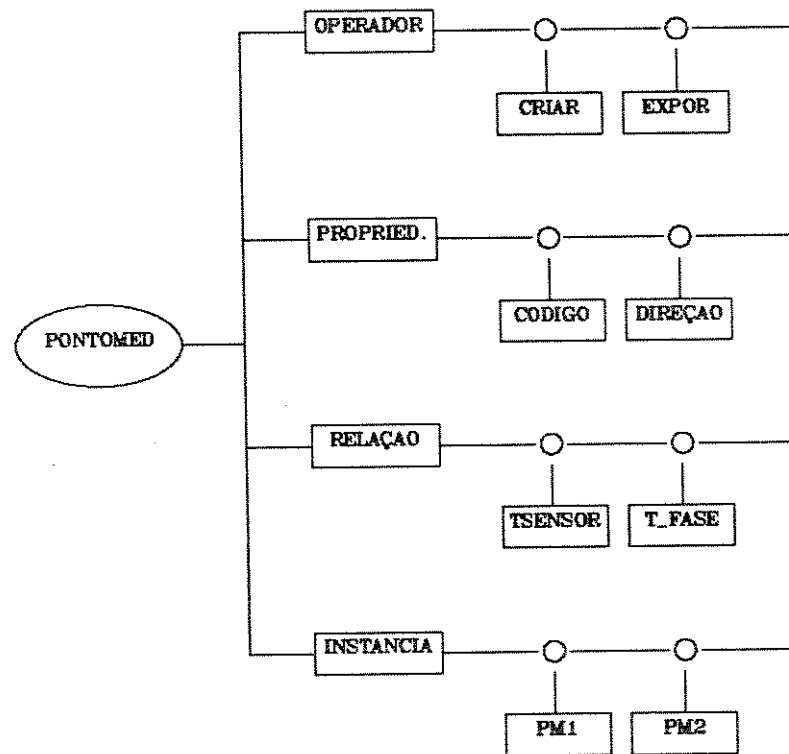


Fig. 5.14) Exemplo de uma classe do sistema.

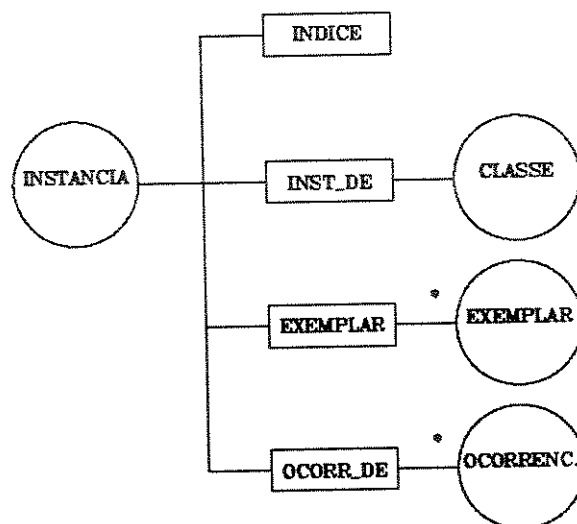


Fig. 5.15) Esquema da classe Instância.

Um exemplo de classe do sistema, uma definição parcial da classe *PontoMedição*, instância da classe *Classe*, está na figura 5.14. Estão representados os operadores "Criar" e "Expor", as propriedades "Código" e "Direção", as relações "tem_um" e "tem_fase_com", e duas instâncias, PM1 e PM2.

5.3.2 A Classe Instância

A classe *Instância*, cujo esquema está na figura 5.15, consiste em seu nome, um ponteiro para a sua classe, uma lista de exemplares e uma lista de ocorrências. Uma instância de uma classe do sistema corresponde a uma instância de *Instância*, criada de acordo com o esquema da classe, ou seja, seguindo a lista de propriedades e a lista de relações nele estabelecidas. Isso pode ser visto na figura 5.16, onde para cada propriedade da classe existe um exemplar na instância, e para cada relação existirá uma ocorrência, respectivamente instâncias das classes *Exemplar* e *Ocorrência*, apresentadas nas seções 5.3.4 e 5.3.6.

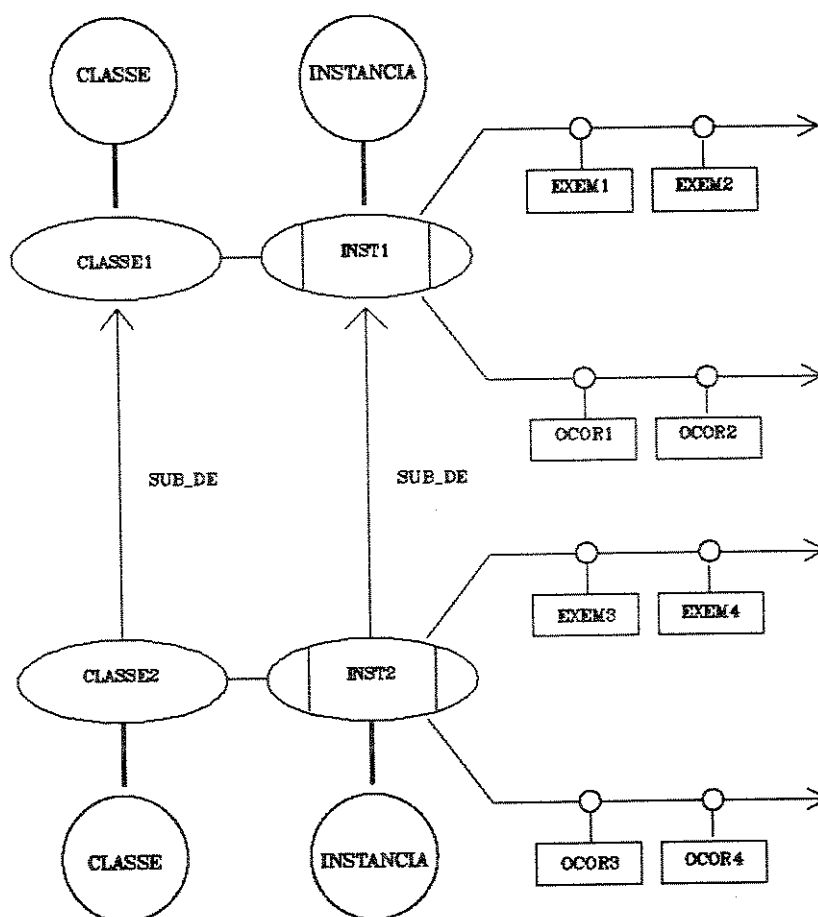


Fig. 5.16) Relação entre uma classe, sub-classe e instâncias.

5.3.3 A Classe *Propriedade*

A classe *Propriedade* está representada na figura 5.17, possuindo um nome, um tipo e o ponteiro de uma função a ser utilizada para avaliar o seu valor. Possui ainda um domínio, representado por uma instância da classe *Conjunto*, e uma lista de exemplares. O objetivo da classe *Propriedade* é gerar propriedades que participarão da definição de uma classe.

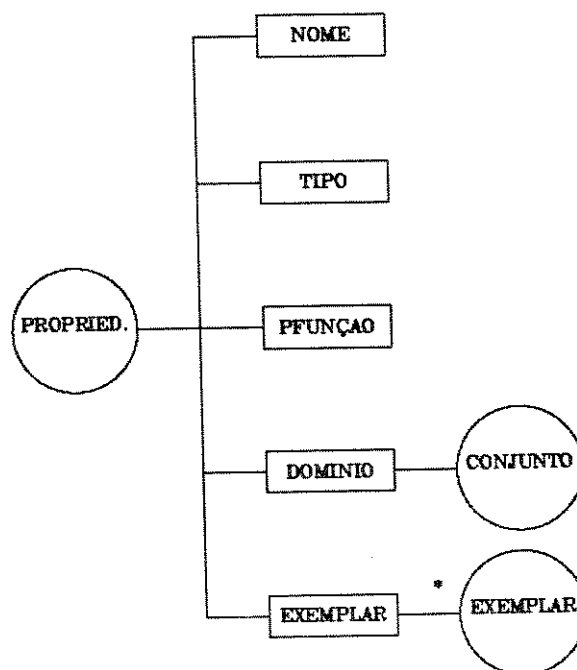


Fig. 5.17) Esquema da classe *Propriedade*.

5.3.4 A Classe *Exemplar*

A classe *Exemplar* está representada na figura 5.18, e consiste basicamente em um ponteiro para uma instância da classe *Valor*. Instâncias dessa classe estarão associadas a instâncias da classe *Instância*. Para cada propriedade constante da lista de uma classe do sistema existirá uma instância de *Exemplar* na instância da classe. A figura 5.19 apresenta uma ilustração da relação entre essas quatro classes. A classe *Classe_1* possui como uma de suas propriedades um "Código", instância de *Propriedade*. Uma instância de *Classe_1* possui como exemplar o código "Cod_1".

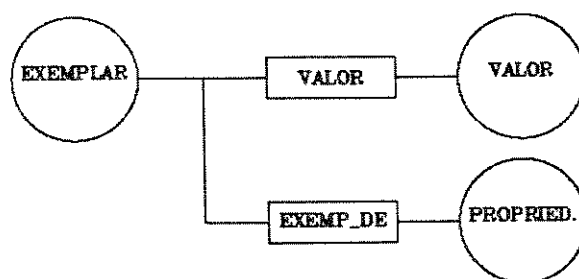


Fig. 5.18) Esquema da classe *Exemplar*.

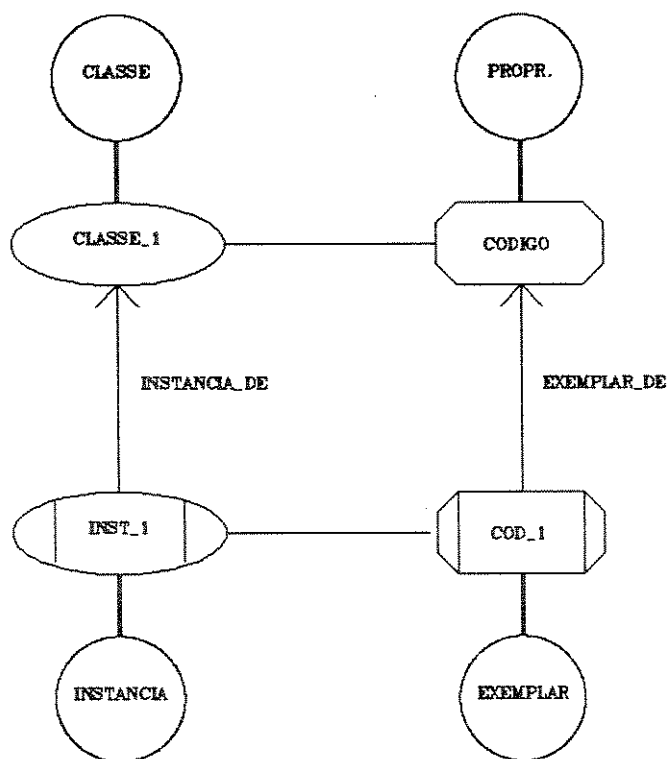


Fig. 5.19) Estrutura entre as classes *Propriedade* e *Exemplar*.

5.3.5 A Classe Relação

A classe *Relação*, representada na figura 5.20, é utilizada para estabelecer vínculos entre classes, sendo parte da declaração de uma das classes. Seu esquema possui um ponteiro para a segunda classe, uma lista de ocorrências e

duas cadeias de caracteres, as quais permitem a leitura da relação nos dois sentidos. Assim, a relação "sub_de" representada na figura 5.16 corresponde à cadeia "ativo", e "super_de" à cadeia "passivo".

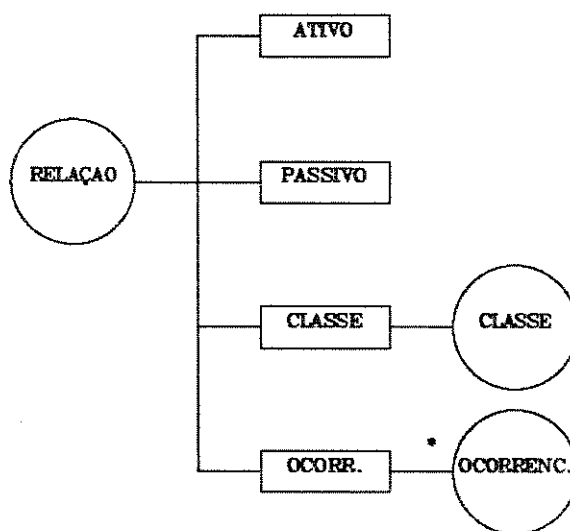


Fig. 5.20) Esquema da classe Relação.

5.3.6 A Classe Ocorrência

A classe *Ocorrência*, cujo esquema está na figura 5.21, complementa a classe *Relação* no mesmo sentido em que a classe *Exemplar* complementa *Propriedade*. Ou seja, para cada *Relação* existente na lista da classe, existirá uma instância de *Ocorrência* para as instâncias da classe. Necessita assim de três ponteiros: para a instância da primeira classe, nomeada "agente", para a instância da segunda classe nomeada "receptor" e para a *Relação* de quem é ocorrência. A figura 5.22 ilustra a dependência entre as classes *Relação*, *Ocorrência*, *Classe* e *Instância*. A *Relação* "sub_de" entre as classes do sistema *MotorElétrico* e *Máquina*, instâncias da classe *Classe*, implica em que o motor elétrico ME1, instância da classe *Instância* e da classe *MotorElétrico*, possui a *Ocorrência* OC1 com a instância de *Máquina* nomeada como PR1.

As demais classes básicas, *Valor*, *Conjunto* e *Operador* são necessárias à implementação das redes semânticas, porém não apresentam conceitos novos e são bastante simples, portanto não serão aqui apresentadas.

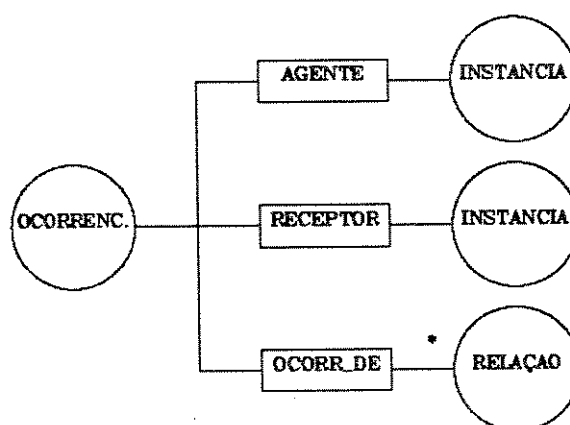


Fig. 5.21) Esquema da classe Ocorrência.

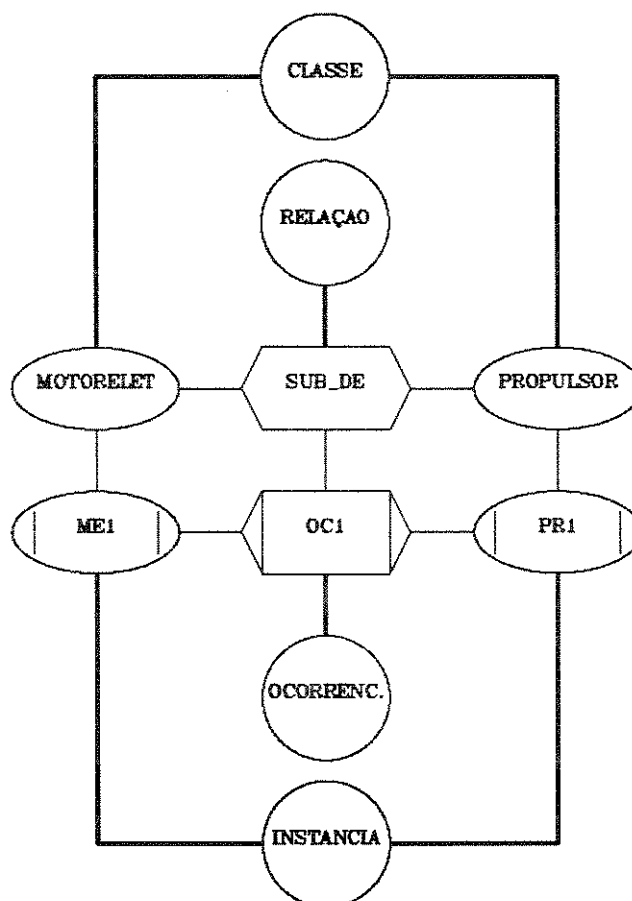


Fig. 5.22) Estrutura entre as classes Relação e Ocorrência.

5.3 EXEMPLO DA REDE SEMÂNTICA

As definições das classes do sistema foram apresentadas na seção 5.2.2, onde consta a classificação das máquinas e seus componentes. Seguindo essas definições, um turbo-gerador a vapor com acoplamento por caixa de redução vai apresentar o grafo da figura 5.23, onde as elipses simbolizam instâncias das seis classes listadas na parte inferior da figura, e os arcos representam as relações.

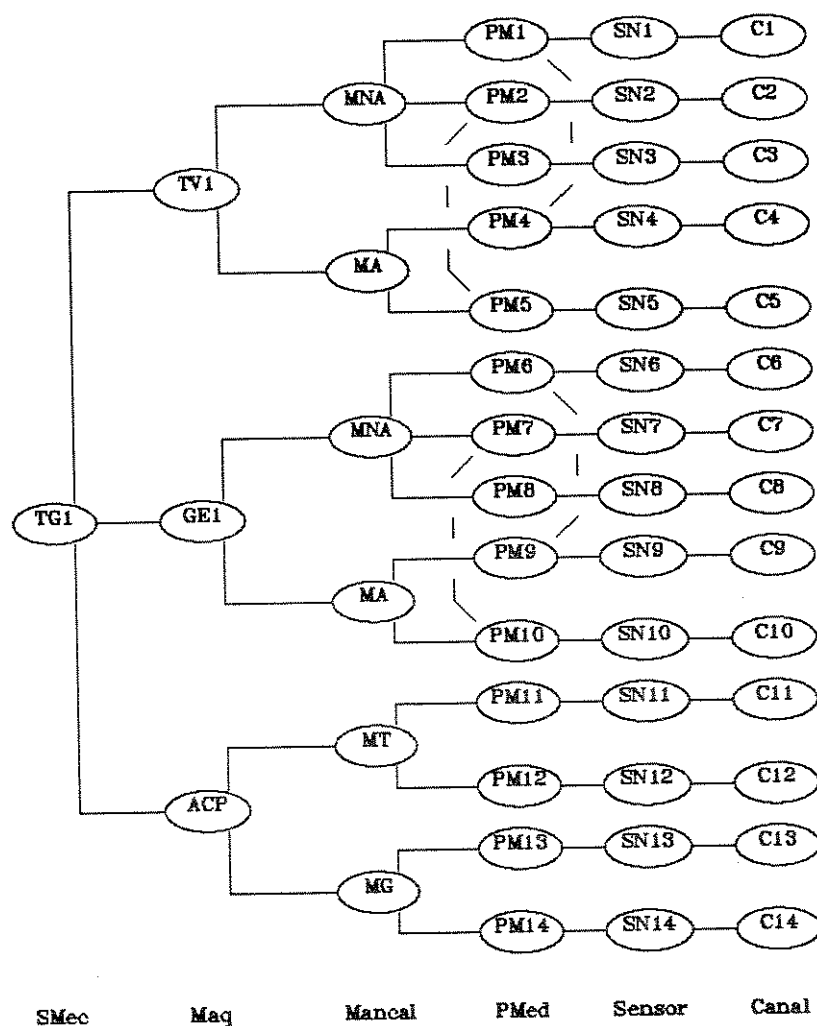


Fig. 5.23) Grafo das Relações em Turbo-Gerador com redução.

Na figura 5.24 está representada uma parte da rede semântica do turbo-gerador em maior nível de detalhamento. Observe-se que existem cinco relações diferentes e treze ocorrências dessas relações. A Relação R5 corresponde ao ativo "tem fase com", onde fica explicitado por exemplo que o ponto de medição PM1 permite uma análise de fase com o ponto PM4, e o ponto PM2 com PM5.

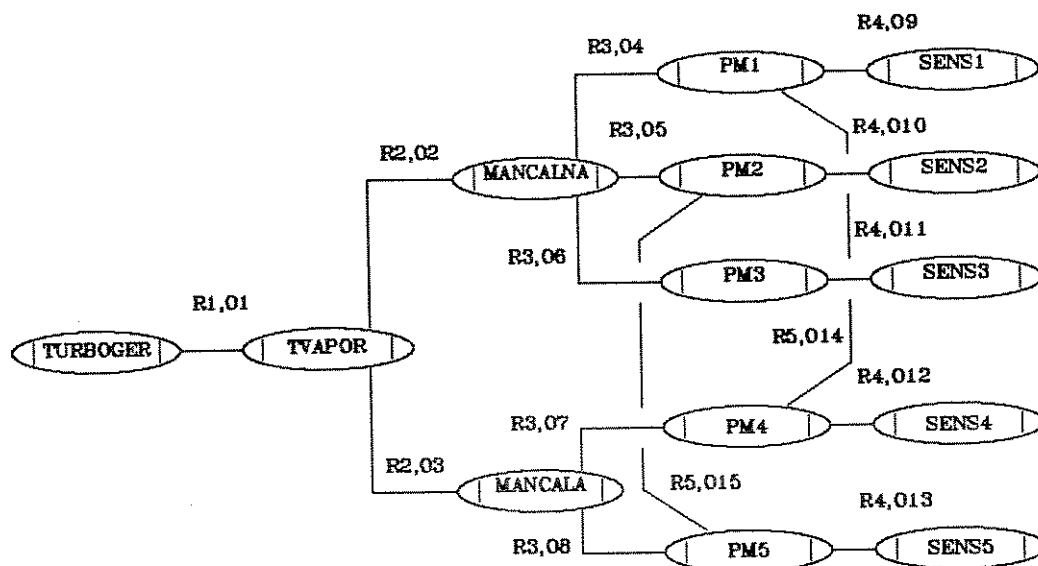


Fig. 5.24) Representação parcial da rede semântica anterior.

CAPÍTULO 6

REDE DE INFERÊNCIA PARA O DIAGNÓSTICO

6.1 Modelamento das Classes Dinâmicas

6.2 Elementos da Rede de Inferência

6.2.1 Sintomas, Diagnósticos e Regras

6.2.2 Classes Básicas da Rede de Inferência

6.2.2.1 A Classe *Neuron*

6.2.2.2 A Classe *Sinapse*

6.2.2.3 A Classe *Transdutor*

6.2.2.4 A Classe *Bloco*

6.2.3 Representação de uma Regra

6.2.4 Representação dos Sintomas

6.2.5 Representação dos Diagnósticos

6.3 Procedimento Estratégico Global

Nesse capítulo serão apresentados os esquemas das classes dinâmicas que modelam os conceitos da metodologia. São essas classes que controlam a aquisição e análise dos dados. Para possibilitar o procedimento de raciocínio que conduz aos diagnósticos foram desenvolvidas as classes que implementam os mecanismos de inferência. Serão apresentados também os procedimentos dinâmicos para a determinação de estratégias de monitoramento e diagnóstico.

6.1 MODELAMENTO DAS CLASSES DINÂMICAS

As classes dinâmicas são aquelas envolvidas com a evolução do conhecimento, ou seja, relacionadas com os procedimentos de aquisição e interpretação dos dados. São necessárias oito classes para completar o modelo do conhecimento do sistema. São elas:

- Avaliação;
- Análise;
- Sintoma;
- Diagnóstico;
- AvalDiagnóstico;
- Providência;
- Interpretação;
- Episódio.

Essas classes e seus esquemas serão apresentadas a seguir, seguindo-se a mesma convenção para os desenhos do capítulo anterior. Uma vez que as classes dinâmicas apresentam apenas relações de composição, conforme será visto, elas foram implementadas diretamente na linguagem de programação, com a relação correspondendo apenas a um ponteiro para a instância da outra classe. No entanto, a apresentação dos esquemas é igual a das classes estáticas, permitindo assim que possam fazer uso mais tarde das classes semânticas, se necessário.

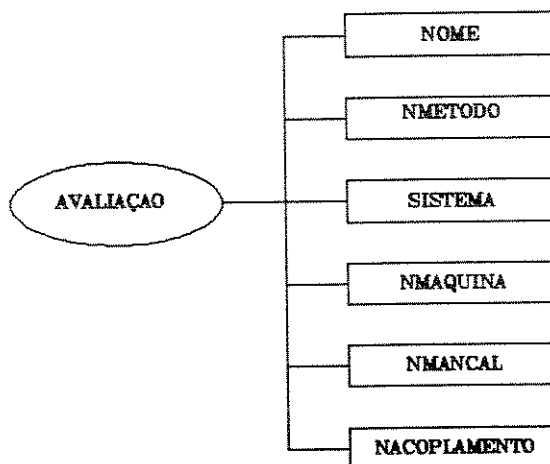


Fig. 6.1) Esquema da classe Avaliação.

A classe **Avaliação** está relacionada a cada medição realizada, e à avaliação do estado do ponto respectivo. Assim, uma instância da classe **Avaliação** consiste na aplicação de um método a um ponto de medição, definido na rede semântica como pertencente a um mancal de uma máquina ou de um acoplamento. O seu esquema está na figura 6.1. As propriedades respectivas são o **Nome**, **NMétodo** (nome do método usado), **Sistema** (sistema mecânico onde foi realizada a medição), **NMáquina** (máquina onde foi realizada a medição), **NMancal** (mancal onde foi realizada a medição), e **NAcoplamento** (quando a medição foi realizada no mancal de um acoplamento).

A classe **Análise** corresponde à análise realizada em decorrência de uma avaliação de estado. Compreende assim uma relação "tem-uma" com a classe **Avaliação**, a propriedade **Estado**, referente ao estado do ponto onde foi realizada a medição, e uma outra relação com a classe **AvalDiagnóstico**. A classe **AvalDiagnóstico** por sua vez corresponde à realização de um procedimento de determinação de diagnóstico. Assim, apenas se o estado de uma análise, decorrente da instância de **Avaliação** respectiva, for considerado anormal, é que será criada uma instância de **AvalDiagnóstico**. A classe **AvalDiagnóstico** compreende uma lista de instâncias de **Sintoma** e outra de instâncias de **Diagnóstico**, ambas através da relação "tem-uma". Os esquemas de **Análise** e **AvalDiagnóstico** estão na figura 6.2.

A classe **Sintoma** corresponde aos sintomas encontrados ao longo do procedimento de diagnóstico. O esquema respectivo está na figura 6.3, e compreende as propriedades **Nome**, **Atributo** e **Valor**. A classe **Diagnóstico** é bastante semelhante, possuindo as mesmas propriedades. O esquema está também na figura 6.3. A seção 6.2.1 esclarece melhor esses esquemas.

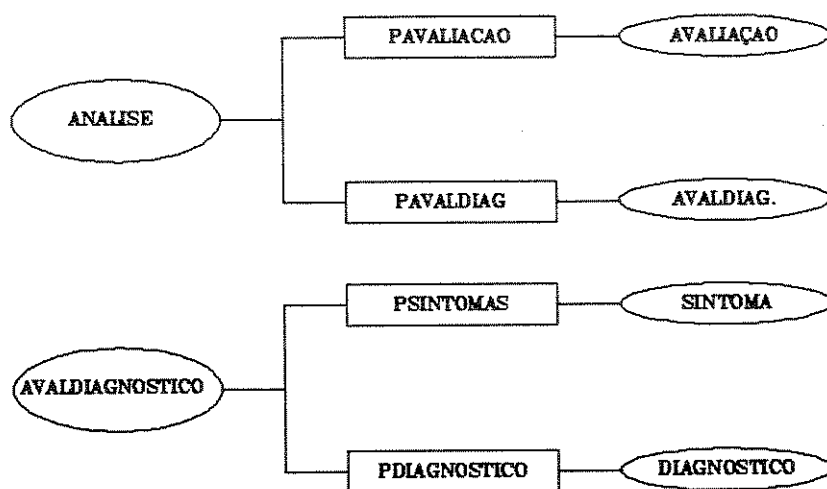


Fig. 6.2) Esquema das classes Analise e AvalDiagnóstico.

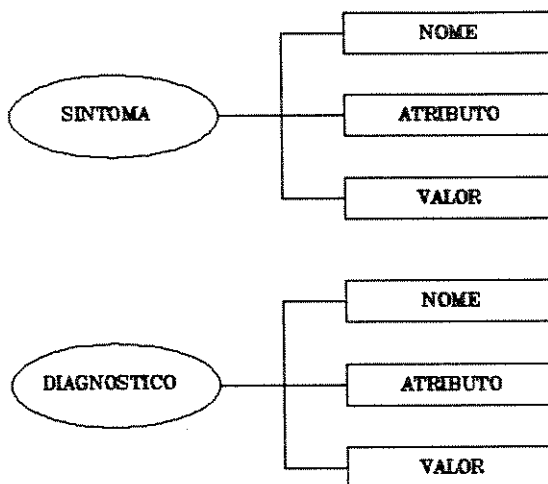


Fig. 6.3) Esquema das classes Sintoma e Diagnóstico.

A classe **Providência** representa as providências que serão sugeridas como resultado da determinação de diagnósticos e da avaliação da gravidade do problema. Observe-se que só haverá uma instância de **Providência** se o estado do sistema for anormal. A figura 6.4 apresenta o esquema respectivo, onde constam as seguintes propriedades: **Alerta** é o dia em o sistema entrou nesse estado; **Alarme** é o dia previsto para entrar nesse estado, ou o dia em que entrou; **Emergência** é também o dia previsto ou em que entrou no estado respectivo; **Sugestão** é a providência sugerida para a correção dos problemas; **Resultados** é um texto sobre observações realizadas após as providências.

A classe **Interpretação** é responsável pela integração de todas essas informações, tendo relações "tem-um(a)" com as classes **Análise**, **Diagnóstico** e **Providência**. Enquanto uma instância de **Análise** é relativa a um único ponto de medição, uma instância de **Interpretação** engloba todos os pontos de medição de um sistema mecânico. Assim, possui uma lista de análises, uma para cada ponto. A instância de **Diagnóstico** desse nível corresponde aos diagnósticos selecionados entre todas as análises como os mais adequados para o sistema mecânico como um todo, selecionados entre os diagnósticos de cada ponto através de um método específico. A providência sugerida será baseada nessa instância de **Diagnóstico**. A figura 6.5 apresenta o esquema da classe **Interpretação**.

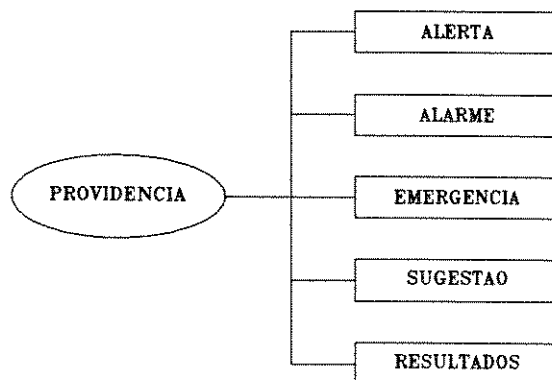


Fig. 6.4) Esquema da classe Providência.

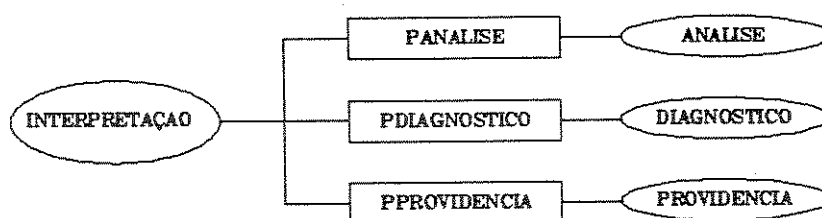


Fig. 6.5) Esquema da classe Interpretação.

A classe **Episódio** é responsável pela inclusão em um único episódio das diversas instâncias de **Interpretação**, ou seja procedimentos globais de análise e diagnóstico realizados em oportunidades diferentes. A classe **Episódio** possui como propriedades **Nome**, **Estado** (que representa o estado do sistema mecânico envolvido), e uma lista de instâncias de **Interpretação**, através da relação "**tem-uma**". A figura 6.6 apresenta o esquema respectivo.

6.2 ELEMENTOS DA REDE DE INFERÊNCIA

A rede de inferência para a determinação de diagnóstico pode ser vista como um módulo que, a partir de um conjunto de sintomas, fornece um conjunto de diagnósticos como resultado da aplicação das regras. Esses três elementos e suas relações serão analisados a seguir, buscando-se caracterizar classes a serem implementadas para estruturar as redes de inferência.

6.2.1 Sintomas, Diagnósticos e Regras

Um sintoma, conforme exposto na seção 6.1 consiste em uma tripla (Nome.Atributo.Valor). Os seguintes sintomas são decorrentes do conhecimento estruturado no capítulo 3:

- ConstituiçãoFísica.Propulsor.(MáquinaElétrica, Turbina-Vapor);
- ConstituiçãoFísica.Propulsado.(GeradorElétrico, Compressor, Ventilador);
- ConstituiçãoFísica.Mancal. (Rolamento, Escorregamento);
- ConstituiçãoFísica.Suporte. (EntreMancais, EmBalanço);
- Parâmetros.FaixaFreq.(SubH, Baixa, Média, Alta);
- Parâmetros.Direção.(Horizontal, Vertical, Axial);
- Pico.Estado.(Normal, Alerta, Alarme, Emergência) X (N1, N2, N3, FIHR, FRol, FSuH, FMeR, FTeR, FOil, FRes, FCor, FCo2, SN1, FRCo, FEg3, FEg2, FEng, FLam, Fale, L1, L2, FRan, FRaD, FEst);
- Pico.Fase.(Nula, NNulla, Oposta);
- Pico.Estabilidade. (Estável, Crescente, Decrescente, Flutuante);
- Pico.Lobos.(Existem, NExistem);
- Pico.DeltaF.(REAL);
- Pico.Formato.(Único, Duplo, Triplo, Múltiplo);
- Pico.Banda.(Estreita, Média, Larga);
- Pico.Amplitude.(REAL);
- Pico.Crescimento.(REAL).

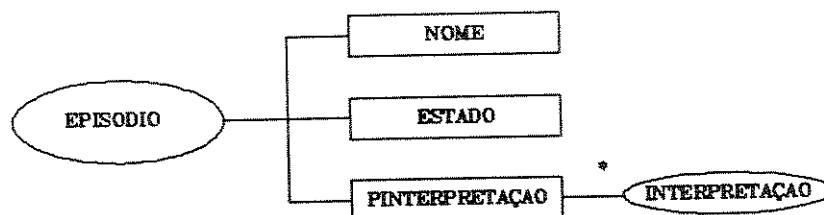


Fig. 6.6) Esquema da classe Episódio

Os sintomas referentes ao estado dos picos são diferentes dos demais porque necessitam de uma quádrupla para sua representação, e não de uma tripla, uma vez que os valores de seus atributos correspondem ao produto dos conjuntos dos estados e das frequências. Para solucionar esse problema particular, será criada uma representação onde o valor de um sintoma pode ser uma dupla. Observa-se ainda que, em alguns dos sintomas apresentados, Pico.Amplitude por exemplo, os seus valores possuem como domínio o conjunto dos números reais, o que está indicado no texto entre parênteses.

Os seguintes diagnósticos apresentados na seção 3.1.1, também uma tripla Nome.Atributo.Valor, serão considerados:

- Diagnóstico.(DiagBásico, DiagInicial, DiagIPossível, DiagInadequado).(Desbalanceamento, Desalinhamento, FolgaMecânica, PMancalRolamento, PMancalEscorregamento, ProblemaCorreia, Problema-Engrenagem, ProblemaOperação, PMáquinaElétrica);
- Diagnóstico. (DiagDPossível, DiagDIFF, DiagPossível, DiagIFF, DiagIDS, DiagIFFDS, DiagProvável, DiagPIFF, DiagPIDS, DiagPIFFDS, DiagMProvável) . (DbEst, DbDin, ExCur, AcEmp, DlPar, DlAng, FolNR, PMRol, FolEx, RoRot, Toleo, CorT, PolDb, PolDl, ResCo, TranI, PSinc, PrLam, TFlui, ExEst, ExDin, PLEst, PrEst).

As regras estarão agrupadas pelos níveis apresentados na seção 3.2, conforme exposto abaixo:

- Regras.R1.(RDb1.1, ..., RD11.1, ...RME1.1, ...);
- Regras.R2.(RDb2.1, ..., RD12.1, ...RME2.1, ...);
- Regras.R3.(RDb3.1, ..., RD13.1, ...RME3.1, ...);
- Regras.R4.(RDb4.1, ..., RD14.1, ...RME4.1, ...);
- Regras.R5.(RDb5.1, ..., RD15.1, ...RME5.1, ...);
- Regras.R6.(RDb6.1, ..., RD16.1, ...RME6.1, ...);
- Regras.R7.(RDb7.1, ..., RD17.1, ...RME7.1, ...);

A regra RDb1.1 corresponde à primeira regra de desbalanceamento do primeiro nível, RD17.1 à primeira de desalinhamento do sétimo nível, etc. Assim, para cada nível existe um conjunto de regras para cada tipo de diagnóstico básico. O conteúdo das regras necessariamente deve refletir o conhecimento estruturado na seção 3.1, onde consta a matriz de sintomas e diagnósticos.

6.2.2 Classes Básicas da Rede de Inferência

Considerando-se portanto as informações que deverão ser processadas pela rede, onde os sintomas atuam como entradas, os diagnósticos como saídas e as regras vão determinar a estrutura interna da rede de inferência, conclui-se que há necessidade dos seguintes elementos constituintes:

- entradas na rede representando os sintomas;
- saídas representando os diagnósticos e ações;
- unidades básicas de processamento;
- conexões entre essas unidades.

As entradas e saídas funcionam como elemento de conexão entre a rede de inferência e a rede semântica, executando as seguintes funções:

- transformando uma informação da rede semântica em símbolos a serem processados pela rede de inferência;
- buscando na rede semântica uma informação necessária ao andamento dos processos de inferência;
- transformando uma conclusão atingida pela inferência em módulos da rede semântica;
- executando ações que tenham sido solicitadas pela rede de inferência em consequência de regras verificadas.

Para a implementação da rede de inferência englobando essas funções foram desenvolvidas as seguintes classes básicas:

- Neuron;
- Sinapse;
- Transdutor;
- Bloco.

Essas classes constituem respectivamente a célula básica de processamento das informações, as conexões entre esses módulos, os elementos de entrada e saída e o seu agrupamento em blocos. Elas serão detalhadas nas próximas seções.

6.2.2.1 A Classe Neuron

A classe *Neuron* constitui o elemento estrutural básico, determinando o processamento de todas as informações da rede de inferência. Nós da rede, instâncias de *Neuron*, possuem conteúdo semântico através de associação a uma propriedade e respectivo exemplar da rede semântica, ou seja um **fato**, refletindo um sintoma, um diagnóstico, uma regra, ou uma operação lógica entre fatos. Foram adotados aqui por conveniência alguns termos característicos das células cerebrais, uma vez que refletem muito bem os conceitos tratados. Esses termos serão explicitados a seguir, no sentido utilizado nesse texto.

Um *Neuron* é formado basicamente por três partes:

- Dendritos;
- Núcleo;
- Axons.

Os *Dendritos* representam a entrada de informações, o *Núcleo* o conteúdo semântico do neurônio ou o seu tipo de processamento, e os *Axons* a saída de informações. As ligações entre os *Neurons* são realizadas através das *Sinapses*, o que será explicado na próxima seção.

A evolução do processo de inferência ocorre através do "disparo" de sequências de neurônios interligados. Para avaliar se um neurônio deve ser disparado, os sinais (que significam a evolução de informações obtidas da rede semântica) existentes em seus dendritos serão processados através de uma função típica do neurônio em questão. O resultado do processamento será transmitido através de seus axons a todos os demais neurônios aos quais o primeiro esteja ligado. Todos os sinais da rede desenvolvida são binários, ou seja, apenas podem assumir os valores verdadeiro ou falso, implementando-se assim uma lógica booleana. Fatores de certeza podem ser incluídos mais tarde, sem alterações básicas na estrutura.

Por uma questão de eficiência computacional, as classes envolvidas com a inferência serão implementadas diretamente na linguagem de programação. A declaração simplificada da estrutura da classe *Neuron* está apresentada a seguir, e compreende uma instância da classe *Núcleo*, herdada através da relação de subclasse, e ponteiros para uma instância de *Dendritos* e uma de *Axons*. A estrutura dessas três classes estão também apresentadas.

```
Classe Neuron : Subclasse de Nucleo
    Dendritos * pDen;
    Axons      * pAxn;
```

```
Classe Núcleo : Subclasse de Valor
    int      tipo;
```

```
Classe Dendritos
    int      NSinapses;
    Sinapses * pSin;
```

```
Classe Axons
    int      NSinapses;
    Sinapses * pSin;
```

A classe *Núcleo* é subclasse de *Valor*, que representa o valor associado ao neurônio. As classes *Dendritos* e *Axons* possuem a mesma estrutura de dados, o número e um ponteiro para suas sinapses, porém seus métodos são diferentes.

A partir dessas estruturas básicas, diversos tipos de neurons serão necessários para a implementação da rede, os quais estão representados na figura 6.7. Todos esses neurons serão declarados como sub-classe do tipo básico. São eles:

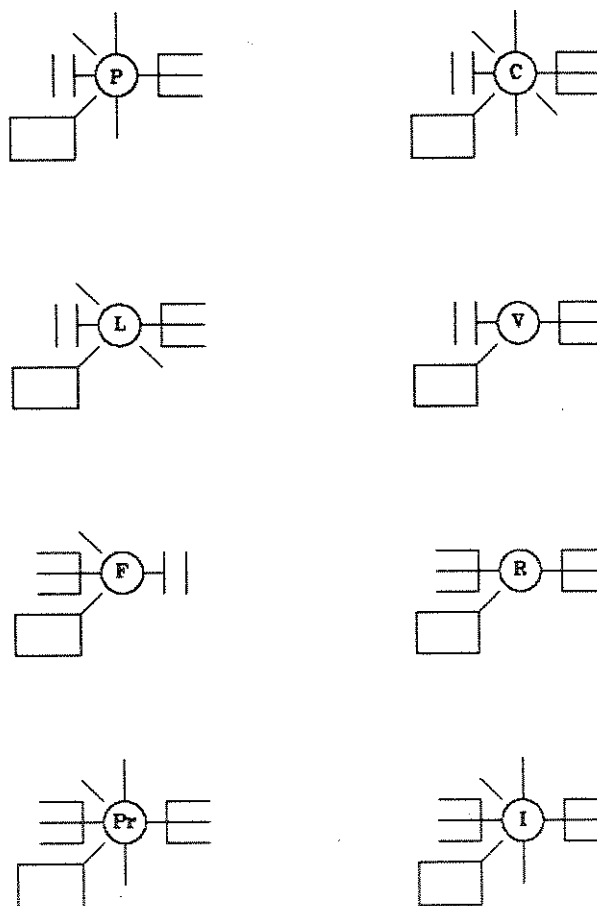


Fig. 6.7) Desenhos simbólicos dos diversos tipos de neurons.

- Primitivos (NeuronP);
- Colunas (NeuronC);
- Linhas (NeuronL);
- Relacionais (NeuronR);
- Valor (NeuronV);
- Função (NeuronF);
- Premissa (NeuronPr);
- Inferido (NeuronI);

Os *Neurons Primitivos* (tipo P) são os nós de entrada na rede, ou seja, aqueles que servem de fonte de dados para os demais. Portanto, não dependem de outros nós para a cálculo de seu valor, o qual deve ser extraído da rede semântica. Prescinde assim de dendritos, e possui ainda um ponteiro para uma instância da classe *Transdutor*, apresentada na seção 6.2.2.3, e um outro para o próximo neuron primitivo de sua lista.

Os *Neurons Coluna* (tipo C) são usados em conjunto com os do tipo L (linha) para representar valores matriciais, ou seja, duplas resultantes do produto de dois conjuntos de valores, como é o caso de *Pico.Estado* apresentado na seção 6.2.1. Um neuron tipo C aponta para o próximo nó coluna, e para um neuron tipo L, o qual apontará para os demais tipo L, assim formando a linha da matriz. Não possuem dendritos, uma vez que são também nós primitivos da rede.

O *Neuron Valor* (tipo V) é útil para estabelecer um valor constante na rede, o qual será usado para comparações com outros valores. Dispensa assim a necessidade de dendritos e de transdutores. Sua estrutura é a mesma do neuron básico, com o ponteiro para dendritos tornado nulo.

O *Neuron Função* (tipo F) representa uma ação que será executada toda vez que ele for disparado, necessitando para tanto de uma conexão de saída para o exterior. Além disso, não possui necessidade de axons, sendo terminal no processo de inferência.

O *Neuron Relacional* (tipo R) aplica as operações de comparação entre seus dendritos (maior do que, menor do que, etc.), além das operações lógicas "E" e "OU". Possui a mesma estrutura do neuron básico.

O *Neuron Premissa* (tipo Pr) possui dendritos e axons, e executa a operação lógica "E" entre os seus dendritos. É usado para a representação de regras. Possui ainda um ponteiro para o neuron Pr seguinte em uma lista.

O *Neuron Inferido* (tipo I) será disparado como resultado de um processo de inferência, executando sempre a operação lógica "OU" entre seus dendritos. Possui uma ligação com um transdutor para informação ao exterior de que foi disparado, o que corresponde a se atingir alguma conclusão.

6.2.2.2 A Classe Sinapse

A classe *Sinapse* possui a função de conectar os neurons entre si. Uma sinapse, instância da classe *Sinapse*, será portanto sempre compartilhada por dois nós da rede. Além disso, uma sinapse guarda a informação de seu estado com três possibilidades, referentes ao neuron a que está ligado por um axon:

- se o neuron foi disparado;
- se o neuron foi avaliado mas não disparado;
- se o neuron ainda não foi avaliado.

Ao ser avaliado um neuron todas as sinapses a ele ligadas pelos axons são acionadas. Dessa forma, o estado de uma rede pode ser visto como o conjunto dos estados de suas sinapses. Ou seja, uma inferência pode ser interrompida e retomada do mesmo ponto, desde que o estado da rede seja salvo e possa ser repostado.

Uma vez que o resultado da avaliação de um neuron qualquer encontra-se armazenado nas sinapses a que está ligado pelos axons, um neuron executa sua operação lógica pesquisando os valores das sinapses de seus dendritos, que assim indicam o estado dos neurons a ele conectados. Existem dois tipos de sinapses: o tipo "verdade" são aquelas que apresentam o valor "verdade" para os neurons cujo resultado de sua avaliação resultou em "verdade"; e o tipo "falso" que apresentam o valor "verdade" quando o neuron resulta em "falso". Dessa forma é implementada a operação lógica de negação. A estrutura da Sinapse compreende assim o tipo, seu estado e ponteiros para dois neurons, o que fica atrás (ligado por um axon), e o que fica à frente (ligado por um dendrito).

As instâncias da classe Sinapse serão representadas por um pequeno retângulo vertical nos desenhos. Quando o seu tipo for "falso", o retângulo apresentará o símbolo "~".

6.2.2.3 A Classe Transdutor

Instâncias da classe *Transdutor* representam os elementos de entrada e saída da rede, estabelecendo a comunicação entre a rede de inferência e o exterior, ou seja a rede semântica. Assim, os sintomas e diagnósticos se comunicam com a rede de inferência através de instâncias de *Transdutor*. Também as regras serão acessadas através de transdutores, o que será esclarecido na seção 6.2.3. Na verdade, serão criadas subclasses de *Transdutor* específicas para sintomas, diagnósticos e regras, de comportamento mais especializado.

Conjuntos de neurons da rede de inferência são agrupados através de uma instância da classe *Transdutor*. O objetivo é manter em uma lista única os diversos neurons que possuam algum relacionamento semântico. Desse modo, táticas podem ser implementadas, com o objetivo de aumentar a eficiência do sistema. Por exemplo, ao se avaliar um neuron primitivo, o qual faz parte de uma lista de neurons ligada a um transdutor, este será acionado para extrair um valor da rede semântica. Na maioria dos casos, o resultado atingido será comunicado pelo transdutor a todos os neurons da lista, que portanto não necessitarão acioná-lo novamente quando chegar o momento de suas respectivas avaliações.

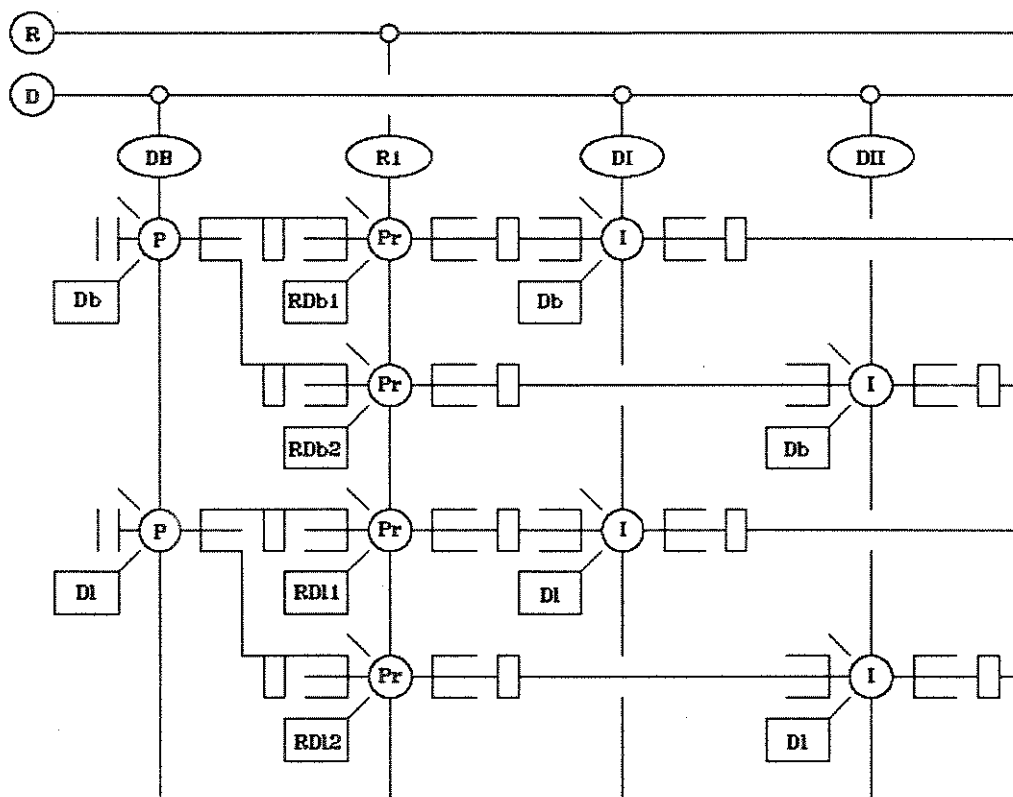


Fig. 6.8) Desenho simbólico parcial da rede de inferência.

A figura 6.8 apresenta um desenho simbólico onde estão representadas diversas instâncias de *Neuron*, *Sinapse* e *Transdutor*. Essa figura será novamente analisada na seção 6.2.3, onde é explicado como é implementada uma regra. Porém pode-se observar que os transdutores, representados por elipses, que correspondem aos diagnósticos e aos conjuntos de regras, possuem diversos neurons interligados. No caso dos diagnósticos os neurons representam respectivamente, as possibilidades de **Desbalanceamento (Db)**, **Desalinhamento (Dl)**, **FolgaMecânica (FM)**, etc. O primeiro neuron ligado ao transdutor que corresponde aos diagnósticos básicos, **DB** na figura 6.8, será disparado caso o desbalanceamento tenha sido selecionado como um dos diagnósticos a serem analisados. Dessa forma, o transdutor **DB** passaria essa informação ao neuron **Db**, o qual seria disparado.

Quanto aos neurons de sua lista, um transdutor de entrada pode ser de dois tipos: inclusivo ou exclusivo. No primeiro caso, em resposta ao acionamento do transdutor, mais de um neuron da mesma lista pode ser disparado (como no exemplo apresentado antes), enquanto no segundo apenas um deles. O primeiro caso, transdutor inclusivo, corresponde por exemplo aos diagnósticos básicos da figura 6.8, uma vez que no mesmo sistema mecânico podem ocorrer simultaneamente vários problemas. Já na lista dos neurons que representam o sintoma **Parâmetros.Direção**, correspondendo à direção do sensor na medição, apenas um dos neurons pode ser dado como verdadeiro, necessitando portanto de um transdutor exclusivo.

A estrutura da classe *Transdutor* apresenta assim um nome, um tipo determinando se é de entrada ou saída, um argumento para indicar se é exclusivo ou inclusivo, um ponteiro para o primeiro neuron da lista e um ponteiro de função. Cada conexão da rede com o exterior será realizada através de instâncias de *Transdutor*, que contêm o ponteiro para a função que será acionada quando assim for requerido. Por exemplo, para o transdutor **Parâmetros.Direção**, será criada uma instância de nome **Direção**, tipo entrada, exclusivo, e passado um ponteiro de uma função que acessará o ponto onde foi realizada a medição que estiver sendo analisada, e retornará o valor de sua direção, instância da classe *Valor*. Esse resultado será repassado ao neuron que realizará a comparação entre esse valor e o de seu núcleo.

6.2.2.4 A Classe Bloco

Os transdutores podem ser agrupados, para efeito de implementar estratégias, em instâncias da classe *Bloco*, cujo único objetivo é conter uma lista de transdutores que possuem uma associação semântica. Assim, **Parâmetros** é uma instância de *Bloco*, que possui dois transdutores, respectivamente **Direção** e **FaixaFreq**. Como um segundo exemplo, todos os sintomas relacionados com os picos nos espectros estão agrupados na instância **Pico** da classe *Bloco*, tendo como transdutores **Estado**, **Amplitude**, **Formato**, etc. Considerando ainda que os transdutores também representam os diagnósticos, como elementos de saída da rede, todos os tipos de diagnósticos podem fazer parte de um único bloco de nome **Diagnósticos**, o qual pode ser observado na figura 6.8. Além desses elementos, blocos e transdutores também fazem parte da representação das regras, que também constam na figura 6.8 e serão esclarecidas na próxima seção. Serão também criadas sub-classes de *Bloco* especializadas para cada caso.

6.2.3 A Representação de uma Regra

São as regras que estabelecem a evolução dinâmica da rede de inferência, através dos neurons que as representam. Cada regra será representada por um *NeuronPr*. Para agrupar conjuntos de regras, foi criada a classe *ListaRegras*, sub-

classe de *Transdutor*, possuindo um ponteiro para uma lista de neurons premissa, onde cada neuron representa uma regra.

Uma regra é formada sintaticamente por uma premissa e uma ação. A premissa representa a condição dos antecedentes para que a regra seja ativada, enquanto a ação representa as consequências provocadas quando a regra for ativada. Cada sinapse dos dendritos dos neurons premissa corresponde a uma ou mais cláusulas que constituem os antecedentes de sua regra, onde para cada cláusula existirá pelo menos um neuron do outro lado da sinapse. Existirá mais de um quando for necessário um neuron relacional para representar a cláusula. Por outro lado, através das sinapses de seus axons, as ações da regra são disparadas sempre que a operação realizada pelo neuron premissa em seus dendritos resultar pelo seu disparo. Os neurons que correspondem às ações podem ser do tipo inferido (*NeuronI*) ou do tipo função (*NeuronF*). Caso seja do tipo I ele será cláusula de alguma outra regra, a não ser que constitua um terminal conclusivo da rede. Caso seja do tipo F, a função correspondente será executada através de mensagem enviada ao seu transdutor. Duas regras diferentes podem atingir o mesmo resultado, ou seja, possuir como consequente a mesma instância de um *NeuronI*, porém há uma correspondência biunívoca de uma instância de *NeuronPr* para cada regra.

Cada regra do sistema será portanto representada na rede de inferência através dos neurons de suas cláusulas, de sua premissa e de suas ações. Alguns exemplos tornarão mais claros cada um desses elementos. A figura 6.9 apresenta o diagrama simbólico da regra abaixo, a mais simples possível. Estabelece que o desbalanceamento deve sempre ser considerado um diagnóstico inicial, uma vez que todo diagnóstico básico será verdadeiro, a menos que seja retirado da análise pelo operador. Deve-se observar o formalismo na apresentação da regra, uma vez que se está levando em conta aspectos referentes à construção sintática da regra, enquanto nos capítulos anteriores procurava-se ressaltar o seu conteúdo.

RDb1
SE DiagBásico.Desbalanceamento É VERDADE
ENTÃO DiagInicial.Desbalanceamento É VERDADE

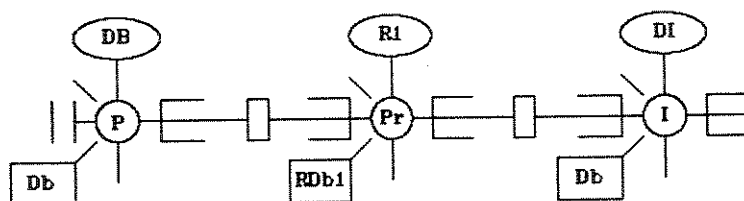


Fig. 6.9) Primeira regra de Desbalanceamento.

Na figura 6.9, o transdutor R1, instância da classe *ListaRegras*, possui como primeira regra da lista a de nome **RDb1**, cujo antecedente consiste em uma única cláusula, associada ao neurônio primitivo de valor **Desbalanceamento (Db)**, o qual é o primeiro nó da lista do transdutor **DiagBásico (DB)**. A ação da regra é atribuir o valor verdadeiro ao neurônio inferido de valor **Desbalanceamento**, que por sua vez é o primeira da lista de regras do transdutor de nome **DiagInicial (DI)**.

A seguinte regra tem uma representação um pouco mais complexa:

```

RP01
SE    DiagBásico.ProbOperação É VERDADE
E     ConstituiçãoFísica.TipoPropulsor É TurbinaVapor
OU    ConstituiçãoFísica.TipoPropulsado É Ventilador
ENTÃO DiagInicial.ProbOperação É VERDADE

```

Essa regra se encontra representada na figura 6.10. As duas cláusulas relativas à constituição física exigem um nó tipo R para executar a operação lógica OU entre elas, cujo resultado sofre a operação E com a primeira cláusula.

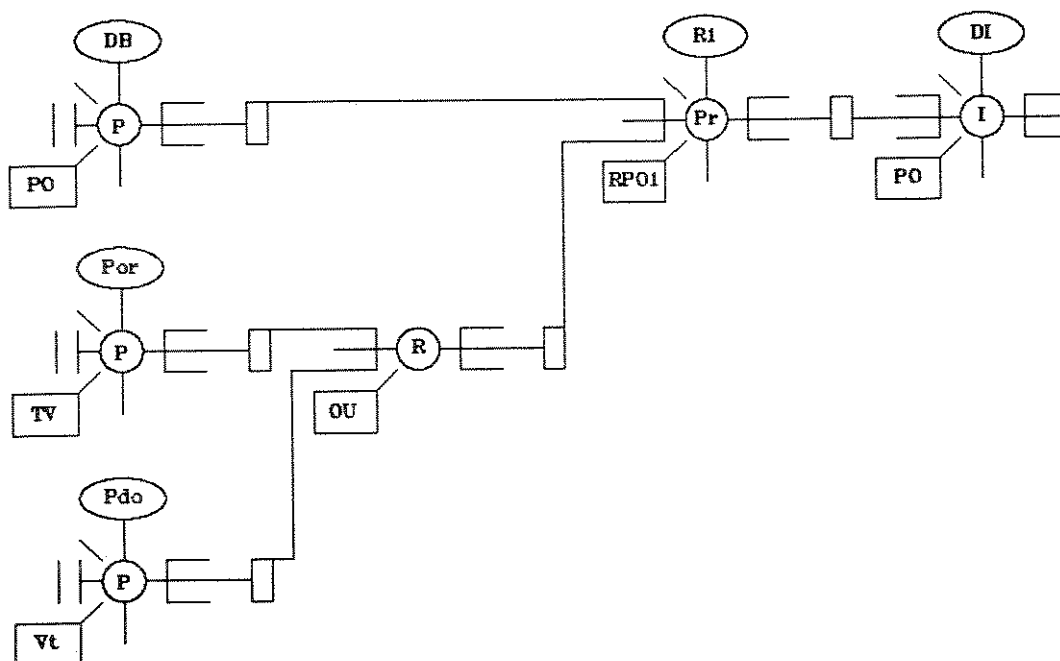


Fig. 6.10) Representação de uma regra de três cláusulas.

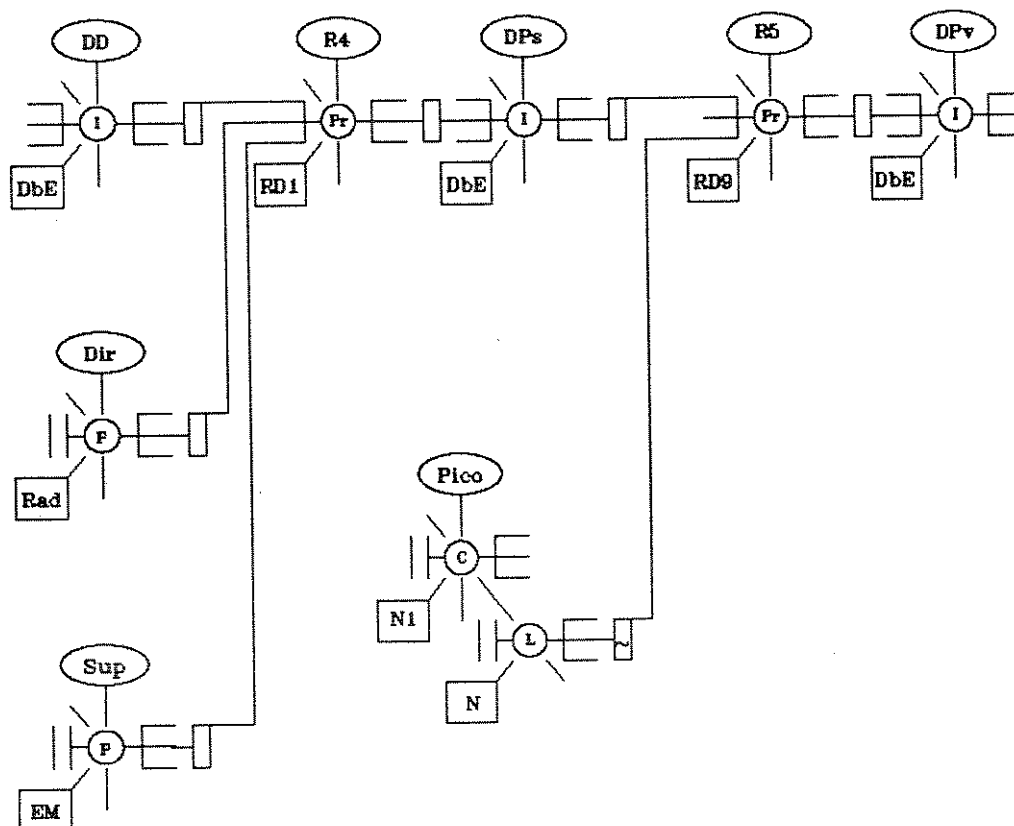


Fig. 6.11) Representação da concatenação de duas regras.

O diagrama simbólico da figura 6.11 apresenta a concatenação de duas regras, a primeira com três cláusulas e a segunda contendo o transdutor **Estado** cuja lista de neurons tem como primeiro nó o neurônio coluna de valor **N1**, o pico na frequência de rotação. Quatro neurônios linhas estão associados ao neurônio **N1**, representando os quatro estados possíveis, porém foi representado na figura apenas o primeiro. A sinapse marcada com um "~" saindo do neurônio do estado **Normal** (N) representa a condição do estado do pico **N1** ser anormal.

A classe *ListaRegras* corresponde ao transdutor que congrega um grupo de regras que possuem uma correlação entre elas. Cada instância dessa classe permitirá que o sistema atue estrategicamente no teste de suas regras. Assim, para a

determinação dos diagnósticos de acordo com a metodologia adotada, cada conjunto de regras do mesmo nível estará na lista de um desses transdutores. As diversas instâncias de *ListaRegras* devem estar associadas a uma instância de *Bloco*. Para tanto, há a necessidade de uma nova classe, *BaseConhecimento*, a qual é sub-classe de *Bloco*. Assim, todas as regras do sistema relacionadas com diagnósticos estão estruturadas através de uma instância de *BaseConhecimento*, a qual contém uma lista de instâncias de *ListaRegras*, que por sua vez contém os neurons premissas que correspondem a cada regra. Na figura 6.8, o círculo nomeado com a letra R representa uma instância de *BaseConhecimento*, e a elipse nomeada como R1 é a primeira instância de *ListaRegras* da base do conhecimento R. Essa estruturação permite que no mesmo sistema possam conviver várias bases do conhecimento, onde cada uma deverá ser dedicada a uma área necessária ao sistema. Para decidir que providências devem ser sugeridas a partir dos diagnósticos selecionados e do estado do sistema mecânico monitorado, por exemplo, pode ser criada uma nova base do conhecimento.

6.2.4 Representação dos Sintomas

Os sintomas não são representados diretamente na rede de inferência, porém a existência de um sintoma qualquer, investigada através da rede semântica, exige um transdutor para que esse fato seja assegurado pelo disparo de um neurôn específico. Os diversos transdutores inter-relacionados, por exemplo todos os relativos aos picos, deverão compartilhar da lista de um mesmo bloco. Assim, há necessidade de duas novas classes para fazer essa interligação entre as duas redes:

- Fonte;
- Bateria.

A classe *Fonte* é sub-classe de *Transdutor* estabelecendo assim a conexão direta com os neurôn que representarão os fatos extraídos da rede semântica, atuando portanto como uma fonte de informações. Possui uma função que buscará o valor da *Propriedade* que corresponde a um sintoma.

A classe *Bateria* é sub-classe de *Bloco*, e compreende a lista de instâncias de *Fonte* relacionadas com um grupo de sintomas. As três propriedades de uma instância de *Sintoma*, o nome, o atributo e o valor, têm sua correspondência com a rede de inferência assim distribuída: uma instância de *Bateria* correspondendo ao nome, uma instância de *Fonte* correspondendo à propriedade e uma instância de *NeuronP* correspondendo ao valor. O seguinte exemplo permite uma melhor compreensão dessas correspondências: o sintoma **Parâmetros.Direção.Axial** tendo sido verificado como verdadeiro através da rede semântica, deverá disparar a instância de *NeuronPr* de valor **Axial**, que se encontra na lista de neurôn da instância de *Fonte* de nome **Direção**, que

por sua vez consta da lista de fontes da instância de *Bateria* de nome *Parâmetros*.

6.2.5 Representação de Diagnósticos

Para a representação de diagnósticos, três novas classes são necessárias:

- Atuador;
- Conclusão;
- Lauda.

As duas primeiras são sub-classes de *Transdutor*, especializadas para representar elementos de saída da rede de inferência. A classe *Atuador* está relacionada com os neurons do tipo F, possibilitando que a função especificada pelo neurón seja executada quando o diagnóstico respectivo for atingido. Ou seja, um atuador, instância da classe *Atuador*, possui uma função de atuação no exterior da rede de inferência. Esse recurso deve ser usado para atitudes do tipo acionar um alarme, enviar uma mensagem para a tela, etc.

A classe *Conclusão* é também um transdutor de saída semelhante à *Atuador*, porém deverá ser usada especificamente para a evolução da rede semântica. Instâncias de *Conclusão* são transdutores que congregam listas de diagnósticos. Assim, ao se verificar um diagnóstico qualquer através do disparo de seu neurón na rede de inferência, a instância correspondente de *Conclusão* pode ser acionada para incluir na rede semântica o diagnóstico verificado. A condição no caso depende da opção estratégica de se acrescentar ou não à rede semântica conclusões intermediárias ao longo do procedimento de determinação de diagnósticos.

A classe *Lauda* é uma sub-classe de *Bloco*, utilizada para congregiar as diversas instâncias de *Conclusão* em uma mesma lista. Assim, a tripla referente a um diagnóstico está distribuída em instâncias de *Lauda*, *Conclusão* e *NeuronI*. Os grupos de diagnósticos de um mesmo nível, conforme a estrutura definida para a determinação de diagnósticos, serão representados por instâncias de *Conclusão*, enquanto os diagnósticos básicos iniciais e os diagnósticos detalhados serão duas laudas. Na figura 6.8 o círculo nomeado com a letra D representa uma instância de *Lauda*, em cuja lista podem ser vistas as conclusões DB, DI e DII. Ainda nessa figura, ao se concluir através de um processo de inferência que o neurón Db da conclusão DI da *Lauda* D foi disparado, pode ser acrescentado à rede semântica o diagnóstico D.DI.Db.

A forma como todas essas classes são utilizadas para o desempenho de um sistema de monitoramento e diagnóstico de máquinas rotativas será detalhada a seguir, através da exposição do procedimento estratégico global.

6.3 PROCEDIMENTO ESTRATÉGICO GLOBAL

Para o início de operação de um sistema de monitoramento e diagnóstico, estabelecida a priori uma rede de inferência, o procedimento estratégico global consiste inicialmente na criação da(s) rede(s) semântica(s) respectiva(s) e seleção dos métodos de medição e dos pontos onde serão adquiridos os sinais. Além disso, para cada ponto, deve-se estabelecer os espectros de referência e os níveis para a avaliação do estado do ponto. Após isso, a atividade básica consiste em uma automalha em que é realizado o monitoramento contínuo das vibrações. O sistema sairá da automalha por ter encontrado um estado **Anormal** para algum dos pontos medidos, baseado no critério adotado para tanto, por exemplo o valor global da vibração. Atingido o valor limite, o estado anormal atuará como gatilho iniciando ou continuando um episódio. Disparado um gatilho, o sinal correspondente será processado e as árvores espectrais comparadas com as referências, o que inicia a determinação de diagnósticos. Ações que estejam programadas na Agenda também podem atuar como gatilho, porém apenas a continuação de episódios pode ser programada por esse meio, causando a interrupção do monitoramento contínuo das vibrações.

Informações dos métodos, pontos de medição e sinais adquiridos, bem como sintomas e diagnósticos atingidos ao longo do procedimento, serão armazenadas em uma área de acesso global, onde estarão estruturados e disponíveis aos demais métodos que deles necessitarem. Essa área para intercâmbio de dados será chamada de *QuadroNegro*, e constitui uma outra classe básica do sistema, possuindo em seu esquema ponteiros para o sistema mecânico sob medição, a máquina, o mancal, o ponto de medição, o último vetor no tempo adquirido, uma lista de sintomas e uma lista de diagnóstico. Cada ponto de medição do sistema fará uso de uma instância de *QuadroNegro* de acesso global.

As classes envolvidas diretamente com as ações do sistema foram apresentadas na seção 6.1. Correspondem à área dinâmica da rede semântica, e serão novamente listadas abaixo para melhor compreensão de seus métodos, discutidos a seguir:

- Avaliação;
- Sintoma;
- Diagnóstico;
- AvalDiagnóstico;
- Análise;
- Providência;
- Interpretação;
- Episódio.

O grafo das relações entre essas classes está exposto na figura 6.12. Observa-se que uma instância de *Episódio* pode possuir várias instâncias de *Interpretação* correspondendo cada interpretação a um conjunto de medições em momentos

diferentes. Uma instância de *Interpretação* por sua vez pode possuir diversas de *Análise*, onde cada análise corresponde a um ponto de medição diferente. Assim, enquanto uma análise está ligada a um ponto específico, uma interpretação é relativa ao sistema mecânico. Cada instância de *Análise* está associada a uma instância de *Avaliação*, a qual conterá todos os dados relativos à medição (parâmetros e ponto de medição) e o vetor no tempo respectivo.

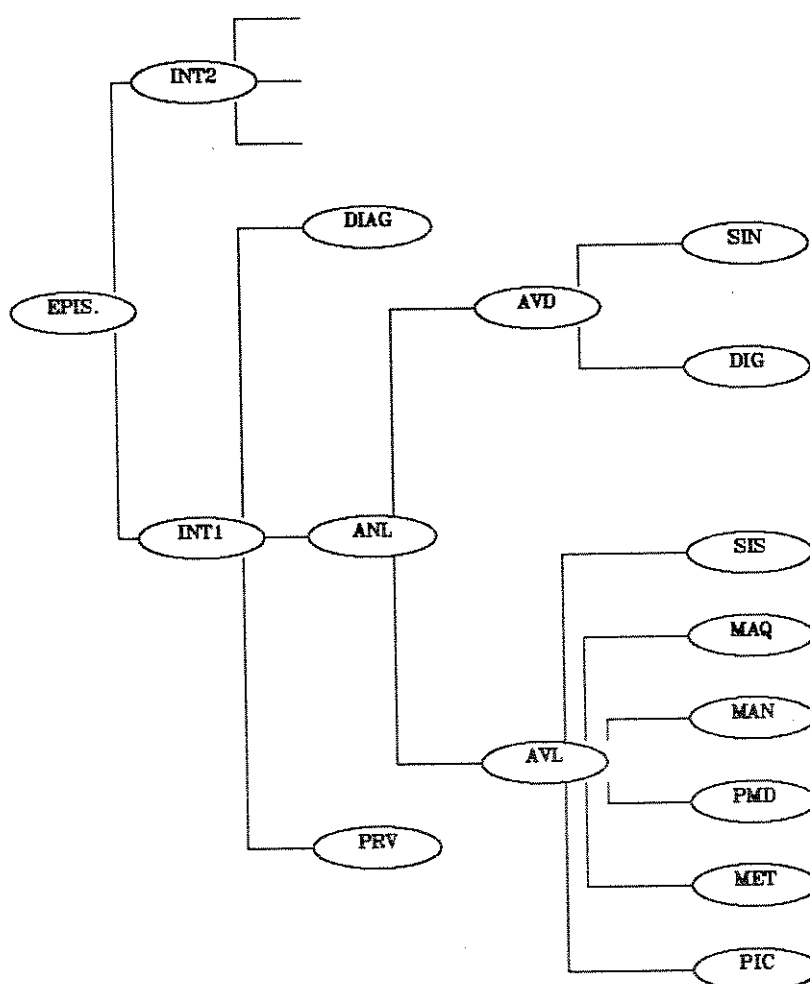


Fig. 6.12) Grafo das relações entre as classes dinâmicas.

Iniciada a automalha de monitoramento, cada ponto de medição do(s) sistema(s) monitorado, incluindo propulsor, propulsado e acoplamento, será adquirido e processado de

acordo com o método do esquema do ponto. Tendo sido disparado o gatilho que indica anormalidade, para a medição respectiva será criada uma instância de *Avaliação*, calculados os espectros e comparadas as árvores. Como resultado da comparação, será acionada várias vezes a instância inclusiva de *Fonte Pico.Estado*, informando cada um dos picos discrepantes para o disparo dos neurons primitivos na rede de inferência. Será então criada uma instância de *Análise* e em consequência também de *AvalDiagnósticos*, a qual implica no procedimento de determinação de diagnóstico e portanto em novas instâncias de *Sintoma* e de *Diagnóstico*. Eventualmente, novas medições podem ser necessárias ao diagnóstico, criando-se novas instâncias de *Análise*. Ainda, se outros pontos medidos também tiverem o gatilho disparado, outras análises serão criadas, criando-se uma lista com todas elas. O conjunto das análises será englobado em uma instância de *Interpretação*, que selecionará uma instância de *Diagnóstico* significando o diagnóstico global do sistema, resultante da ponderação entre todas as análises. Baseado nesse diagnóstico, serão criadas instâncias de *Providência* para solucionar o problema, e programada a continuação do episódio. Quando o estado do sistema voltar ao normal, o episódio será encerrado.

A seguinte estratégia foi adotada para o procedimento global de monitoramento e diagnóstico, cujas rotinas estão apresentadas em linguagem estruturada simplificada, onde um texto entre os sinais "<" e ">" significa uma instância da classe respectiva:

```
Iniciar Monitoramento <SistemaMecânico>
  Criar RedeSemântica <SistemaMecânico>
  Agendar QuadroNegro <SistemaMecânico>
  Criar Referências
  AutoMalha
```

```
AutoMalha
  Adquirir Sinais
  Avaliar Estado
  PARA TODOS Sinais
    SE Estado Normal
      Continua
    SENÃO
      Criar Avaliação <PontoMedição>
      Criar Análise <Avaliação>
  SE Existe Estado Anormal
    SE Existe Episódio <SistemaMecânico>
      Continuar Episódio <Análises>
    SENÃO
      Iniciar Episódio <Análises>
```

Criar Avaliação <PontoMedição>
 Pegar QuadroNegro <PontoMedição>
 Calcular Espectro
 Gerar Árvore
 Comparar com Referência

Criar Análise <Avaliação>
 Criar AvalDiagnóstico
 Expor AvalDiagnóstico

Criar AvalDiagnóstico
 Avaliar ListaRegras <R1>
 Avaliar ListaRegras <R2>
 Avaliar ListaRegras <R3>
 Anexar Conclusão <DiagIPossível>
 Avaliar ListaRegras <R4>
 Avaliar ListaRegras <R5>
 Avaliar ListaRegras <R6>
 Avaliar ListaRegras <R7>
 Anexar Conclusão <DiagProvável>
 Anexar Conclusão <DiagMProvável>

Expor AvalDiagnóstico
 Expor Sintomas
 Expor Diagnósticos

Iniciar Episódio <Análises>
 Criar Episódio <SistemaMecânico>
 Criar Interpretação <Análises>
 Programar Agenda Continuar Episódio <Episódio>
 Expor Relatório Anormal

Criar Interpretação <Análises>
 Ponderar Diagnósticos
 Sugerir Providências

Continuar Episódio <Episódio>
 Adquirir Sinais
 Avaliar Estados
 SE Estados Normais
 Encerra Episódio
 SENÃO
 PARA TODOS PontosMedição
 Criar Avaliação
 Criar Análise <Avaliação>
 Criar Interpretação <Análises>
 Programar Agenda Continuar Episódio <Episódio>
 Expor Relatório Anormal

Deve-se observar que a rotina para a determinação de diagnósticos pode ser implementada de diversos modos, tendo em vista o tipo de estratégia de pesquisa desejada. A avaliação de instâncias da classe *ListaRegras* corresponde à sequência estipulada na seção 3.3, onde foi adotada um procedimento em amplitude dirigido pelos dados. As regras agrupadas pela instância *R1* de *ListaRegras* correspondem aos **DiagBásicos**, as de *R2* correspondem os **DiagIniciais**, etc., onde cada nível será avaliado em sequência.

Ao serem avaliadas as diversas regras, as conclusões, instâncias de *Conclusão*, que recebem a mensagem para serem anexadas, implicam na criação de instâncias da classe *Diagnóstico* que serão ligadas à lista de diagnósticos associada à instância de *AvalDiagnóstico* que disparou a rede de inferência. No processo de avaliação de cada regra as instâncias de *Fonte* serão acionadas pelas instâncias de *NeuronP* que ainda não foram avaliadas, criando assim instâncias de *Sintoma*, as quais igualmente serão anexadas à instância de *AvalDiagnósticos*, porém nesse caso o serão todos os sintomas. Dessa forma, ao se concluir uma avaliação completa da rede de inferência, diversas instâncias de *Sintoma* e *Diagnóstico*, referentes a um único ponto de medição, terão sido incorporadas à rede semântica.

Finalmente, apenas ao se concluir todas as análises, os diagnósticos serão ponderados para se decidir quais devem ser atribuídos ao sistema mecânico como um todo, quando então serão sugeridas as providências adequadas.

CAPÍTULO 7

RESULTADOS E CONCLUSÕES

7.1 Protótipo Desenvolvido

7.1.1 Módulos de Monitoramento

7.1.2 Rede Semântica Implementada

7.1.3 Rede de Inferência Implementada

7.1.4 Procedimento Global

7.2 Avaliação da Metodologia e do Conhecimento

7.3 Avaliação das Ferramentas de Representação e Inferência

7.4 Conclusões e Áreas para Desenvolvimento Futuro

No capítulo final será inicialmente apresentada uma descrição do sistema protótipo desenvolvido para o teste geral das idéias. Os resultados atingidos serão avaliados, tendo em vista as áreas principais que formaram o escopo central do trabalho. A metodologia, o conhecimento e o método proposto para o reconhecimento de padrões serão avaliados, bem como a aplicabilidade das ferramentas de representação do conhecimento e inferência. Finalmente, serão sugeridas algumas atividades complementares que possibilitam a continuidade do trabalho, e apresentadas as conclusões finais.

7.1 PROTÓTIPO DESENVOLVIDO

Para a avaliação global das idéias aqui apresentadas e das ferramentas computacionais desenvolvidas, foi configurado um sistema protótipo onde os sinais a serem adquiridos foram simulados. As alternativas a esse esquema seriam a simulação de defeitos em uma bancada mecânica, ou o processamento de sinais reais em máquinas de empresas da região. O projeto e montagem de uma bancada com as características necessárias representa uma árdua tarefa, a qual evidentemente foge ao escopo do trabalho. O uso de máquinas reais não permitiria o teste controlado dos diversos módulos de programação, além de incorporar uma enorme carga de problemas técnicos.

Assim, os defeitos foram simulados através de sinais gerados pela soma de várias senóides, e realizada uma amostragem equivalente ao caso de sinais reais. Através do controle da amplitude das diversas senóides constituintes dos sinais, pode-se simular a evolução de defeitos, excitando-se picos de frequências específicas, o que deve conduzir o sistema a apresentar resultados de acordo com o modelo do conhecimento utilizado.

7.1.1 Módulos de Monitoramento

Admitiu-se para o protótipo um sistema de aquisição de dados de quatro canais reais. A interface homem/máquina contém os recursos essenciais para expor uma tela de operação, e adicionalmente permitir que os eventos internos pudessem ser acompanhados, a fim de se avaliar a evolução dos procedimentos.

Do ponto-de-vista da operacionalidade de um sistema de monitoramento contínuo e diagnóstico automático, a interface homem/máquina é fundamental, exigindo que o equipamento tenha o aspecto de um painel convencional de uma máquina de grande porte. Assim, a concepção básica do protótipo apresenta uma tela única onde algumas janelas funcionais se revezam. A configuração da tela de operação normal apresenta em quatro janelas os sinais respectivos no domínio do tempo, na medida em que cada bloco é adquirido. Foi admitido como gatilho para todos os canais o nível da vibração global. Assim, durante o monitoramento, a maior parte do tempo será gasta na automalha central do programa, onde são realizadas a aquisição dos canais de vibração e apresentados os blocos de dados respectivos. Compondo a tela, em um visor a parte, porém visualmente associado ao sinal respectivo, o estado do ponto e o nível da raiz média quadrática da vibração de cada canal é apresentado, a cada nova aquisição. Foi estipulado para o protótipo as evoluções de 30% na amplitude como o nível disparando o estado de **Alerta**, 100% para **Alarme** e 500% para **Emergência**. Esses valores são apenas de referência para permitirem o teste. No entanto, é comum o uso dos níveis do dobro e do décuplo da amplitude [o'Sullivan, 88], em programas de monitoramento manual. O nível adicional com um

valor baixo é importante para o monitoramento contínuo, permitindo que qualquer alteração possa ser imediatamente percebida. Caso o nível da vibração retorne ao normal o episódio respectivo será encerrado.

Ao se iniciar o ciclo de monitoramento, todos os canais especificados realizam uma primeira medição assumida como referência, gerando-se assim as diversas árvores padrões. Ao ocorrer uma mudança de estado em algum dos canais, é disparado o gatilho para a realização da análise espectral. O procedimento então envolve a transformação do vetor no domínio do tempo, que indicou o nível anormal, para o domínio da frequência, e a geração da árvore respectiva. As duas árvores serão então comparadas, procurando-se identificar a variação de amplitude e formato de cada pico reconhecido. O resultado da comparação consiste em se constatar as discrepâncias no estado dos diversos picos existentes nos dois espectros, e no acionamento da rede de inferência. Até esse ponto, foi descrito o sistema de monitoramento de vibrações, cujo principal objetivo é a avaliação do estado do sistema mecânico monitorado.

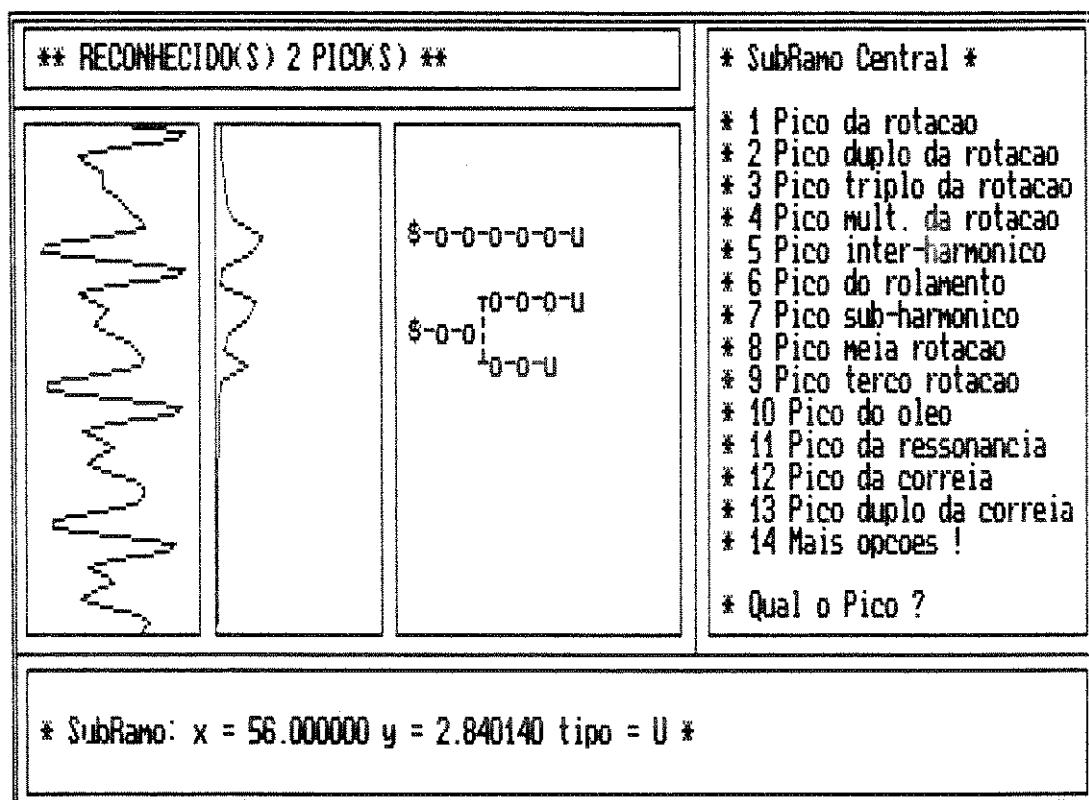


Fig. 7.1) Criação da referência e rotulação dos picos.

Não foi acrescentada ao protótipo a estimativa de datas críticas através da análise de tendências, por não ser representativa dos temas centrais do trabalho. Tendo sido disparado um gatilho e assim iniciado um episódio, o procedimento global resulta na identificação dos picos com evolução na amplitude ou no formato.

Algumas telas do programa estão reproduzidas nas figuras desse capítulo. Ao se estabelecer a referência de um canal, o programa solicita do operador a identificação de cada um dos picos reconhecidos. Para tanto, pode-se observar na figura 7.1 uma tela composta pelas seguintes janelas:

- O sinal no domínio do tempo em uma janela gráfica;
- O sinal no domínio da frequência em outra janela;
- A árvore respectiva gerada, em uma terceira janela gráfica;
- No alto, uma janela de texto expõe o número de aglomerados de picos identificados;
- Na janela inferior, é especificado um determinado pico do aglomerado;
- Na janela à direita, um menu apresentando os diversos tipos de picos possíveis, para seleção pelo operador.

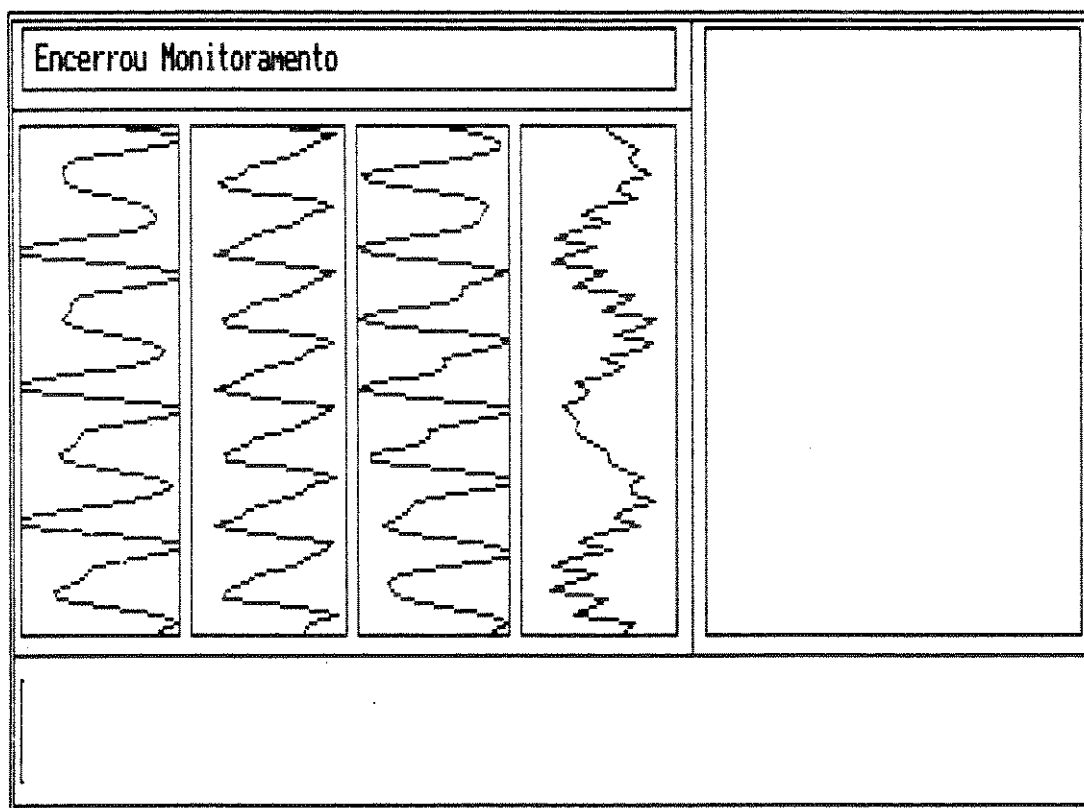


Fig. 7.2) Tela expondo as vibrações no domínio do tempo.

Tendo sido identificados pelo operador todos os picos da árvore referência de cada canal, o sistema passa a executar a automalha. A tela respectiva, apresentando os quatro sinais no domínio do tempo e os respectivos visores contendo o nível global da vibração e o estado do canal, encontra-se na figura 7.2. Ao ser disparado um gatilho, o sistema calcula o espectro e a árvore respectiva, apresentando-os conforme consta na figura 7.3, como passo necessário para a comparação com a referência.

No procedimento de comparação entre as árvores, cada ramo representativo de um pico da medição recente será investigado em relação aos ramos da árvore padrão, através da comparação entre as cadeias de caracteres respectivos e os valores associados, buscando em um primeiro momento identificar o seu equivalente, e a seguir analisando se houve variação de amplitude ou formato. Se surgirem picos novos, não haverá um ramo correspondente na árvore referência, o que já qualifica o estado de **Alerta**. Nesse caso, o operador é então solicitado para identificar o pico de forma semelhante ao que ocorre ao se estabelecer as árvores padrões.

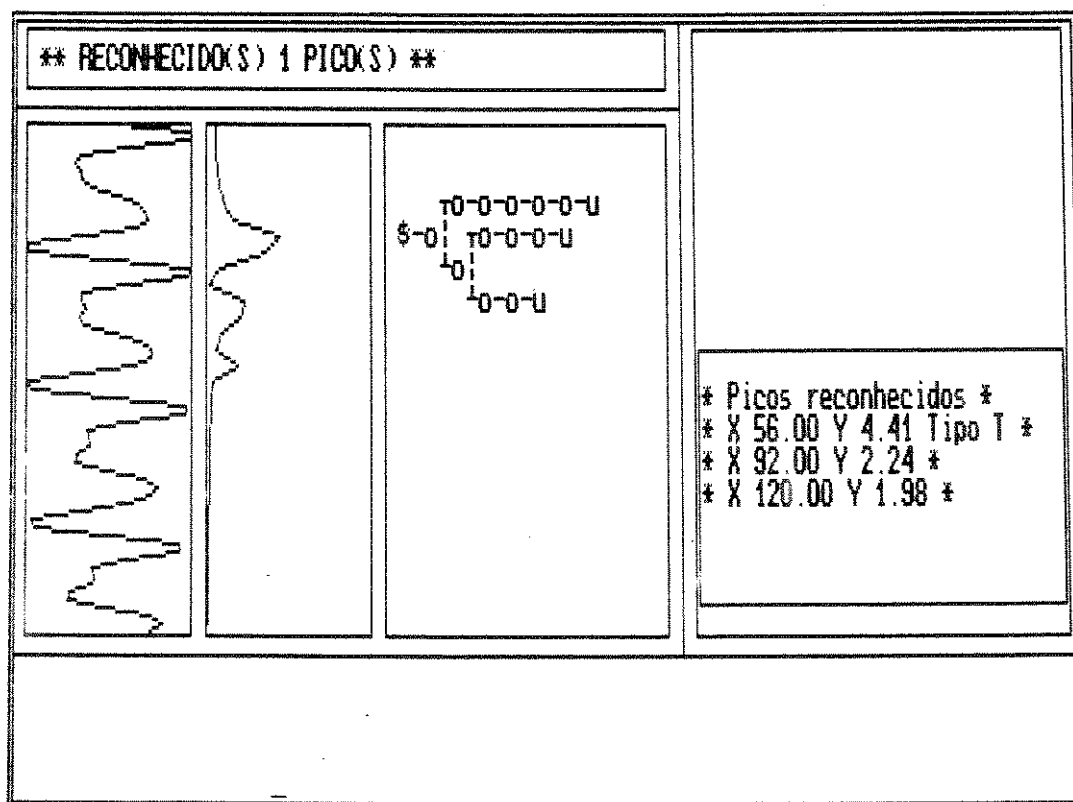


Fig. 7.3) Sinal, espectro, árvore e picos reconhecidos.

A figura 7.4 apresenta uma tela de comparação entre as duas árvores, onde se pode constatar a variação no formato dos aglomerados e na amplitude de um dos picos. A árvore referência do canal possui dois aglomerados, um do tipo **Único** e um **Duplo**, e a nova árvore possui apenas um aglomerado **Triplo**. O ramo da esquerda do aglomerado **Triplo** corresponde ao aglomerado de pico **Único** da referência, constatando-se que sua amplitude evoluiu.

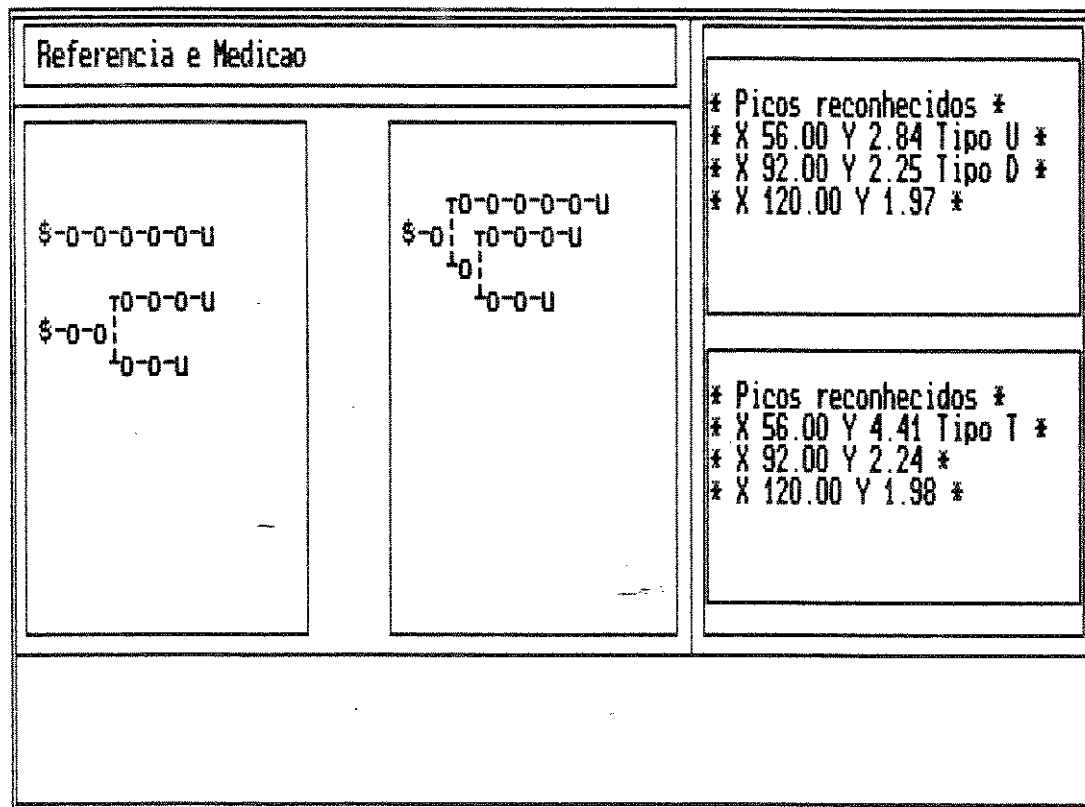


Fig. 7.4) Comparação entre árvores com evolução em amplitude.

Na figura 7.5, também uma tela de comparação entre árvores, pode-se observar uma variação na profundidade do ramo de um dos picos, sem contudo ter ocorrido uma variação do formato respectivo. O nível global da vibração foi suficiente para disparar o gatilho, porém apenas um pico evoluiu de forma a cruzar mais um dos níveis para a geração dos nós da árvore. Essa possibilidade ressalta a necessidade de se estipular os níveis quânticos para a geração das árvores de acordo com critérios a serem estabelecidos baseados na experiência relativa a cada máquina. A gramática das árvores deve permitir que uma alteração significativa na

vibração seja reproduzida nas árvores respectivas, havendo por outro lado a possibilidade de se descartar variações nas árvores como inócuas, através da avaliação das discrepâncias. Evita-se dessa forma o acionamento de alarmes falsos, apesar da detecção de pequenas variações nos espectros.

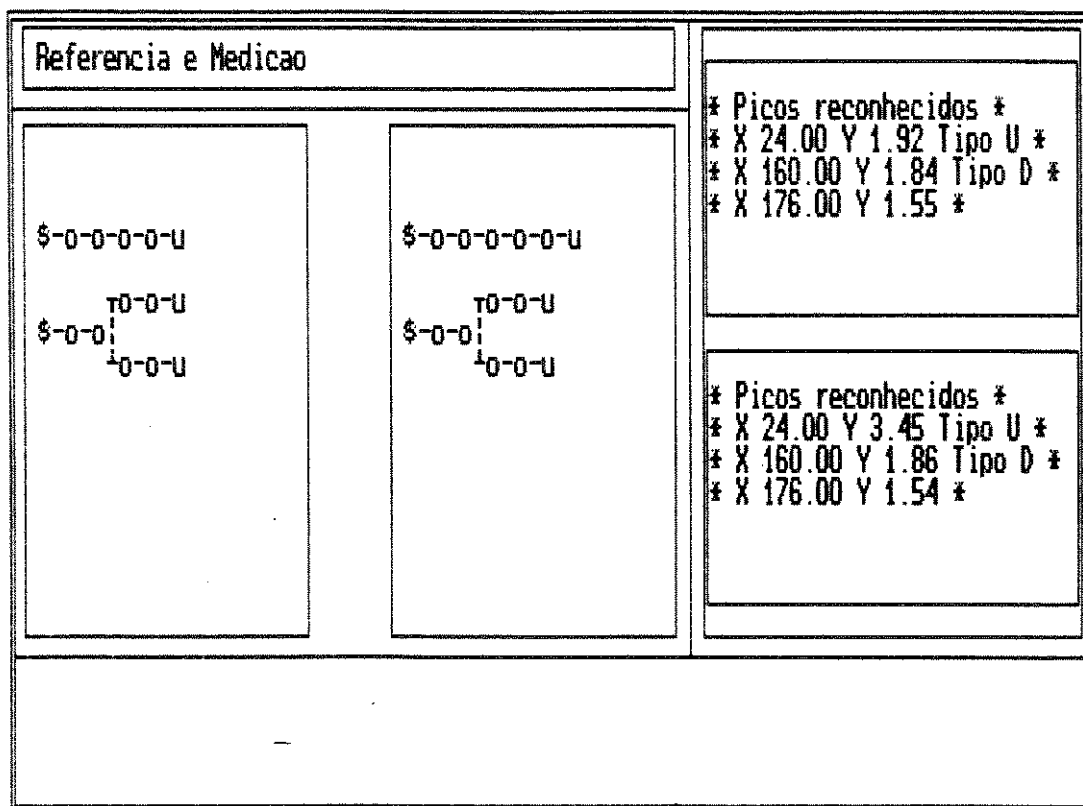


Fig. 7.5) Árvores mostrando evolução de formato e amplitude.

7.1.2 Implementação da Rede Semântica

Para a determinação de diagnósticos há necessidade da rede semântica para a representação da descrição do sistema monitorado, bem como da rede de inferência para processar os sintomas levantados e se realizar o diagnóstico.

Todas as classes básicas da rede semântica foram implementadas, de acordo com os esquemas da seção 5.3, bem como as classes do sistema expostas na seção 5.2. Foi desenvolvido um módulo que permite a utilização dessas classes através da criação, de forma interativa em tempo de execução, de instâncias (no sentido da linguagem C++) das classes *Instância*, *Ocorrência* e *Exemplar*, de acordo com instâncias das classes *Classe*, *Propriedade* e *Relação*, criadas

em módulos compilados. Em outras palavras, foi criada por exemplo a instância da classe *Classe* de nome **SistemaMecânico** através de declaração compilada em um módulo de programação, bem como das demais classes do sistema. Foram igualmente compiladas todas as instâncias de *Propriedade* e de *Relação*, incluídas nas declarações de **SistemaMecânico** e das demais classes do sistema. Em tempo de execução, o programa solicita do operador a configuração do sistema mecânico que será monitorado, criando dinamicamente todas as instâncias de *Instância*, *Ocorrência* e *Exemplar*, seguindo as respostas fornecidas pelo operador, e de acordo com as descrições compiladas para cada uma das classes do sistema.

Na operação do sistema protótipo, ao se executar o módulo para criar a representação de um sistema mecânico, são acionadas portanto as classes e os métodos referentes à rede semântica, permitindo assim a configuração de sistemas com todas as possibilidades apresentadas no modelo, envolvendo propulsores, propulsados, tipos de mancais, de engrenagens, etc. Especificado o sistema a ser monitorado, o que inclui os seus pontos de medição, para cada um desses será associado um dos canais físicos de aquisição de dados. Para cada sinal de vibração apresentado na tela, cria-se uma instância de *QuadroNegro*, onde será armazenada a sua qualificação. Ao ser disparado o gatilho de um dos canais, essa instância é acessada para a criação de instâncias de *Análise*, *Avaliação*, *AvalDiagnósticos*, *Sintoma* e *Diagnóstico*. As classes *Episódio*, *Interpretação* e *Providência* não foram implementadas, também por nada acrescentarem ao escopo central nesse ponto do trabalho.

7.1.3 Implementação da Rede de Inferência

Foram implementadas as classes da rede de inferência descritas na seção 5.3, a menos de duas sub-classes de *Neuron*, respectivamente *NeuronF* e *NeuronV*, a primeira para o acionamento de funções externas e a segunda para comparação com valores absolutos na rede. Dentro da parcela do conhecimento que foi utilizado na rede protótipo, essas duas classes não se fizeram necessárias. Não apresentam por outro lado qualquer recurso a mais que tivessem exigido o seu teste, podendo mais tarde serem facilmente incluídas dentro da estrutura existente.

O conhecimento utilizado foi uma parcela significativa do que foi estruturado no capítulo 3, e englobou as regras do primeiro ao quinto nível, referentes aos diagnósticos adequados. Levou-se em conta portanto todos os sintomas relativos à constituição física do sistema monitorado, da faixa de frequência do sinal, da direção do sensor e do estado dos picos. O conjunto completo dos diagnósticos básicos e detalhados adequados foi incluído.

As regras foram incluídas no sistema com a instanciação dinâmica das classes *Neuron*, *Sinapse*, *ListaRegras* e

BaseConhecimento, através da execução de módulos compilados. Assim, cada neurônio e sinapse participante de cada regra teve algumas linhas de código a eles dedicadas.

7.1.4 Procedimento Global do Protótipo

Considerando o sistema protótipo completo, incluindo o monitoramento das vibrações, a rede semântica e rede de inferência, o procedimento global pode ser assim resumido:

- É inicialmente configurado pelo menos um sistema mecânico a ser monitorado;
- Tendo sido qualificados os pontos de medição, os canais correspondentes passam a ser continuamente monitorados;
- No início das medições as árvores de referências são estabelecidas e os seus picos rotulados pelo operador;
- Utilizou-se o cálculo do valor da raiz média quadrática da vibração como gatilho;
- Ao ser disparado um gatilho, é calculado o espectro, gerada a árvore correspondente e comparada com a referência;
- Encontrando-se discrepâncias de amplitude ou formato na comparação entre árvores, o estado dos diversos picos envolvidos é avaliado;
- Os sintomas assim constatados, referentes ao estado dos picos identificados são transmitidos à rede de inferência através da instância da classe *Fonte* correspondente;
- Em consequência, todos os neurônios representativos desses sintomas disparam as suas sinapses;
- É iniciado então o procedimento de diagnóstico, testando-se a instância da classe *Conclusão* do quinto nível;
- O mecanismo de inferência, ao atingir os neurônios primitivos da rede, aciona as respectivas instâncias de *Fonte*;
- Através de seus operadores, cada fonte vai buscar na rede semântica as informações respectivas, criando assim as instâncias de *Sintoma*;
- O mecanismo de inferência continua até todas as sinapses possíveis terem sido disparadas;
- As instâncias de *Conclusão* referentes a cada nível são acionadas de acordo com a estratégia usada, para a criação das instâncias de *Diagnóstico* respectivas;

- As instâncias criadas referentes aos sintomas e diagnósticos são incorporadas à rede semântica e apresentados ao operador;
- O episódio é momentaneamente encerrado, e retorna o procedimento de monitoramento contínuo.

A estratégia para a determinação de diagnósticos envolve dois aspectos básicos relativos ao mecanismo de inferência:

- A sequência em que as listas de regras são testadas;
- Quais os diagnósticos que serão incorporados à rede semântica.

No sistema protótipo foi adotado o acionamento único das conclusões do quinto nível, o que resulta em uma estratégia de pesquisa regressiva em profundidade, diferentemente da rotina exposta na seção 6.3. Como os picos anormais acionaram os neurons da rede, o teste diretamente dos neurons inferidos a eles ligados consiste em uma boa alternativa de estratégia regressiva, ou seja dirigida por metas. Dessa forma, serão tomadas como metas apenas os diagnósticos que sejam compatíveis com os picos em estado anormal, que é na verdade o sintoma mais significativo. O primeiro *NeuronI* da lista dispara o *NeuronPr* da regra correspondente, que pesquisa as sinapses de seu dendrito que pesquisa os seus axons e assim recursivamente até atingir os neurons primitivos e obter a sua resposta. O segundo *NeuronI* da lista de *Conclusões* é então pesquisado, porém já encontra a rede com diversas sinapses disparadas pelo processo anterior, o que gradativamente diminui o tempo de pesquisa de cada conclusão.

Quanto aos diagnósticos a serem anexados à rede semântica, para o sistema protótipo foi especificado que as conclusões relativas aos diagnósticos prováveis (detalhados) fossem informados e assim criadas as instâncias de *Diagnóstico* respectivas, o que ocorre após a pesquisa de todas as conclusões do quinto nível. Qualquer outra instância de *Conclusão* poderia igualmente ser anexada à rede semântica, apenas adicionando-se a linha de código que aciona o método específico.

Realizado um teste onde foi criada a rede semântica de um ventilador com motor elétrico, com os três picos da referência rotulados como o pico da rotação, da frequência de engrenamento e da segunda frequência de engrenamento, obteve-se a seguinte lista de sintomas, na ordem apresentada pelo protótipo:

- O Estado do Pico da Rotação é Alerta.
- O Estado do Pico do Engrenamento é Alerta
- O Estado do Pico Duplo do Engrenamento é Normal.
- A Faixa de Frequência da Medição é Média.
- A Direção do Sensor é Radial.
- O Estado do Pico Duplo da Rotação é Normal.
- O Tipo do Mancal é Rolamento.
- O Tipo do Acoplamento é por Engrenagem.
- O Tipo da Engrenagem é Dentes Retos.
- O Estado do Pico Triplo do Engrenamento é Normal.
- O Tipo do Propulsor é Motor Elétrico.
- O Tipo do Propulsado é Ventilador.
- O Estado do Pico das Lâminas é Normal.
- O Estado do Pico de Frequência Aleatória é Normal.
- O Estado do Pico Duplo da Linha é Normal.
- O Estado do Pico das Ranhuras Deslocado é Normal.

Os seguintes diagnósticos detalhados foram apresentados pela rede de inferência e anexados à rede semântica:

- Engrenagem Irregular é um Diagnóstico Provável Verdadeiro.
- Engrenagem com Problemas Síncronos é um Diagnóstico Provável Verdadeiro.

7.2 AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA E DO CONHECIMENTO

A metodologia implementada nas ferramentas e no protótipo procurou refletir os procedimentos utilizados na vida profissional pelos especialistas em análise de vibrações. A principal dificuldade para tanto consiste no objetivo de traduzir raciocínios conduzidos em paralelo pelo cérebro humano, em uma sequência de tarefas em ordem serial. Assim, o especialista processa todas as informações de forma global, procurando abstrair os diagnósticos, ou suas possibilidades, através de observações nos espectros e do conhecimento da máquina que ele possui, sem que essas informações sejam explicitadas de forma clara. Ocorrências nos espectros o conduzem a levantar uma hipótese que as

explique, para em seguida serem buscadas novas informações que mantenham ou eliminem essa hipótese. Durante a avaliação de uma linha de raciocínio, uma nova hipótese pode ser levantada, provocando novas buscas de informações. Caracteriza-se na verdade um procedimento oportunístico [IBM, 91 a e b], onde observações levam a hipóteses que ocasionam novas observações que podem levar a novas hipóteses.

A metodologia implementada procura em primeiro lugar explicitar todos os sintomas. Iniciando pelos mais significativos, que são os picos em estado anormal de frequências conhecidas da máquina, isso permite formular um conjunto de hipóteses iniciais, relacionadas com esses picos. Assim todos os outros diagnósticos ficam excluídos do procedimento de análise com um mínimo de processamento, o que representa eficiência no procedimento.

A formulação textual de todos os sintomas, dentro do conceito que envolve todas as informações importantes de acordo com o modelo do conhecimento, é um resultado que permite a manutenção desse modelo com facilidade, expondo claramente o conteúdo das regras. A capacidade de formular essas afirmações conforme listado na seção anterior, está associada ao projeto da rede semântica, apresentando ao operador frases em português facilmente compreensíveis, construídas em tempo de execução com as informações retiradas da rede. Esse é um resultado significativo, quando se considera que a alternativa atual é o uso de um analisador espectral e a análise visual dos espectros, o que apenas pode ser realizado por engenheiros especializados. A afirmação de que "O Estado do Pico do Engrenamento é Alerta" representa uma enorme simplificação das atividades, e a possibilidade da operação do sistema por técnicos de nível médio.

A metodologia assim pode ser considerada adequada, tendo em vista que todos os passos para a realização de uma análise podem ser implementados com facilidade, e acarretando um processamento simbólico eficiente em virtude da possibilidade de eliminação de grandes sequências de regras ainda no início do procedimento. Os níveis sexto e sétimo que poderiam ser acrescentados apenas com dispêndio de tempo, sem o desenvolvimento de novas idéias ou classes senão aquelas já disponíveis no protótipo, permite a anexação de uma parcela mais ampla e aplicada do conhecimento, além daquele apresentado no capítulo 3. Outros níveis ainda poderiam ser acrescentados com facilidade, para possibilitar por exemplo "atalhos" no raciocínio em virtude da experiência anterior com a máquina. Os principais méritos da metodologia residem assim na flexibilidade de ampliação decorrente da estruturação do conhecimento em diversos níveis, e da grande clareza para orientar a linha de raciocínio e dos momentos em que cada tipo de sintoma deve ser considerado.

Por outro lado, o conhecimento compilado, estruturado e resumido não é mais significativo pelo seu conteúdo do que pela forma como foi incorporado à metodologia. Consistindo

essencialmente de informações básicas, pode ser encontrado com facilidade na literatura, porém dentro do mesmo espírito "caótico" normalmente utilizado pelos especialistas, o que o torna praticamente inútil a não ser após bastante experiência prática na análise de vibrações. Em outras palavras, não se aprende a trabalhar nessa área apenas estudando a literatura. No entanto, a partir da estruturação aqui realizada, torna-se muito mais simples transmitir esse conhecimento, e regras práticas podem ser apreendidas sem necessidade do desenvolvimento de conhecimento profundo [Harmon, 88]. Essa é na verdade um dos principais méritos que resultam das atividades da Engenharia do Conhecimento, acarretando acumulação do conhecimento e facilidade de ensino.

7.3 AVALIAÇÃO DAS FERRAMENTAS DE REPRESENTAÇÃO E INFERÊNCIA

As duas redes desenvolvidas atuam de forma complementar, porém constituem na verdade módulos independentes com possibilidades de aplicações em outras áreas.

Dentro das necessidades de representação do modelo estático dos sistemas mecânicos monitorados, a rede semântica conforme especificada na seção 5.3 se mostrou plenamente adequada ao desenvolvimento do protótipo, permitindo que todos os conceitos e informações possam ser representados de forma clara e compreensível por profissionais da área. É possível ainda que informações significativas para casos específicos sejam acrescentadas com facilidade, exigindo apenas a compilação de novas classes, sem alteração daquelas que já foram implementadas.

O potencial da especificação das classes básicas para a implementação da rede semântica vai muito além do que foi utilizado pelo protótipo, permitindo que a rede possa incorporar fenômenos complexos de serem analisados de outra forma, como a interferência entre máquinas através de suas estruturas ou de uma tubulação comum por exemplo, que são problemas difíceis mesmo para o especialista. A introdução do conceito de Relação aos esquemas é o principal responsável pela grande flexibilidade de modelamento. No entanto, a sua utilização plena necessita da capacidade de se inserir com facilidade na rede métodos procedurais que permitam sua atuação em casos específicos. O uso de operadores de classes com definição do escopo em tempo de execução ("late binding"), aliado às Relações, foi essencial para permitir essa ampla flexibilidade. Considerando que esse conceito não é uma das características bem resolvidas na linguagem de programação usada [Hu, 90][Stroustrup, 84][Dewhurst, 88], a solução apresentada é um passo significativo para o uso de C++ em sistemas especialistas, e pode ser considerada mais eficaz e mais simples do que a arquitetura proposta por Hu para tanto. Esse é um resultado colateral significativo, considerando-se que pode-se detectar uma tendência para o uso de C++ com essa finalidade.

A rede de inferência implementada foi plenamente utilizada no protótipo desenvolvido, onde praticamente todos os recursos especificados nas classes básicas foram necessários, com exceção das duas sub-classes de *Neuron* já mencionadas. O processamento das regras através de sua representação como rede de inferência torna os procedimentos muito mais eficientes do que o tipo de processamento simbólico normalmente usado por ferramentas de sistemas especialistas, como o TIRS [IBM, 91 a e b] ou NEXPERT [Neuron Data, 90], além de requerer menos memória. Apresenta também uma boa flexibilidade quanto à possibilidade de se implementar estratégias regressivas, progressivas ou oportunísticas, permitindo qualquer forma de acionamento, através das instâncias de *Conclusões*, de *ListaRegras* ou de *Fonte*, ou de seus agrupamentos em instâncias das sub-classes de *Bloco*. Pode-se inclusive implementar com facilidade uma nova rede representando uma outra instância de *BaseConhecimento*, onde meta-regras associadas à escolha instantânea de uma estratégia estejam representadas.

Ainda quanto à rede de inferência, a classe *Transdutor* e suas sub-classes representam uma solução simples e eficiente para a conexão do mecanismo de inferência com rotinas procedurais, uma exigência essencial para o uso de instrumentação associada à sistemas especialistas, ou para sistemas híbridos.

Deve-se ressaltar que a rede de inferência pode ser facilmente utilizada de forma completamente isolada da rede semântica, para implementar sistemas baseados em regras, onde as rotinas associadas às instâncias das sub-classes de *Transdutor* podem realizar a comunicação com o usuário, através do método tradicional de perguntas e respostas.

Por outro lado, como um aspecto de solução ainda não satisfatória, a geração manual de linhas de código para cada *neuron* e *sinapse* necessários, faz com que o uso atual da rede de inferência seja restringido pela exigência de módulos compilados para a representação das regras.

Finalmente, apesar de parte integrante da rede semântica para a extração dinâmica do conteúdo dos picos dos espectros, o método de reconhecimento de padrões pode ser considerado também como parte da rede de inferência, uma vez que são os seus resultados que inicializam o estado da rede para o procedimento de inferência, além de fornecerem os sintomas mais significativos para o diagnóstico. As duas gramáticas desenvolvidas constituem uma solução aparentemente bastante eficaz para a redução de dados e a automação necessária à análise automática dos espectros, permitindo o seu ajuste para uma boa sensibilidade aos fenômenos que ocasionam alteração nas vibrações e ao mesmo tempo evitando que alarmes falsos sejam continuamente disparados. Os resultados visuais são facilmente compreendidos o que facilita a operação do sistema e a manutenção do conhecimento. Há necessidade agora de testes exaustivos com sinais reais, para verificar o seu

funcionamento com informações mais complexas. No entanto, a árvore apresentada na figura 4.5 foi gerada a partir de um sinal adquirido em um compressor de amônia, o que permite esperar bons resultados desse método.

Deve-se comentar que o potencial de aplicação das gramáticas vai além da experiência exposta na literatura de uma forma geral, podendo vir a permitir futuramente o desenvolvimento de novos métodos de análise. Por outro lado, a definição das gramáticas não pode ser considerada fechada, havendo necessidade de se confirmar a opção axiomática pelos tipos de picos adotados.

7.4 CONCLUSÕES E ÁREAS PARA DESENVOLVIMENTO FUTURO

Diversas atividades nos campos envolvidos com as áreas que constituíram o escopo central do trabalho podem ser objeto de pesquisas futuras.

Quanto ao conhecimento a principal atividade a ser desenvolvida consiste no projeto e montagem de uma bancada de testes suficientemente flexível para modelar a mais ampla gama de sistemas mecânicos, com o objetivo no primeiro momento de consolidar o modelo implementado e em um segundo de iniciar o estudo de casos específicos, tal como fraturas em rotores de turbo-máquinas, por exemplo.

As redes semânticas e de inferência como desenvolvidas para o protótipo apresentam já um bom potencial de uso na área de vibrações. Novas aplicações poderiam ser tentadas em outras áreas, visão computacional ou controle em tempo real por exemplo, procurando-se identificar pontos fracos que possibilitem novos desenvolvimentos.

Quanto ao sistema protótipo, a evolução passa pela complementação da rede de inferência abrangendo todos os níveis já especificados e a integração com um sistema de aquisição de dados para monitorar ensaios montados com a bancada mencionada. No caso apresentado na seção 7.1.4, a seleção entre os dois diagnósticos possíveis referentes à problemas com engrenagens seria realizada com uma regra do sétimo nível indicando o método do cepstrum como forma de diferenciação.

Para a ampliação da rede de inferência do protótipo, faz-se necessário no entanto o desenvolvimento de uma gramática para a conversão automática das regras em módulos da rede de inferência. Elas seriam apenas editadas com qualquer processador de texto e armazenadas em um arquivo ASCII, seguindo uma sintaxe a ser ainda especificada, porém já indicada nas regras expostas no capítulo 6. O uso dessa gramática pode se dar de duas formas: gerando o código na linguagem de programação a ser posteriormente compilado ou como um módulo interpretativo que acessa os arquivos de regras e gera a rede em tempo de execução. As duas soluções

devem ser avaliadas para ponderarem principalmente o uso de memória principal, tendo em vista soluções de baixo custo utilizando o sistema operacional DOS.

É fundamental se procurar o teste final de um protótipo em uma máquina real de grande porte. o que exige no entanto recursos extra universidade para a sua implementação, e certamente a atividade concatenada de toda uma equipe de trabalho.

Como conclusão final, o uso dessa nova classe de instrumentos de monitoramento e diagnóstico parece ser mandatório para sistemas que envolvam alto custo na parada de produção, ou principalmente o risco de vidas humanas. A tecnologia para tanto já se encontra disponível a baixo custo, como deve ter ficado explicitado através desse trabalho, onde se procurou fazer uso de forma integrada de diversas técnicas desenvolvidas isoladamente em áreas diferentes, para possibilitar a implementação de sistemas de operacionalidade o mais simples possível.

BIBLIOGRAFIA

- Angelo, M., Vibration Monitoring of Machines, Technical Review, No. 1, Bruel & Kjaer, Denmark, p. 1-36, 1987.
- Antoniou, A., Digital Filters Synthesis and Design, McGraw-Hill, 1979.
- Bate, G. H. Vibration Diagnostic for Industrial Electric Motor Drives, Application Notes, Bruel & Kjaer, Denmark 1988.
- Cheng, Y., Waveform Correlation by Tree Matching, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 7, No. 3, p. 299-305, May 1985.
- Collacott, R. A., Mechanical Fault Diagnosis and Condition Monitoring, Chapman and Hall, London, 1977.
- Dewhurst, S. C. e Stark, K. T., Programando em C++, Editora Campus, 1990.
- Downham, E. e Woods, R., The Rationale of Monitoring Vibration on Rotating Machinery in Continuously Operating Process Plant, ASME Vibration Conference, Toronto, 1971.
- Ericsson, U., Vibration Monitoring- the State of the Art - with Case Studies, VDI Berichte, p. 289-304, 1986.
- Frarey, J. L. et al., An Expert System for On-Line Machinery Diagnostics, EPRI NP-3562, Final Report, prepared by Shaker Research Corporation, Latham, New York, 1984.
- Fu, K. S., Syntactic Methods in Pattern Recognition, Academic Press, New York, 1974.
- Fu, K. S., edited by, Syntactic Pattern Recognition Applications, Springer-Verlag, Berlin, 1977.
- Gonzalez, R. C., and Thomason, M. G., Syntactic Pattern Recognition An Introduction, Addison-Wesley, Massachusetts, 1978.
- Hayes-Roth, F. et al., An Overview of Expert Systems, in Building Expert Systems, edited by Hayes-Roth, F., Addison-Wesley, Reading, p. 89-26, 1983.
- Harmon, P. e King, D. Sistemas Especialistas, Editora Campus, 1988.

- Horowitz, S. L., Peak Recognition in Waveforms, em Syntactic Pattern Recognition Applications, editado por Fu, K., Springer-Verlag, Berlin, p 31-49, 1977.
- Hu, D., C/C++ for Expert Systems, MIS Press, 1989.
- IBM TIRS-Application Design and Development Guide, IBM, junho de 1991 (A).
- IBM TIRS-General Information Manual, IBM, abril de 1991 (B).
- Krishnan, G. S., Case Study on Vibration Analysis, Journal of Condition Monitoring, BHRA, No. 1, Bedford, p. 47-52, 1987.
- Inman, D. J., Vibration: with control measurement and stability, Prentice-Hall, N. Jersey, 1989.
- ISO 2372, Mechanical Vibration of Machines with Operating Speeds from 10 to 200 rev/s - Basis for Specifying Evaluation Standards, 1974.
- ISO 3945, Mechanical Vibration of Large Rotating Machines with Speed Range from 10 - 200 rev/s - Measurements and Evaluation of Vibration Severity, 1977.
- Liu, Hsi-Ho, A Rule-Based System for Automatic Seismic Discrimination, Pattern Recognition, Vol. 18, No. 6, p. 459-463, 1985.
- Levine, R. I. et al, Inteligência Artificial e Sistemas Especialistas, McGraw-Hill, 1988.
- Luukkanen, P., e Villanen, A., Computerized Vibration Analysis in Trouble Shooting - Some Experiences Gained at Finnish Power Plants, Journal of Condition Monitoring, BHRA, No. 1, Bedford, p. 47-52, 1987.
- Mantas, J., Methodologies in Pattern Recognition and Image Analysis - A Brief Survey, Pattern Recognition, Vol. 20, No. 1, p. 1-6, 1987.
- Nebel, B., How wel does a vanilla loop fit into a frame?, Data & Knowledge Engineering, v. 1, no. 2, p.181-194, 1985.
- Nepomuceno, L. X. Técnicas de Manutenção Preditiva, Editora Edgard Blucher, Vol. 1 e 2, 1990.
- Neuron Data, NEXPERT Function Description Manual, 1990.
- Nóbrega, E. G. O. e Tozzi, C. L., Um Sistema de Análise Espectral Atual para o Monitoramento de Vibrações de Máquinas e Estruturas, X COBEM, Rio de Janeiro, p. 315-318, 1989.

- Nóbrega, E. G. O. e Tozzi, C. L., Um Sistema Especialista para o Diagnóstico de Máquinas Rotativas através da Análise de Vibrações, 8o. CBA, Belém, p. 391-396, 1990 (A).
- Nobrega, E. G. O. e Tozzi, C. L. , Distributed Knowledge Representation for on-line Fault Diagnosis of Rotating Machines, 3rd. International Conference on Condition Monitoring, London, 1990 (B).
- Nóbrega, E. G. O. e Tozzi, C. L., Structural Pattern Recognition for Peak Detection on Vibration Spectra, IMMDC2, Los Angeles, 1990 (C).
- Oppenheim, A. V., e Schafer, R. W., Digital Signal Processing, Prentice-Hall, New Jersey, 1975.
- o'Sullivan, M., Systematic Machine-Condition Monitoring a Case Study from Parenco Paper Mill in Holland, Application Notes, Bruel & Kjaer, Denmark, 1990.
- Papakonstantinou, G. et al, An Attribute Grammar for QRS Detection, Pattern Recognition, Vol. 19, No. 4, p. 297-303, 1986.
- Papoulis, A., Signal Analysis, McGraw-Hill, 1977.
- Randall, R. B. Frequency Analysis, Bruel & Kjaer, Denmark, 1987.
- Reason, J., On-Line Diagnostic Cut Engine Maintenance, Power, p. 27-30, Jan 1980.
- Skordalakis, E., Syntactic ECG Processing: a Review, Pattern Recognition, Vol. 19, No. 4, p. 305-313, 1986.
- Smith, D. J. Diagnostic Leads the Way in Predictive Maintenance, Power Engineering, No. 5, p. 12-19, 1987.
- Stefik, M., et al., Building an Expert System, in Building Expert Systems, edited by Hayes-Roth, F., Addison-Wesley, Reading, p. 89-26, 1983.
- Stroustrup, B., C++, A Computer Language, 1985.
- Taylor, J., Accurate Predictive Maintenance Programs, Tappi Journal, p. 113-117, Nov 1988.
- Udupa, J. K. e Murthy, S. N., Syntactic Approach to ECG Rhythm Analysis, IEEE Trans. Biomed. Eng. BME-27, p. 370-375, 1980.

- Voegtli, D., Computer Supported Solutions for the Maintenance and Operation of Gas Turbines, Turbomachinery International, p. 27-31, May/Jun 1987.
- Waterman, D. A. and Hayes-Roth, F., An Investigation of Tools for Building Expert Systems, in Building Expert Systems, edited by Hayes-Roth, F., Addison-Wesley, Reading, p. 89-26, 1983.
- Wavetek Rockland Scientific Inc., Machinery Vibration Diagnostic Guide, Application Note 22, Wavetek, Rockleigh, 1984.
- Winston, Artificial Intelligence, Addison-Wesley, Reading, 1984.
- Zimmer, S. e Bently, D. E., Predictive Maintenance Programs for Rotating Machinery Using Computerized Vibration Monitoring Systems, VDI Berichte, p. 265-287, 1986.