

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE PROJETO MECÂNICO

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL
DA TESE DEFENDIDA POR WALDEMAR SCUDELLER
JUNIOR E APROVADA PELA
COMISSÃO JULGADORA EM 24 / 09 / 93

RLR
ORIENTADOR

Estudo e Implementação de Critérios para Monitoramento
Contínuo de Máquinas Hidroelétricas

por Waldemar Scudeller Jr.
Orientado pelo Prof. Dr. Robson Pederiva

Trabalho apresentado à Comissão de Pós-
Graduação da Faculdade de Engenharia Me-
cânica, como parte dos requisitos para ob-
tenção do título de Mestre em Engenharia
Mecânica.

↓
M

Campinas, 24 de agosto de 1993.

← Ass.

Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Mecânica

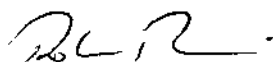
TESE DE: MESTRADO

TÍTULO DA TESE: ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE CRITÉRIOS PARA
MONITORAMENTO CONTÍNUO DE MÁQUINAS
HIDROELÉTRICAS.

AUTOR: WALDEMAR SCUDELLER JR.

ORIENTADOR: PROF. DR. ROBSON PEDERIVA.

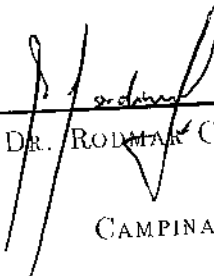
APROVADA POR:



PROF. DR. ROBSON PEDERIVA



PROF. DR. ARTHUR PALMEIRA RIPPER NETO



PROF. DR. RODMAR CARDINALI

CAMPINAS, 24 DE SETEMBRO DE 1993.

À Leila, minha amada esposa e
à Aline, minha amada filha

Agradecimentos

Ao Prof. Robson Pederiva pelo apoio, orientação e estímulo. Principalmente na confiança e amizade em mim depositadas.

Aos meus pais, meus irmãos e toda minha família pelo apoio e pela motivação ao longo destes anos.

Aos amigos Vicente Lopes Jr., Janito V. Ferreira, Milton Dias Jr., Humberto Camargo Piccoli e Rodmar Cardinali pela ajuda, sugestões e boa vontade em atender as minhas dúvidas.

Ao amigo Luiz Eduardo Roncato Cordeiro pelo apoio, amizade e ajuda com algumas dificuldades (FFT, filtragem digital e utilização do *scanner*).

Ao amigo Mauro Jorge Atalla pelo estímulo, amizade e apoio nestes anos.

A Companhia Energética de São Paulo, pelo apoio financeiros nas viagens para as medições experimentais, pela disposição de equipamentos e fornecer a motivação desta tese. Em especial gostaria de agradecer a Luis Tadeu Lopes de Freitas, Hamilton H. Tiba e Rui Riyo Ueda, que com sua boa vontade e amizade tornaram o trabalho mais fácil e agradável.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

A todos do Departamento de Projeto Mecânico, pela ajuda, infra-estrutura e pelo ótimo local de trabalho.

Resumo

Neste trabalho propõe-se uma metodologia para a aplicação das diversas técnicas de monitoramento para o caso específico de máquinas hidroelétricas.

Esta metodologia consiste em inserir o programa de monitoramento dentro de um ciclo fechado, onde as ocorrências de falhas são estudadas com o auxílio de um modelo matemático. Desta forma, pode-se através de simulações, estudar o comportamento das diferentes técnicas de monitoramento quando aplicadas as situações ocorridas na prática. Com o resultado das simulações pode-se realimentar o ciclo visando uma maior eficiência.

A fim de atingir estes objetivos, um *software* específico para o monitoramento de máquinas hidroelétricas foi desenvolvido, para o uso da Companhia Energética de São Paulo (CESP) através de um convênio. Finalmente, os resultados e considerações sobre a implantação desta metodologia na CESP são apresentadas.

Abstract

This work proposes a new methodology in the application of monitoring techniques to the case of hydroelectric machinery.

This methodology consists of operating the monitoring program in a closed loop, where the faults are studied with the help of a mathematical model. This way one can, by means of a computer simulation, study the behavior of various techniques when applied to real life situations. With the results of the simulation one can iterate within the loop to achieve better performance.

Aiming to fulfill these objectives, a software was specifically developed for monitoring hydroelectric machinery at the Companhia Energetica de Sao Paulo - CESP, who funded this research. The results and considerations about the implementation of this methodology at CESP are presented.

Conteúdo

Agradecimentos	i
Resumo	ii
Abstract	iii
1 Introdução	1
1.1 Metodologias de Manutenção	1
1.1.1 Manutenção corretiva	2
1.1.2 Manutenção preventiva	2
1.1.3 Manutenção preditiva	2
1.2 Monitoramento	4
1.3 Tipos de monitoramento	5
1.3.1 Monitoramento da situação	6
1.3.2 Monitoramento da condição	6
1.3.3 Monitoramento de Desempenho	7
1.3.4 Monitoramento com diagnósticos	7
1.3.5 Monitoramento com prognósticos	7
1.4 Programas Comerciais	7
1.4.1 COMPASS	8
1.4.2 MasterTrend	8
1.4.3 MachineView	8
1.4.4 Nspectr II	9
1.4.5 SUPER	9
1.4.6 Data Manager	10
1.4.7 Trendmaster	10
1.4.8 Vibro-Analyst	10
1.4.9 MIDAS	11
1.5 Tabela Comparativa	11
1.6 Objetivos	15

2	Métodos de Análise	17
2.1	RMS	17
2.2	Órbita	19
2.2.1	Diagnóstico	19
2.2.2	Raio Máximo	19
2.2.3	Filtragem Digital	20
2.3	Espectro	22
2.4	Cascata	26
2.5	Mapa	27
2.6	Veq	29
2.6.1	Formulação	29
2.7	Banda	33
2.8	Tendência	35
3	Sistema de Monitoramento Permanente	37
3.1	Descrição	37
3.2	Fluxo da Informação	39
3.3	Diagrama Funcional	39
3.4	Funcionamento	39
3.4.1	Janela de Controle	41
3.4.2	Janela de Dados Auxiliares	45
3.4.3	Janela de Informações	46
3.4.4	Janela de Relatórios	48
3.4.5	Janela de Alarmes	49
3.4.6	Janela de Gráficos	51
4	Simulações	53
4.1	Modelo Matemático	55
4.2	Descrição da Simulação	57
4.3	Resultados	59
4.3.1	Caso 1	59
4.3.2	Caso2	62
4.3.3	Caso 3	65
4.4	Comentários	68
5	Aplicações	69
5.1	Histórico	69
5.2	Transdutores permanentes	70
5.3	Sistema de Monitoramento	70
5.4	Resultados	73
5.5	Comentários	79

6	Conclusões	80
	Bibliografia	82
A	Descrição dos Arquivos e Fluxograma	85
A.1	Arquivo de dados	85
A.2	Arquivos de Configuração	87
A.2.1	Configuração do Veq	87
A.2.2	Configuração das Máscaras	87
A.3	Fluxograma	88

Lista de Figuras

1.1	Monitoramento de condição	3
1.2	Processo básico	4
1.3	Sistema de monitoramento completo	5
1.4	Hierarquia do monitoramento	6
1.5	Metodologia de Monitoramento	16
2.1	Resumo do critério de severidade de vibração de acordo com a VDI 2056	18
2.2	Função Resposta em Frequência Desejada e do Filtro Yulewalk	21
2.3	Espectro de um equipamento real	23
2.4	Máscara de alarme no espectro	25
2.5	Cascata de uma desaceleração	26
2.6	Mapa de Espectros	27
2.7	Mapa de Espectros	28
2.8	Exemplo de faixas de frequência com maior influência dos modos	31
2.9	Diagrama de Cálculo do V_{eq}	32
2.10	Espectro real em 1/3 de oitava	34
2.11	Exemplo de cálculo de tendência	35
3.1	Fluxo da Informação	40
3.2	Diagrama Funcional	41
3.3	Janela de Controle	42
3.4	Janela de Dados Auxiliares	45
3.5	Janela de Informações	47
3.6	Janela de Relatórios	48
3.7	Janela de Alarmes	50
4.1	Diagrama da bancada de testes	54
4.2	Diagrama Esquemático	56
4.3	Fluxo da Informação na Simulação	58
4.4	Força de Excitação (normalizada)	59
4.5	Caso 1: Cascata – Ponto 3	60
4.6	Caso 1: Mapa de Espectros – Ponto 3	60
4.7	Caso 1: RMS – Ponto 1	61

4.8	Caso 1: Cruzamento Velocidade $\times$ Raio Máximo (em %)	61
4.9	Caso 2: Cascata – Ponto 4	62
4.10	Caso 2: Mapa de Espectros – Ponto 3	63
4.11	Caso 2: Cruzamento RMS $\times$ Variação (em %)	63
4.12	Caso 2: Cruzamento Máxima Amplitude (1) $\times$ Variação (em %)	64
4.13	Caso 3: Cascata – Ponto 4	65
4.14	Caso 3: Corte em Frequência – 40 <i>Hz</i> , Ponto 4	66
4.15	Caso 3: <i>Veq</i>	66
4.16	Caso 3: Cruzamento Máxima Amplitude $\times$ RMS – Ponto 2 (em %)	67
5.1	Foto da Caixa de Controle e Transdutor	71
5.2	Diagrama do Sistema de Monitoramento aplicado a Cesp	72
5.3	Cesp: Cascata – Ponto 1	73
5.4	Cesp: Espectro – Ponto 1	74
5.5	Cesp: Mapa de espectros	74
5.6	Cesp: Valor RMS	75
5.7	Cesp: Órbita 40 MW	76
5.8	Cesp: Órbita 40 MW - Com filtro em 20 <i>Hz</i>	76
5.9	Cesp: Potência $\times$ <i>Veq</i>	77
5.10	Cesp: Cruzamento RMS $\times$ Raio Máximo (em %)	77
5.11	Cesp: Cruzamento Máxima Amplitude $\times$ Amplitude em 1.37 <i>Hz</i>	78

Lista de Tabelas

1.1	Descrição dos itens analisados	12
1.2	Comparação dos diversos <i>softwares</i> comerciais (I)	13
1.3	Comparação dos diversos <i>softwares</i> comerciais (II)	14
2.1	Defeitos em eixo determinados por sensores de proximidade	19
2.2	Frequências usais de falhas	24
3.1	Teclas Válidas na Janela Gráfica	52

Capítulo 1

Introdução

A eficiência com a qual a indústria utiliza a força de trabalho e seus equipamentos determina a sua competitividade. Esta eficiência é melhor traduzida como a diminuição dos custos operacionais.

Vários fatores podem ser otimizados visando diminuir os custos operacionais. A manutenção dos equipamentos é um fator importante nesta otimização, pois contribui de forma expressiva nos custos de produção. Esta otimização não deve utilizar somente melhores projetos ou adotar novas metodologias de produção, mas também tentar reduzir os custos da manutenção.

Os novos métodos produtivos, como *just in time* (entrega de peças na hora do uso), necessitam do equipamento operacional todo tempo. Durante uma parada ocasionada por uma falha, o custo de produção aumenta proporcionalmente ao tempo parado. Este problema é ainda mais crítico nos processos de produção contínua, como é o caso da produção de energia elétrica. Deste modo, a importância da manutenção se torna ainda mais evidenciada.

A atual tendência de se utilizar grandes e sofisticadas instalações, faz com que a metodologia de manutenção deva ser cuidadosamente escolhida para maximizar a disponibilidade e aumentar o ciclo de vida lucrativo dos equipamentos.

A seguir, serão apresentadas as diversas metodologias existentes.

1.1 Metodologias de Manutenção

Atualmente se utilizam vários métodos de manutenção de máquinas, que podem ser agrupados em três categorias. Estas categorias diferem basicamente em quando a manutenção será aplicada e com que frequência. Na **manutenção corretiva** a máquina funciona até falhar, a manutenção age então corrigindo esta falha e recolocando o equipamento em serviço. Caso não se deseje uma interrupção da produção, algum equipamento redundante precisa ser utilizado, caso se deseje o mínimo tempo de recolocação deve-se fazer um estoque com peças de reposição. Com qualquer uma destas alternativas o custo indireto pode ser bastante significativo.

A **manutenção preventiva** tenta evitar as falhas ocasionais executando um procedimento de troca de componentes em períodos regulares. A manutenção de aviões ainda utiliza largamen-

te este tipo de metodologia. Como os componentes são trocados invariavelmente nos intervalos estipulados, muitas vezes troca-se componentes desnecessariamente.

Uma outra metodologia de manutenção é a **manutenção preditiva**, onde o comportamento da máquina é monitorado em tempos regulares e tenta-se prever o instante da falha. Com isso pode-se programar uma interrupção da produção e executar a manutenção no menor tempo possível. Apesar de monitorar o comportamento da máquina, não é possível garantir que não existiram falhas ocasionais.

A prática tradicional de manutenção de máquinas foi baseada, principalmente, nos dois primeiros métodos. Somente nas últimas décadas a manutenção preditiva, baseada na condição, começou a ser utilizada.

1.1.1 Manutenção corretiva

Aplicada principalmente em instalações onde operam basicamente equipamentos de baixo custo e existem duplicatas de cada sistema importante. Considerando que não é significativa a perda de produção até que o equipamento seja recolocado em serviço, nem sempre é vantajoso utilizar uma metodologia mais sofisticada de manutenção.

Entretanto, em alguns casos, uma máquina importante no processo pode funcionar até o colapso. Para diminuir o tempo de manutenção de forma a minimizar os prejuízos pela interrupção da produção forma-se um grande estoque de peças sobressalentes. Desta maneira, os custos do armazenamento e custos financeiros aumentam ainda mais os custos de manutenção.

1.1.2 Manutenção preventiva

Utilizada em instalações onde máquinas importantes, que podem gerar grandes prejuízos a produção, não podem ser duplicadas, em função do seu custo elevado. Para prevenir um possível colapso são executadas em intervalos fixos de tempo algumas operações de manutenção.

Os intervalos entre as manutenções são geralmente determinados de uma maneira estatística, analisando o período medido a partir da máquina nova ou totalmente reformada até quando o fabricante espera uma determinada porcentagem de falhas. Este é o procedimento básico da manutenção utilizada atualmente em máquinas hidroelétricas.

Em alguns casos a manutenção preventiva é antieconômica pois muitas vezes se troca um componente que ainda está em boas condições. Devido ao alto custo dos componentes, como é o caso de máquinas hidroelétricas, este tipo de manutenção é muito onerosa.

1.1.3 Manutenção preditiva

Com o monitoramento das condições de cada máquina específica, pode ser determinado um valor que traduz a "saúde" da máquina. A manutenção somente será executada quando a interpretação destes valores mostrar isto necessário.

O principal problema da manutenção preditiva é o alto custo da sua implementação. Vários sensores e condicionadores devem ser instalados nas diversas máquinas, cada um destes compo-

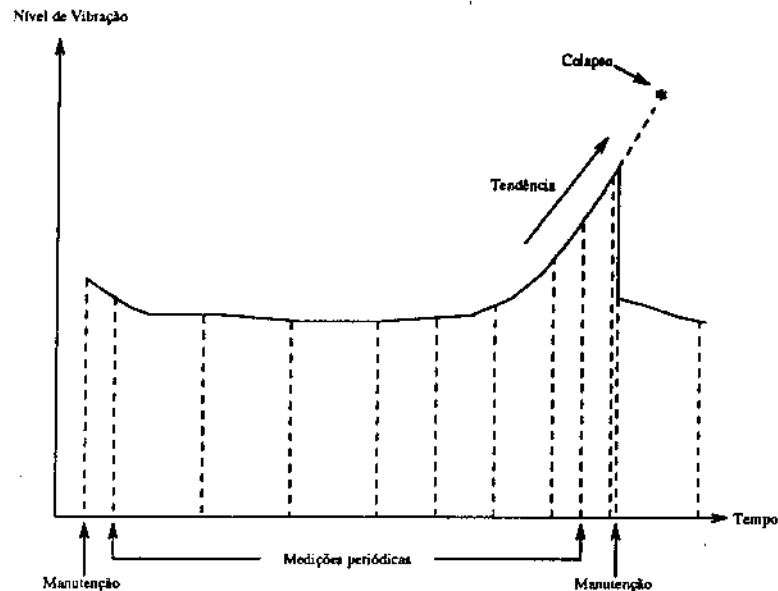


Figura 1.1: Monitoramento de condição

nentes tem um custo elevado. Além destes custos ainda é preciso incluir os custos dos painéis de controle, sistema de tratamento de dados e o treinamento do pessoal da manutenção.

A aplicação da manutenção baseada no monitoramento pode ser considerada de diversas maneiras [Tra89], como por exemplo, a checagem da condição e a comparação desses valores com algum nível aceitável. Alguns programas de monitoramento utilizam os dados do monitoramento e dos limites, em uma abordagem bem simples, para calcular quando a manutenção é necessária, a partir de uma extrapolação destes dados. Este procedimento é ilustrado na figura 1.1 [Bk]. Os benefícios da implementação de um programa de manutenção preditiva tem que ser equilibrado com seus custos, decorrentes das despesas de aquisição de computadores, instrumentação, programas, pessoal e treinamento. Outro ponto importante é que, apesar da utilização das técnicas de monitoramento, não se garante a eliminação de falhas inesperadas, deste modo uma justificativa cuidadosa tem que ser elaborada.

A recente facilidade de adquirir dados e informações dos processos fez com que um grande número de fabricantes desenvolvessem sistemas de auxílio à manutenção. Os fabricantes de coletores de dados e de sistemas de computação chamam seus produtos de "sistemas de monitoramento". Os fabricantes de sensores consideram as medidas como "diagnostico". A definição destes termos não é exata, mesmo na literatura.

A manutenção preditiva depende basicamente do processo de monitoramento. Por este motivo é apresentado a seguir um estudo do monitoramento, seus diversos tipos e problemas.

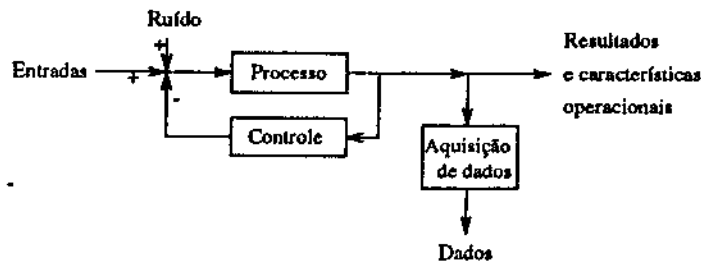


Figura 1.2: Processo básico

1.2 Monitoramento

Um processo de operação, como por exemplo a geração de energia, tem controles de processo específicos, ruídos, e grandezas físicas como resultado (por exemplo: potência e temperaturas). Esse processo também tem outras características operacionais tais como custo, disponibilidade, eficiência e capacidade.

Este processo básico é representado na figura 1.2 [Bra89]. Para executar uma vigilância sobre este sistema, um grande número de sensores e coletores de dados são necessários. Nos elementos supervisionados, a aquisição dos dados podem variar da obtenção manual dos dados à um sistema automatizado, com sensores e computadores. A aquisição dos dados pode incluir informações de todas as fontes que podem ou devem ser afetadas pelo processo, como por exemplo a vibração no eixo, temperatura de óleo, potência gerada, etc.. Parâmetros indiretos, como registro da produção, vendas e custos de manutenção também podem ser incluídos no processo de monitoramento.

Freqüentemente o sistema descrito na figura 1.2 [Bra89] é considerado um sistema de monitoramento. Na verdade este é um sistema de aquisição de dados. Para constituir um sistema de monitoramento, os dados teriam que ser utilizados para influenciar este processo produtivo. Um sistema de monitoramento deve ser pensado como um fluxo de informações, incluindo uma fonte dos dados, a função de supervisão, e um usuário destes dados. A utilização dos dados coletados é essencial em um monitoramento efetivo.

A figura 1.3[Bra89] mostra um sistema de monitoramento completo, onde a informação coletada é usada como realimentação no processo. Após os dados serem adquiridos, um sistema de monitoramento efetivo deve ser capaz de ordenar e selecionar toda a informação pertinente ao processo, das informações irrelevantes. Com o conhecimento das exatas condições de operação, interpretar os dados.

A interpretação dos dados depende da perícia do analista. Tipicamente, o pessoal da manutenção ou especialistas, dependendo do tipo de interpretação, chega a conclusões das condições do processo, "saúde" da máquina ou desempenho. A tendência atual é capturar alguns dos conhecimentos e experiências dos especialistas em programas computacionais, chamados sistemas especialistas, onde todas as rotinas básicas de interpretação dos dados seria automatizada.

Após as conclusões sobre as condições do processo serem determinadas, uma decisão sobre como alterar algum dos aspectos do processo ou do seu controle deve ser feita. Finalmente, a ação

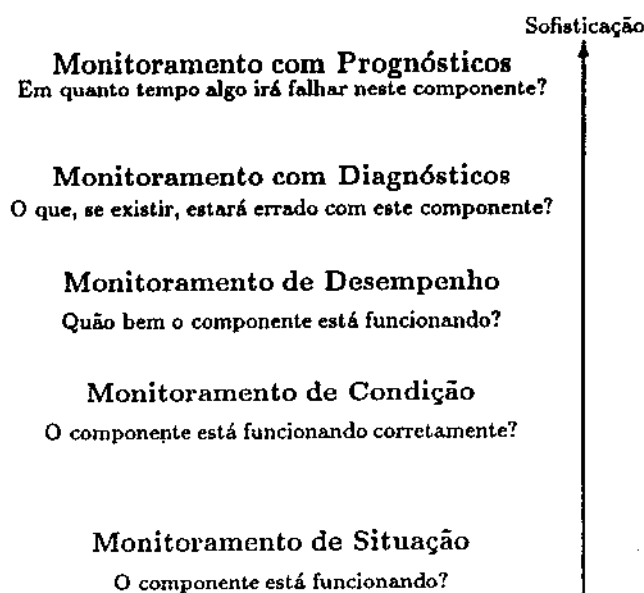


Figura 1.4: Hierarquia do monitoramento

- Monitoramento com diagnósticos;
- Monitoramento com prognósticos.

Esta lista está ordenada de uma forma hierárquica, do nível mais baixo de sofisticação para o nível mais alto. As principais diferenças entre os níveis desta hierarquia estão relacionadas com o tipo de informação coletada e a sua interpretação. Além disto os custos aumentam com a sofisticação, deste modo os níveis mais elevados são também os mais onerosos. A figura 1.4 ilustra esta hierarquia.

1.3.1 Monitoramento da situação

Este é o nível mais baixo e indica se um componente, um subsistema ou um sistema (a seguir referenciado como componente) está funcionando. O parâmetro indicativo não necessariamente é uma medida do resultado principal do componente. Tipicamente o resultado do monitoramento são respostas binárias (sim ou não), uma luz é ligada quando o sistema está ligado, ou um indicador é ligado quando o componente não está funcionando. O monitoramento da situação pode ser traduzido pela seguinte pergunta: “O componente está funcionando?”.

1.3.2 Monitoramento da condição

É o próximo nível de monitoramento e indica se um componente está trabalhando corretamente. Geralmente medições mais sofisticadas são necessárias e algum tipo de redução dos dados tem que ser executados para garantir um julgamento. Entretanto, a resposta da questão

do monitoramento da condição: **“O componente está funcionando corretamente?”**, é essencialmente um sim ou não. Apesar de estar no segundo nível na hierarquia, este tipo de monitoramento pode ser muito sofisticado e caro.

1.3.3 Monitoramento de Desempenho

Está em um nível mais elevado em relação ao monitoramento da condição, mas é muito similar. De fato, muitos dos sistemas comerciais de monitoramento de condição são monitores de performance. Neste monitoramento a operação do sistema é julgada conforme critérios de eficiência, implicando em ter um número como resultado. Este monitoramento induz a seguinte questão: **“Quão bem o componente está funcionando?”**. As respostas típicas são valores numéricos relacionado com a eficiência ou um critério de eficiência e tem que ser julgadas em termos da experiência ou de referências teóricas. Note que, igualmente com essa interpretação adicional, o monitoramento de desempenho pode ser reduzido ao nível do monitoramento da condição, incorporando-se chaves que respondam as perguntas no âmbito da condição.

1.3.4 Monitoramento com diagnósticos

Neste nível de monitoramento utiliza-se muitas das informações adquiridas nos níveis inferiores, mas com um diferente ponto de vista. Ao invés de assumir que o sistema está trabalhando em algum nível de desempenho (ou não está trabalhando), neste nível existe a possibilidade de algo de errado estar acontecendo. O monitoramento com diagnósticos pergunta: **“O que, se existir, estará errado com este componente?”**. Este monitoramento considera os dados armazenados no passado e os dados atuais para determinar a condição atual, e assume que a manutenção deverá corrigir o que está errado.

1.3.5 Monitoramento com prognósticos

É muito similar ao monitoramento com diagnósticos pois utiliza as mesmas informações. Entretanto executa procedimentos de análise mais sofisticados para tentar prever quando algum componente irá falhar, utilizando a história pregressa, ou alguma teoria de falha como base de modelo. O monitoramento com prognósticos leva a seguinte questão: **“Em quanto tempo algo irá começar a falhar neste componente?”**. A resposta deve variar de acordo com analista e com a técnica utilizada. Neste monitoramento os dados armazenado e situação atual são utilizados para predizer futuras situações ou condições.

1.4 Programas Comerciais

Existem no mercado uma grande variedade de programas (*software*) de monitoramento, cobrindo todos os tipos de monitoramento apresentados. Os fabricantes de sistemas de aquisição de dados e sensores geralmente fornecem os melhores *softwares*. Usualmente os programas utilizados nos sistemas de monitoramento são muito gerais e são projetados para equipamentos

de pequeno porte ou auxiliares (bombas, compressores, motores, etc.). Existem poucos *softwares* para equipamentos de grande porte. Nestes casos as empresas desenvolvem seu próprio sistema de monitoramento, tentando cobrir as lacunas dos sistemas comerciais. Alguns dos *softwares* encontrados no mercado são apresentados a seguir, acompanhados de uma análise crítica.

1.4.1 COMPASS

- **Nome:** Computerized Prediction, Analysis & Safety System
- **Empresa:** Brüel & Kjær
- **Plataforma:** Unix, X-Windows, Ethernet
- **Descrição:** Sistema integrado de monitoramento, comercializado em conjunto com monitores, sensores permanentes e coletores de dados manuais. Algumas das funções de análise são automatizadas, os diversos canais monitorados são analisados com diferentes métodos, podendo gerar avisos e alarmes. Os níveis de alarme podem acompanhar as características operacionais, chamado AMS (*Adaptative Monitoring Strategy*). Pode tratar tanto dados coletados com os sensores/monitores como dados coletados manualmente, sendo portanto indicado para equipamentos de grande porte (sensores permanentes) e equipamentos auxiliares (aquisição manual). Os dados podem ser utilizados remotamente, a partir de outras estações de trabalho ou terminais gráficos via rede local.

1.4.2 MasterTrend

- **Nome:** MasterTrend
- **Empresa:** Computational Systems Incorporated
- **Plataforma:** IBM-PC, RS-232
- **Descrição:** Sistema comercializado em conjunto com coletores manuais de dados e programa de gerenciamento e análise. Todo o tratamento de sinais é feito nos coletores de dados, que tem capacidade de executar aquisição de dados, FFT, cálculos de balanceamento, alarme, gráficos, e armazenamento, para uma posterior análise em um computador pessoal (PC). No computador as rotas e os níveis de alarme podem ser definidos ou alterados, como também as análises de tendência e relatórios. Tendo como base a aquisição manual de dados é mais indicado para equipamentos de pequeno porte ou auxiliares (motores, bombas, compressores, etc.).

1.4.3 MachineView

- **Nome:** CSI 3100 MachineView system
- **Empresa:** Computational Systems Incorporated

- **Plataforma:** IBM-PC, MS-DOS, Ethernet
- **Descrição:** Sistema composto de vários programas computacionais que executam os procedimentos de análise, diagnóstico e armazenamento e de *hardware* específico para a aquisição, com grande capacidade de canais. Pode ser configurado para funcionamento em rede local, permitindo o acesso remoto dos dados. Os dados armazenados podem sofrer uma compactação (com o módulo *Archive*) e serem armazenados em disco flexível, aumentando o período de registro da história do equipamento.

1.4.4 Nspectr II

- **Nome:** Nspectr II – Automated Diagnostics Program
- **Empresa:** Computational Systems Incorporated
- **Plataforma:** IBM-PC, MS-DOS
- **Descrição:** Sistema especialista para diagnósticos de máquinas, funciona em conjunto com o programa MasterTrend. Utilizando uma extensa base de dados, permite resolver problemas de vibrações em seis diferentes tipos de máquinas: motores elétricos, compressores, bombas, ventiladores, caixas de redução e turbinas. Diagnostica os seguintes problemas: desbalanceamento, desalinhamento, roçamento, *oil whirl*, problemas elétricos, afrouxamentos (*mechanical looseness*), velocidades críticas, antifricção, problemas em acoplamentos, etc.. Gera relatórios com as informações de diagnóstico, descrevendo toda a análise e o procedimento utilizado no diagnóstico. Caso o diagnóstico não seja conclusivo, o programa lista os testes que devem ser executados para um melhor diagnóstico. Na análise do diagnóstico, vários dados são calculados, tais como energia global RMS, pico de aceleração, velocidade e deslocamento, energia subsíncrona, estado dos alarmes, etc.

1.4.5 SUPER

- **Nome:** Stand Alone Supervision System
- **Empresa:** Hydro-Québec/Montreal – Canadá
- **Plataforma:** IBM-PC, OS/2, Presentation Manager, Ethernet
- **Descrição:** Desenvolvimento próprio de um sistema de monitoramento para a utilização em usinas hidroelétricas. Foi criado a partir de um sistema de controle computadorizado, chamado S.S.S.. Utilizando parte do *hardware* do sistema de controle, o sistema é capaz de várias operações de monitoramento “on-line” a partir de um computador central. Um sistema especialista integrado ao programa de monitoramento já está sendo desenvolvido, visando o diagnóstico automático dos problemas com os equipamentos.

1.4.6 Data Manager

- **Nome:** Dynamic Data Manager^R/Transient Data Manager^R.
- **Empresa:** Bently Nevada
- **Plataforma:** IBM-PC, PS/2
- **Descrição:** Integrado com o *hardware* da própria Bently, utiliza os monitores para procedimentos de monitoramento. Instalado no próprio *racks*, coleta os dados e transfere para um computador pessoal, onde podem ser armazenados e analisados por um *software* específico. Com este conjunto pode-se obter vários gráficos e relatórios da condição da máquina.

1.4.7 Trendmaster

- **Nome:** Trendmaster^R2000
- **Empresa:** Bently Nevada
- **Plataforma:** IBM-PC, RS-232/RS-422
- **Descrição:** Utilizando uma placa específica de aquisição de dados e processamento de sinais (SPA), executa procedimentos de análise "on-line". Utilizando a interface serial (padrão RS-232) permite que o acesso dos dados e algumas das análises sejam feitas remotamente, inclusive a longa distâncias via modem. Executa uma variedade de tipos de análise e gráficos, tais como tendência, espectro, órbita e vetor de vibração 1X (*acceptance region plot*). Permite o alarme para cada sensor de cada equipamento monitorado e faz um banco de dados com as ocorrências operativas e de falhas. Pode ser configurado para casos específicos de monitoramento e permite armazenar dados de partidas ou paradas. Gera relatórios do monitoramento e da condição operativa.

1.4.8 Vibro-Analyst

- **Nome:** Vibro-Analyst
- **Empresa:** Vibro-Meter SA
- **Plataforma:** CA-MACS
- **Descrição:** Desenvolvido especialmente para monitoramento e análise de máquinas hidroelétricas. Utilizando sensores desenvolvidos pela própria companhia, permite executar as tarefas de análise, incluindo análise de transiente, vibração absoluta do eixo, *air-gap*, análise síncrona, diagramas de Bode e Nyquist. Com outro módulo, *Vibro-Balancing* é possível, a partir dos dados executar o balanceamento.

1.4.9 MIDAS

- **Nome:** Machinery Interactive Display and Analysis System
- **Empresa:** Radian Corporation & GenRad Incorporated
- **Plataforma:** DEC microVax, VMS, GKS.
- **Descrição:** Conjunto de programas para análise e visualização de dados de monitoramento. É composto pelos módulos de visualização (TDS-Display), aquisição (TDS-Acquire) e gerenciador de dados (MIDAS-Manager). O módulo de TDS-Acquire controla o Sistema de Testes Auxiliado por Computador, GenRad-GR2515, que adquire os dados de vibração e do processo, armazenando estes dados no formato do sistema MIDAS. O módulo TDS-Display permite a visualização e o cruzamento dos dados adquiridos. Na visualização os seguintes gráficos são possíveis: espectro, cascata, Campbell, Bode, Nyquist, posição do eixo, etc., podendo gerar relatórios com os valores obtidos nos gráficos.

1.5 Tabela Comparativa

Na tabela 1.1 é apresentada uma breve descrição, de cada um dos itens analisados na comparação. Estes itens incluem inicialmente as várias técnicas de análise utilizadas atualmente em sistemas de monitoramento. Além das técnicas pode-se encontrar na tabela algumas características operacionais, referindo-se ao tipo de dados armazenados e a sua disponibilidade em uma rede local.

As tabelas 1.2 e 1.3 tentam resumir todas as características dos *softwares* apresentados. Desta forma procura-se evidenciar as potencialidades de cada programa específico.

O *software* da B&K, COMPASS, é um dos mais completos do mercado pois permite tanto o monitoramento *on-line*, com sensores instalados permanentemente, quanto o monitoramento periódico de equipamentos auxiliares, utilizando coletores manuais.

O programa Nspectr II m sistema especialista aplicado ao monitoramento, apesar de executar muitas das análises de um programa de monitoramento não executa a manipulação dos dados, utilizando para tanto um outro pacote (MasterTrend). A função deste *software* é o diagnóstico automático de falhas, utilizando um sistema especialista. Deste modo não foi incluído na tabela, que contém somente programas de monitoramento.

Por estar em desenvolvimento, as características do programa SUPER podem ter sido alteradas. Poucos *softwares* tratam especificamente do problema de monitoramento para máquinas hidroelétricas, nos programas apresentados somente o SUPER e o Vibro-Analyst tratam deste tipo de equipamento.

Dentre os *softwares* que tratam especificamente de máquinas hidroelétricas notamos que nem todas as características estão presentes. Outro ponto importante é o custo destes sistemas, os sistemas integrados apesar de serem os mais completos são extremamente dispendiosos.

Tipos de análises e Características	Descrição
RMS	Valor de vibração global - <i>Root Mean Square</i>
Filtragem	Filtragem do sinal no tempo, passa baixa ou passa banda.
Raio Máximo	Valor máximo da órbita (amplitude) do eixo, considerando uma medida de 2 sensores de deslocamento a 90°
Skewness	Parâmetro estatístico que traduz a forma da distribuição das amplitudes do sinal no tempo
Kurtosis	Parâmetro derivado dos momentos estatísticos da função densidade de probabilidade do sinal de vibração
Espectro	Resultado da transformada rápida de Fourier (FFT)
Cepstrum	Espectro do logaritmo do espectro de potência
Envelope	Análise dos componentes do sinal no tempo pela demodulação, para filtrar as baixas frequências.
Transiente	Análise da fase de transiente do equipamento, principalmente partidas e paradas (<i>start-ups</i> e <i>shutdowns</i>)
Vetor síncrono	Resultado da medida síncrona da vibração, corresponde ao valor de amplitude e fase da vibração na frequência de rotação
Cascata	Gráfico tridimensional do espectro em função do tempo
Tendência	Extrapolação de dados unidimensionais interpolados, até atingir um determinado valores de alarme.
Cruz. de dados	Cruzamento de dados. Verifica graficamente a relação de dois determinados valores, que podem ser de processo ou de vibração.
Alarmes	Fixados certos valores, emite um alarme quando algum nível de vibração ou parâmetro operacional atingir este nível.
Diag. automático	Diagnóstico automático. Determina automaticamente as possíveis causas de um problema da máquina, geralmente apontado por um alarme.
Dados digitais	Tratamento dos dados booleanos do processo, dados de situação, como por exemplo: está/não está funcionando determinado equipamento.
Acesso remoto	Possibilidade de acesso aos dados de monitoramento, adquiridos ou armazenados para alguma análise a partir de um computador remoto.
H+S integrados	<i>Hardware</i> e <i>software</i> integrados. Sistema de aquisição de dados (<i>hardware</i>) é vendido em conjunto com o <i>software</i> de monitoramento.
Aq. direta	Aquisição direta. O sistema adquire os dados diretamente de sensores permanentemente instalados no equipamento.
Aq. manual	Aquisição manual. A aquisição dos dados é feita com coletores manuais de dados.
Mon. "on-line"	Monitoramento "on-line". O sistema trabalha com medição direta e contínua dos dados de operação e vibração.
Mon. "off-line"	Monitoramento "off-line". O sistema trabalha com medição periódicas dos dados de operação e vibração.
Exportar dados	Capacidade de transferir os dados a outros programas, tais como planilhas de cálculo ou processadores de texto.
Plataforma	Tipo de computador em que o sistema está baseado. PC: IBM-PC, Unix: sistema operacional Unix, OS/2: sistema operacional OS/2, Ded.: <i>hardware</i> dedicado, μ Vax: DEC microVax.

Tabela 1.1: Descrição dos itens analisados

Tipos de análises e Características	Programas			
	COMPASS	MasterTrend	MachineView	SUPER
RMS	■	■	■	■
Filtragem	■			
Raio Máximo	■			
Skewness			■	
Kurtosis			■	
Espectro	■	■	■	■
Cepstrum	■			
Envelope	■	■		
Transiente	■			
Vetor síncrono	■		■	
Cascata	■			■
Tendência	■	■	■	■
Cruz. de dados				
Alarmes	■	■	■	■
Diag. automático				
Dados digitais	■		■	■
Acesso remoto	■		■	■
H+S integrados	■		■	■
Aq. direta	■		■	■
Aq. manual	■	■		
Mon. "on-line"	■		■	■
Mon. "off-line"	■	■		
Exportar dados	■			
Plataforma	Unix	PC	PC	OS/2

Tabela 1.2: Comparação dos diversos *softwares* comerciais (I)

Tipos de análises e Características	Programas			
	Data Manager	Trendmaster	Vibro-Analyst	MIDAS
RMS	■	■	■	■
Filtragem				
Raio Máximo	■	■		
Skewness				
Kurtosis				
Espectro	■	■	■	■
Cepstrum				
Envelope				
Transiente			■	■
Vetor síncrono	■	■		
Cascata	■	■	■	■
Tendência	■	■		
Cruz. de dados				■
Alarmes	■	■		
Diag. automático	■			
Dados digitais	■	■		■
Acesso remoto		■		■
H+S integrados	■	■	■	■
Aq. direta	■	■	■	■
Aq. manual				
Mon. "on-line"	■	■	■	■
Mon. "off-line"				
Exportar dados		■		■
Plataforma	PC	PC	Ded.	μVax

Tabela 1.3: Comparação dos diversos *softwares* comerciais (II)

1.6 Objetivos

Pela análise dos *softwares* de monitoramento existentes do mercado pode-se observar que poucos programas tratam especificamente de máquinas hidroelétricas. Além do problema do custo destes sistemas, eles não contemplam todas as características necessárias para o monitoramento de máquinas deste porte.

A eficiência de um sistema de monitoramento não depende somente do *software* utilizado, mas do seu uso em uma metodologia de trabalho. Espera-se do sistema de monitoramento as instruções para a manutenção, com a utilização de ferramentas de análise por um especialista. No funcionamento do equipamento podem ocorrer falhas que não foram detectadas pelo sistema de monitoramento, que serviram de subsídio para a análise, utilizando um modelo matemático. O modelo matemático, que descreve o comportamento dinâmico da máquina, é utilizado para simular situações reais e verificar a sensibilidade das técnicas utilizadas. Novas técnicas podem ser desenvolvidas utilizando o modelo, que posteriormente podem ser incluídas no *software* de monitoramento. Este ciclo está representado na figura 1.5.

Pretende-se neste trabalho estudar uma metodologia para a aplicação das diversas técnicas de monitoramento ao caso específico de máquinas hidroelétricas. Como não existem *softwares* comerciais que atendam a necessidade deste monitoramento, um programa específico para as máquinas hidroelétricas é desenvolvido, tentando-se cobrir todos os aspectos deste tipo de equipamento.

No capítulo 2 são feitas descrições e análises das várias técnicas de monitoramento utilizadas atualmente. Em adição as técnicas convencionais, é proposta uma nova ferramenta de análise, o mapa de espectros, que ajuda a visualização de dados de espectro, tal como o gráfico de cascata.

A metodologia do monitoramento induz a necessidade de existir uma flexibilidade no *software*, para que o ciclo possa ser fechado. Esta razão, mais o fato de não existir um programa específico para máquinas hidroelétricas, que contemple a maioria das técnicas simultaneamente, cria a necessidade de se projetar e codificar um *software* de monitoramento. Este *software* é apresentado no capítulo 3.

Algumas simulações, que mostra a utilização do modelo matemático, são apresentadas no capítulo 4. A intenção destas simulações e do modelo matemático é somente ilustrar o ciclo descrito na figura 1.5.

No capítulo 5 é feita uma descrição do sistema de monitoramento em implantação na Companhia Energética de São Paulo.

Finalmente, as conclusões e perspectivas futuras são apresentadas no capítulo 6.

Em apêndice encontra-se a documentação do *software* desenvolvido, para possibilitar a inclusão de novos procedimentos de análise. A estrutura dos arquivos também é apresentada, para possibilitar a utilização do banco de dados em outros programas, como por exemplo de modelamento ou diagnose.

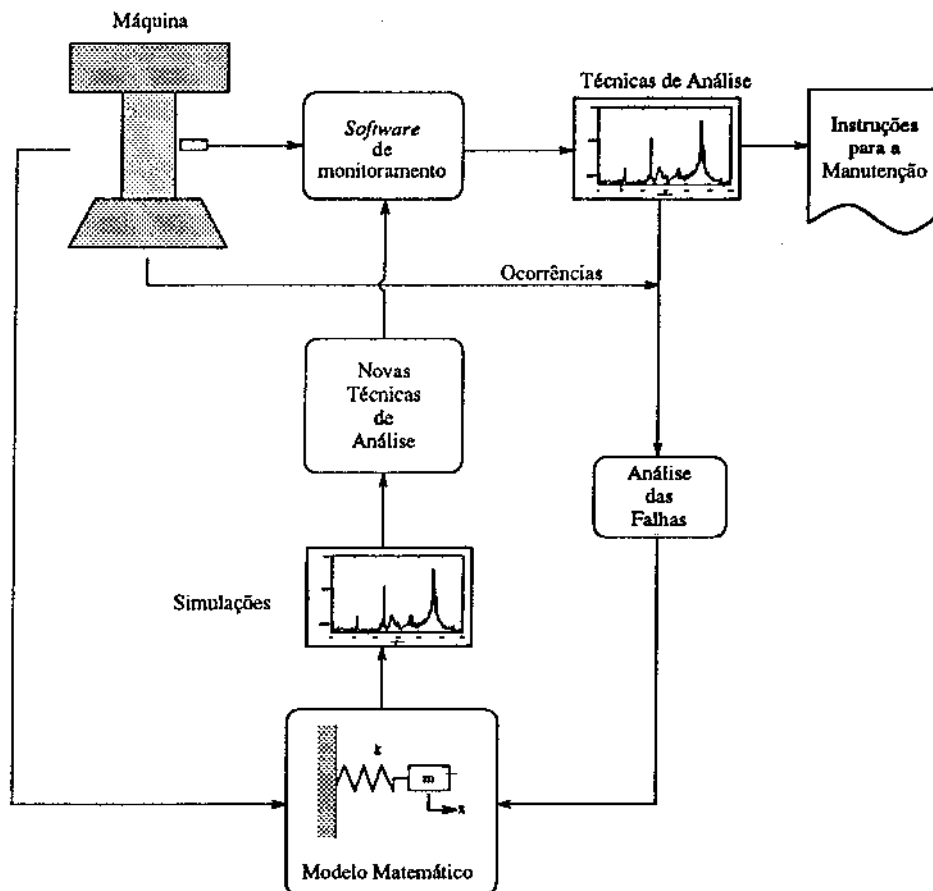


Figura 1.5: Metodologia de Monitoramento

Capítulo 2

Métodos de Análise

Todos os sistemas de monitoramento usam técnicas analógicas e digitais para reduzir a quantidade de dados coletados. Processar os dados, reduzir milhares de amostras para uma pequena quantidade de parâmetros, que descrevem as características operacionais de uma máquina de uma maneira razoável é uma tarefa difícil. Muito esforço é gasto na pesquisa para desenvolver métodos que sejam confiáveis, rápidos e simples. Outro problema relevante é a determinação dos níveis de alarme para os parâmetros monitorados.

Neste capítulo será apresentada uma descrição de alguns destes métodos, os mais comuns e úteis, que estão implementados no *software* de monitoramento.

2.1 RMS

É talvez o mais utilizado critério de severidade de máquinas utilizado no monitoramento. Neste critério, as leituras do valor global (RMS) do sinal de vibração de um equipamento é comparado com valores determinados em tabelas, tais como as das normas [Vdi2056], [Iso2372] e [Iso3945].

O valor global é calculado pela raiz quadrada da média quadrática (*root mean square*) do sinal de vibração conforme a seguinte equação:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} y^2(t) dt}, \quad (2.1)$$

onde t_0 é o tempo total da amostra e $y(t)$ é o sinal de vibração, que pode ser a medida do deslocamento ou da velocidade.

Como usualmente utilizamos este sinal discretizado num processamento digital, em analisadores de fourier ou computadores, a seguinte expressão é mais adequada:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y^2(i)}, \quad (2.2)$$

onde n é o número de pontos amostrados e $y(i)$ é a i -ésima amostra do sinal.

As normas assumem que máquinas de tamanho e potência similares tem níveis de vibração semelhantes como podemos observar na figura 2.1. Nesta norma somente se considera as vibrações de frequência entre 10 e 1000 Hz.

45	Não Permitido	Não Permitido	Não Permitido	Não Permitido
26				
18				
11.2				Tolerável
7.1		Tolerável	Tolerável	
4.5				Acelerável
2.8	Tolerável		Acelerável	
1.8		Acelerável		Bom
1.12	Acelerável		Bom	
0.71		Bom		
0.45	Bom	Máquinas médias 15-75 kW ou até 300 kW com fundações especiais	Grandes máquinas com fundações de frequência natural maior que a rotação	Grandes máquinas com fundações de frequência natural menor que a rotação (ex. Turbinas)
0.28	Pequenas máquinas até 15 kW			
0.18	Grupo K	Grupo M	Grupo G	Grupo T

Figura 2.1: Resumo do critério de severidade de vibração de acordo com a VDI 2056

Apesar de ser uma técnica de simples implementação, os resultados não são sempre positivos. Por utilizar o valor global no domínio do tempo e ser portanto, relativamente insensível para acontecimentos de curta duração, ele não pode ser utilizado sozinho como um parâmetro de alarme. Um valor RMS elevado indica que algo mudou no padrão geral de vibração, porém este aumento não indica quais as faixas de frequência se alteraram e tão pouco a causa desta mudança [Eri84].

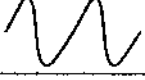
Defeito	Sinal no Tempo	XY	Diagnóstico
Desalinhamento			Típico de desalinhamento severo.
<i>Oil whirl</i>			Aparência similar ao desbalanceamento. Distinção: frequência de precessão é baixa: < 0.5 velocidade do eixo.
Raspamento			O contato produz "impulsos" superpostos a órbita normal.
Desbalanceamento ou flexão			Gráfico XY oval.

Tabela 2.1: Defeitos em eixo determinados por sensores de proximidade

2.2 Órbita

O sinal de um transdutor de proximidade fornece, basicamente, as distâncias da base de fixação do transdutor ao espécime. Em sistemas rotativos dois transdutores de deslocamento, quando montados a 90° em alguma parte do eixo, produzem um diagrama polar (gráfico XY), fornecendo a órbita de vibração do plano de medição. Com a utilização de um terceiro transdutor, o fasímetro, que gera um pulso a cada volta do eixo, as medições de deslocamento podem ser sincronizadas em relação a algum ponto específico do eixo.

2.2.1 Diagnóstico

A partir dos sinais de deslocamento e a órbita de um eixo pode-se observar vários tipos de falhas, tais como desbalanceamento, *oil whirl*, raspamentos e desalinhamentos, mostrados na tabela 2.1[Col77b]. Este tipo de análise é muito subjetiva, e depende em muito da qualidade das medições e da experiência do profissional.

2.2.2 Raio Máximo

Outro dado que pode ser determinado a partir da órbita é o raio máximo, que determina a amplitude máxima de vibração do eixo no plano, possibilitando o diagnóstico de uma condição severa de raspamento ou níveis inaceitáveis de vibração. Assumindo $x(t)$ e $y(t)$ os dois sinais de deslocamento de um rotor, o raio máximo R_{mx} será:

$$R_{mx} = \max \left[\sqrt{x^2(t) + y^2(t)} \right], \quad 0 < t < t_{mx}, \quad (2.3)$$

onde t_{mx} é o tempo total de análise.

Em toda a medição experimental existe algum tipo de ruído. Caso existam defeitos na superfície do eixo, onde o transdutor de deslocamento está montado, o sinal medido pode conter várias componentes de alta frequência, que irão induzir em um erro razoável na medição do raio máximo. Outra perturbação significativa nesta medição é o ruído introduzido devido a vibração do suporte do transdutor, geralmente a caixa do mancal. Uma maneira de minimizar estes efeitos, que aparecem na medição real, é se utilizar algum tipo de filtragem, apresentada logo a seguir.

2.2.3 Filtragem Digital

Nem sempre é possível observar os defeitos a partir da forma da órbita conforme a tabela 2.1. Os sinais de deslocamento podem incluir ruídos e vibrações de frequências elevadas que os distorcem demasiadamente. Para contornar este problema, pode ser efetuada algum tipo de filtragem no sinal do sensor. Quando o sinal é medido, o filtro pode ser utilizado em duas fases, antes do armazenamento ou após o armazenamento. Na primeira fase somente o sinal filtrado é armazenado, perdendo-se a informação retirada pelo filtro. Executando a filtragem na segunda fase as análises são mais flexíveis pois os parâmetros da filtragem podem ser alterados sem perder com isso nenhuma informação da gravação original.

No processamento do sinal pode-se utilizar filtros analógicos ou digitais, dependendo do formato de gravação do sinal, analógico ou digital. O filtro digital apresenta repetibilidade e pode ter seus parâmetros alterados facilmente, porém demanda um tempo adicional para o seu processamento. O filtro analógico não demanda nenhum tempo adicional, os sinais são filtrados em tempo real, mas os seus parâmetros não flexíveis e apresentam baixa repetibilidade.

Dentre os vários tipos de filtros digitais pode-se destacar o filtro recursivo, que utiliza somente as amostragens do sinal original no domínio do tempo, não havendo a necessidade de utilizar a integral de convolução, sendo deste modo, de implementação mais simples e rápida.

A partir da forma da resposta em frequência desejada determina-se os coeficientes e a ordem do filtro. Este procedimento nem sempre é uma tarefa fácil de ser executada. Para se facilitar o projeto, recorre-se a programas computacionais, como por exemplo o pacote de tratamento de sinais do programa MatLab^R. Dentre os vários métodos implementados, o método de *Yule-walk* [FP84] é o que fornece melhores resultados, aproximando-se bastante da forma desejada, como apresentado na figura 2.2.

A partir da forma da função resposta em frequência e da ordem do filtro (número de pólos e zeros) n , determina-se através do método de *Yulewalk* a equação do filtro $H(z)$, ou seja, determina-se os coeficientes a_i e b_i dos polinômios $X(z)$ e $Y(z)$ respectivamente:

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{b_1 + b_2 z^{-1} + b_3 z^{-2} + \dots + b_n z^{-(n-1)}}{1 + a_2 z^{-1} + a_3 z^{-2} + \dots + a_n z^{-(n-1)}}. \quad (2.4)$$

A equação de diferenças relacionando entrada e saída pode ser facilmente determinada, executando a transformada z inversa, diretamente da função do sistema (2.4) conforme [OS75], assumindo y o sinal filtrado e x o sinal original obtém-se:

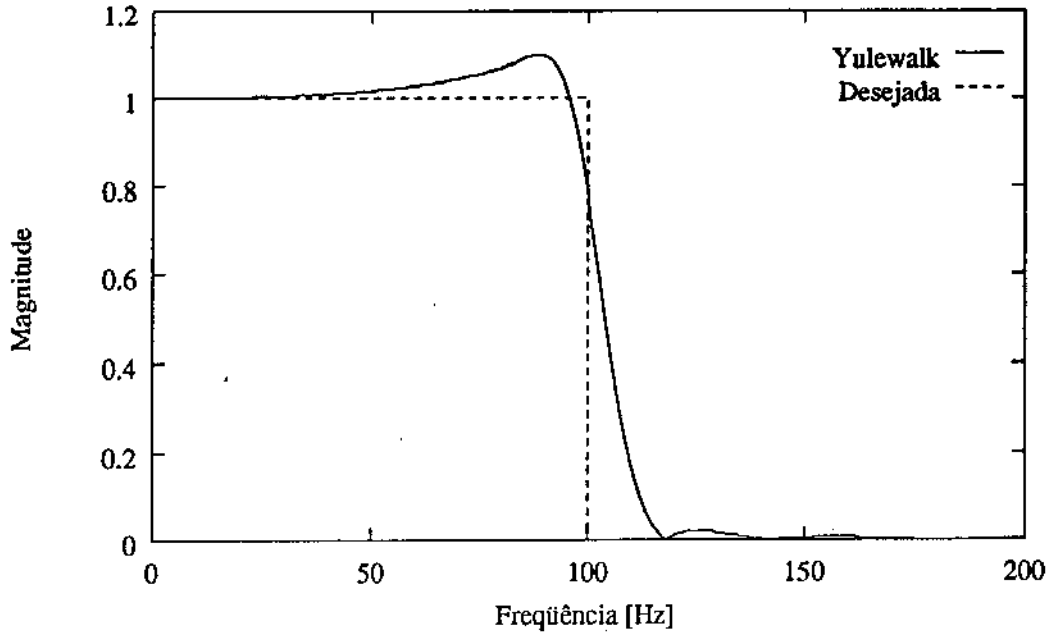


Figura 2.2: Função Resposta em Frequência Desejada e do Filtro Yulewalk

$$y(k) = b_1x(k) + b_2x(k-1) + \dots + b_nx(k-n+1) - a_2y(k-1) - \dots - a_ny(k-n+1), \quad (2.5)$$

onde $y(i)$ é a amostra do sinal no tempo $i \times \Delta t$, sendo i um número natural e Δt o intervalo de discretização.

2.3 Espectro

Todos os sistemas mecânicos tem propriedades de massa e elasticidade, e portanto possuem características dinâmicas próprias. A partir da modelagem de um sistema mecânico, as frequências naturais (próprias), deste sistema podem ser determinadas. Esta modelagem pode ser executada segundo uma grande variedade de técnicas, tais como Newton-Euler, Lagrange, matrizes de transferência, elementos finitos, etc..

A vibração resultante de um sistema não depende somente de suas frequências naturais, mas também das forças externas aplicadas a este sistema. Deste modo, o movimento é uma somatória destes efeitos oscilatórios, dificultando a identificação dos efeitos separadamente. O espectro de frequências é um método que permite transformar a vibração novamente em seus componentes básicos. A transformada rápida de Fourier (FFT) é o método mais utilizado para se executar esta transformação, sendo implementada em todos os sistemas de monitoramento.

Existem vários algoritmos para o cálculo da FFT, o método direto, método de Goertzel, Radix-2, etc. [OS75], que diferem, basicamente, na velocidade de processamento. Uma alternativa para os métodos convencionais, visando a melhor performance possível, é a utilização da transformada rápida de Hartley (FHT) [SJBH85], que gera a FFT após uma operação simples. Apesar do processamento adicional, a FHT é muito rápida, com a vantagem de trabalhar somente com números reais, que facilita em muito a programação. A transformada discreta de Hartley (DHT) para uma sequência real de N valores $x(n)$, $0 \leq n \leq N - 1$, é definida pela seguinte equação[SJBH85]:

$$H(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \text{cas} \left(\frac{2\pi}{N} kn \right) \quad 0 \leq k \leq N - 1 \quad (2.6)$$

e

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} H(k) \text{cas} \left(\frac{2\pi}{N} kn \right) \quad 0 \leq n \leq N - 1, \quad (2.7)$$

onde $\text{cas}(x) = \cos(x) + \sin(x)$.

A transformada discreta de Fourier (DFT) pode ser calculada pela soma das partes simétricas de $H(k)$ por:

$$2\text{Re}\{DFT[x(n)]\} = DHT[x(N - n)] + DHT[x(n)] \quad (2.8)$$

e

$$2\text{Im}\{DFT[x(n)]\} = DHT[x(N - n)] - DHT[x(n)], \quad (2.9)$$

onde $\text{Re}(x)$ é a parte real de x e $\text{Im}(x)$ é a parte imaginária.

Durante a análise do espectro, diversos problemas aparecem, pois diversas frequências não estão diretamente relacionadas com alguma fonte específica de vibração (modo próprio ou excitação). Um espectro de sinais contém um componente em uma frequência equivalente ao período básico de vibração tão bem como vários outros componentes nas harmônicas desta frequência, resultantes de uma combinação não linear dos sinais no sistema[Col77a]. Este processo, modulação, gera frequências nas somas e diferenças das combinações das frequências naturais. Além

do problema da modulação o ruído é outro fator importante, mas este é minimizado quando se utiliza a média de vários espectros.

A figura 2.3, apresenta um espectro de um equipamento real, nele é indicado as frequências naturais e a excitações.

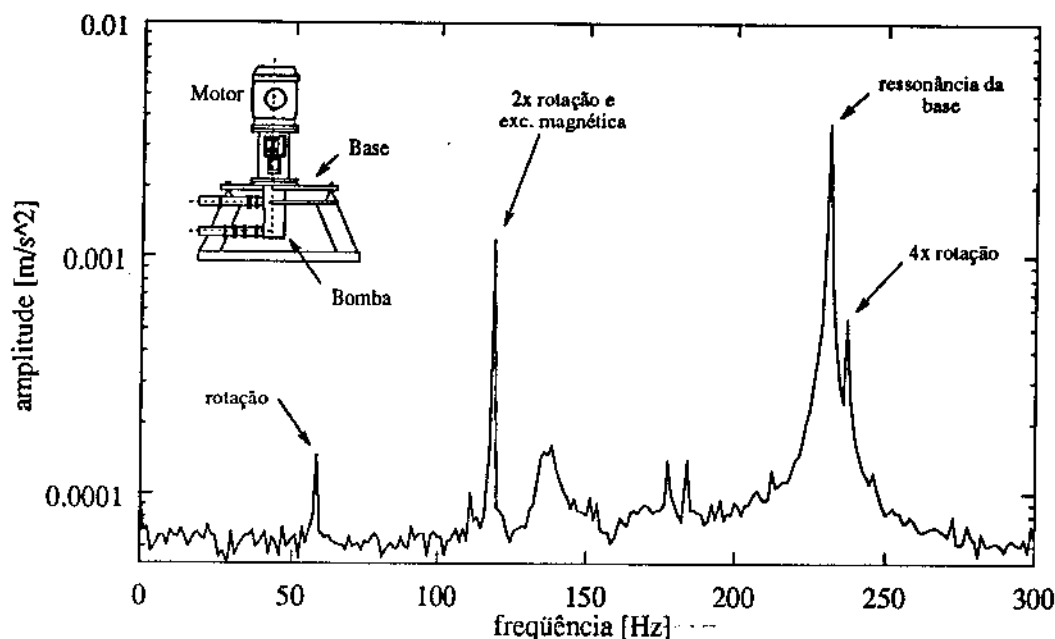


Figura 2.3: Espectro de um equipamento real

O espectro também pode ser utilizado como alarme em um esquema de monitoramento contínuo. A metodologia mais utilizada é executar algumas medições quando a máquina está na sua melhor condição, geralmente após a manutenção. A partir destas medições, que estão sendo assumidas como normais, gera-se uma máscara, adotando-se algum coeficiente de segurança, que determina o limite superior de vibração dos diversos componentes de frequência, como podemos observar na figura 2.4. Os valores que ultrapassam a máscara geram alarmes, que podem trazer informações úteis para um especialista ou para um *software* de inteligência artificial.

Existem tabelados os valores de frequência mais comuns em máquinas, como por exemplo a tabela 2.2[Tra89]. Com estas frequências e com alguma modelagem pode-se obter resultados bem razoáveis no diagnóstico.

Frequência	Causa possível	Comentários
1×RPM	Desbalanceamento	O sensor apresenta uma diferença de fase fixa.
	Desalinhamento ou Empenamento	Níveis axiais elevados, fase de 180° em relação a extremidade do eixo. Usualmente caracterizado por um alto nível em 2×RPM.
	Perda de tensão (<i>Strain Looseness</i>)	Causada por distorções na estrutura ou fundação. Ou de estruturas acopladas (p.e. encanamentos). Muda a direção com a localização do sensor. Usualmente apresenta uma alta harmônica com fase randômica.
	Ressonância Elétrica	Diminui sensivelmente com a alguma variação de velocidade. Originado pelos componentes acoplados. Barra do rotor quebrada em motores de indução. Apresenta geralmente bandas em 2× a frequência.
2×RPM	Desalinhamento ou Empenamento	Altos níveis de vibração axial
Harmônicas	Afrouxamentos	Sinal no tempo impulsivo ou truncado.
	Rochamentos	Eixo em contato com a caixa.
Sub-RPM	<i>Oil whirl</i>	Tipicamente 0.43-0.48 da rotação; fase instável.
	Porta-esferas de rolamento	Grupo de fundamentais: $\frac{1}{2} \frac{RPM}{60} \left[1 - \frac{\phi E}{\phi P} \times \cos(\alpha) \right]$
N × RPM	Mancais com rolamentos	Pista interna: $\frac{nb}{2} \frac{RPM}{60} \left[1 + \frac{\phi E}{\phi P} \cos(\alpha) \right]$ Pista externa: $\frac{nb}{2} \frac{RPM}{60} \left[1 - \frac{\phi E}{\phi P} \cos(\alpha) \right]$ Defeito na esfera: $\frac{\phi P}{2\phi E} \frac{RPM}{60} \left[1 + \frac{\phi E}{\phi P} \cos^2(\alpha) \right]$ Geralmente modulado pela velocidade de rotação
	Engrenagens	Engrenamento (n^2 dentes × RPM); geralmente modulada pela velocidade de rotação.
	Correias	Correia × velocidade de rotação e 2 × velocidade de rotação.
	Aletas/Pás	n^2 aletas/pás × RPM; geralmente presente na máquina normal. As harmônicas geralmente indicam algum problema.
N × Alimentação	Elétrica	Estator em curto; rotor excêntrico ou quebrado; efeito de magneto-estricção; vibração do estator.
Ressonância	Várias	Muitas fontes, incluindo eixo, carcaça, fundação ou estruturas acopladas. Testes de partida e análise modal são úteis nesta área.

nb =número de esferas do rolamento

ϕE =Diâmetro da esfera

ϕP =Diâmetro primitivo

α =Ângulo de contato

Tabela 2.2: Frequências usais de falhas

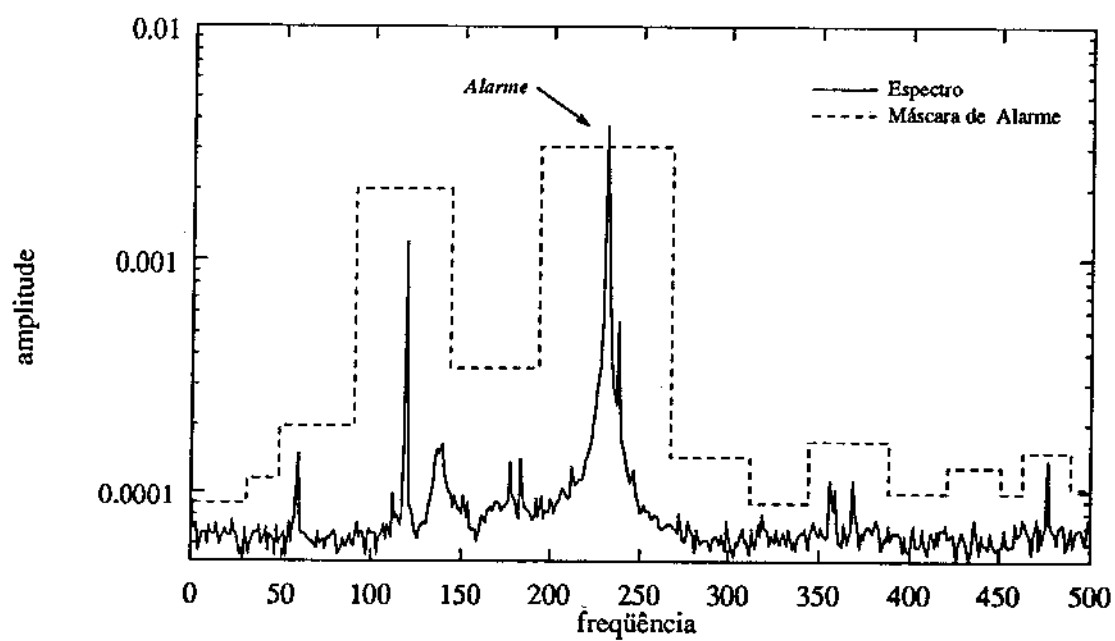


Figura 2.4: Máscara de alarme no espectro

2.4 Cascata

Agrupando-se vários gráficos de espectro em função do tempo ou de uma mudança na velocidade de rotação cria-se um gráfico tridimensional, conforme podemos observar na figura 2.5. Este gráfico é conhecido como *cascata* ou *waterfall*. Nesta figura, obtida no analisador espectral SD380 (Scientific Atlanta), o eixo X corresponde a frequência, Y a amplitude e Z a variação do tempo, conforme a indicação na extremidade inferior esquerda.

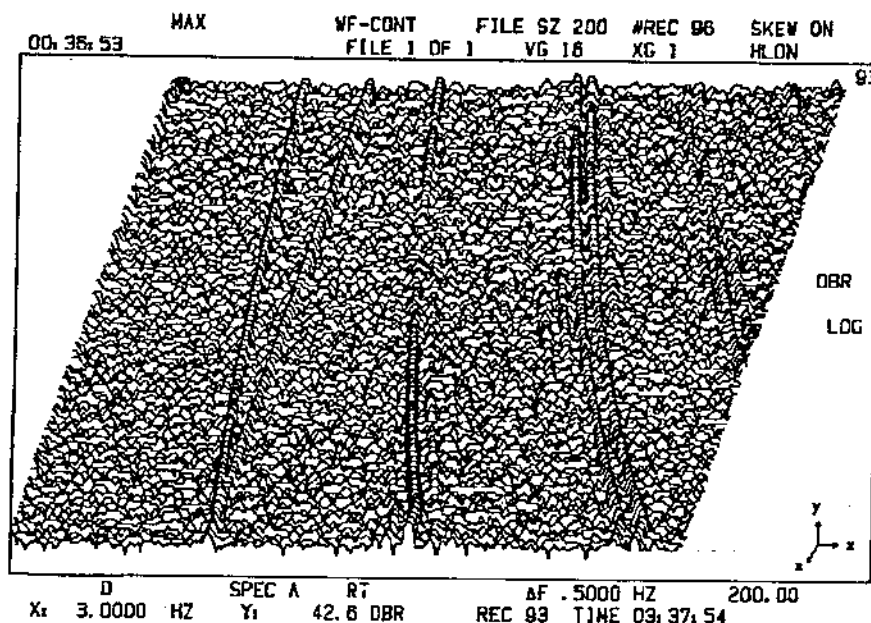


Figura 2.5: Cascata de uma desaceleração

O gráfico de cascata permite as seguintes visualizações:

- um aumento em um componente específico de frequência;
- o aparecimento de um novo componente de frequência, por exemplo, uma nova força de excitação;
- a variação de um componente de frequência, indicando mudanças das propriedades da máquina, como a variação de uma frequência natural ou das características de excitação;
- determinação das frequências naturais;
- determinação do diagrama de Campbell;
- etc.

Com os dados da cascata, pode-se obter outro gráfico, onde uma determinada frequência é acompanhada em função do tempo. Este gráfico tem o nome de *corte em frequência* pois

corresponde a um corte da cascata no plano amplitude/tempo em uma determinada frequência. A cascata por ser um gráfico tridimensional apresenta alguns problemas para a perfeita visualização dos valores apresentados. Qualquer determinação quantitativa deve ser auxiliada por alguma outra ferramenta, como o corte em frequência ou o espectro.

2.5 Mapa

Outra forma de se visualizar vários espectros é utilizar o mapa de espectros, que apresenta os valores em um gráfico bidimensional. Neste tipo de gráfico, as amplitudes do espectro são mapeadas por cores ou pelo diâmetro de círculos. Este mapa permite as mesmas visualizações da cascata, reforçando algumas, principalmente o aparecimento de um novo componente de frequência e determinação de frequências naturais. Como é um gráfico bidimensional permite uma determinação quantitativa, determinando-se com relativa precisão os valores apresentados, com algumas vantagens em relação ao gráfico da cascata.

Na figura 2.6 é mostrado um destes gráficos, para o caso de mapeamento por cores. Note que além das cores, a espessura da linha também é função da amplitude, para facilitar ainda mais a visualização. O mapeamento com círculo é apresentado na figura 2.7. Os dados utilizados para a confecção dos gráficos são apenas ilustrativos.

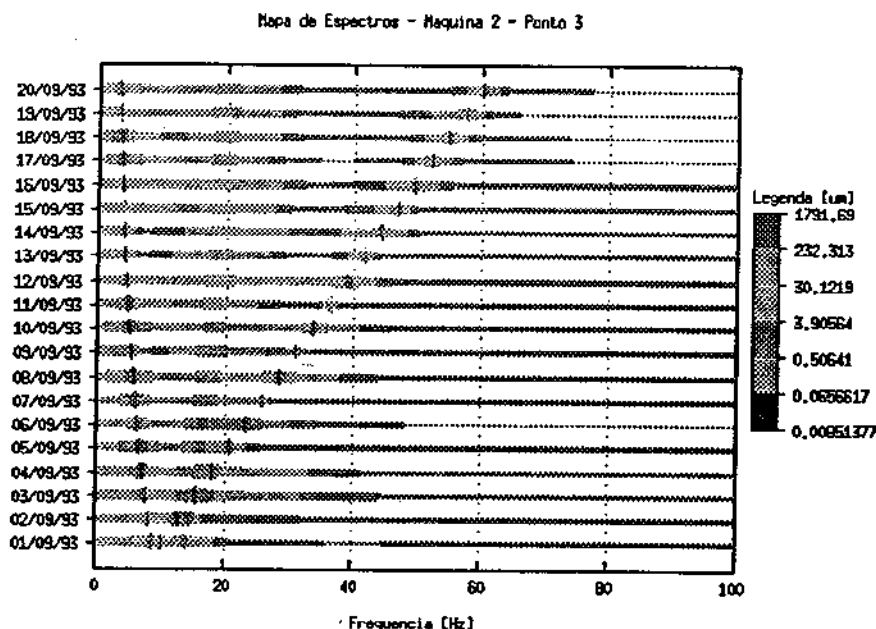


Figura 2.6: Mapa de Espectros

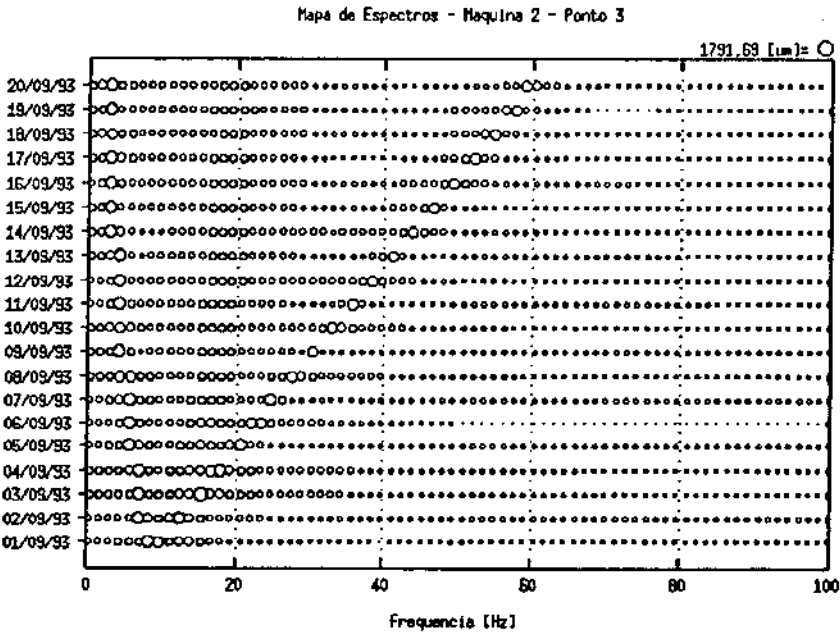


Figura 2.7: Mapa de Espectros

2.6 Veq

O estabelecimento de limites de severidade de vibrações a partir de critérios objetivos, geralmente envolve o uso de modelos matemáticos e medidas e/ou estimação das forças de excitação. Os modelos matemáticos podem ser obtidos a partir de técnicas bem conhecidas, tais como a modelagem por Elementos Finitos (M.E.F.) e por Matrizes de Transferência ou a partir de técnicas experimentais, como a Análise Modal. Com um modelo matemático representativo do comportamento vibratório da estrutura da máquina, os níveis de vibração máximos permissíveis podem ser estabelecidos a partir de critérios de resistência dos materiais, limites de fadiga, etc..

Em [W⁺86] foi proposto um critério objetivo para avaliação dos níveis de vibração em máquinas rotativas que utiliza um parâmetro denominado Velocidade Equivalente (V_{eq}). Este critério tenta representar a energia cinética da vibração de uma máquina rotativa através de um parâmetro, a velocidade equivalente, que é obtida através da decomposição modal do movimento vibratório do sistema.

Os fundamentos teóricos do critério foram apresentados em [AW⁺84]. A velocidade equivalente pode ser definida a partir da energia cinética total E_c da massa rotativa total m_{rot} :

$$V_{eq} = \sqrt{2 E_c / m_{rot}}. \quad (2.10)$$

Estudos a respeito desse critério vem sendo realizados buscando comprovar com objetividade sua validade, e a experiência em modelos de laboratório tem mostrado que ele leva a resultados satisfatórios [AIP86] e [Nas87].

2.6.1 Formulação

A energia cinética pode ser calculada a partir das vibrações medidas e de um modelo matemático validado para o sistema rotativo.

Pode-se utilizar algum dos métodos conhecidos de modelagem matemática de estruturas mecânicas, como por exemplo o método de Elementos Finitos, em conjunto com a técnica de decomposição modal, para a obtenção da função de distribuição de massa e dos modos próprios de vibrar do sistema.

Sendo $v(x, y, z)$ a velocidade de um ponto (x, y, z) do sistema vibratório, ela pode ser expandida em termos dos modos próprios de velocidade $v_i(x, y, z)$ calculados do modelo de Elementos Finitos da estrutura e ajustados para o comportamento real da estrutura. Em uma condição em estado permanente, pode-se escrever que:

$$v(x, y, z) = \sum_i^{\text{modos}} \sum_j^{\text{freq}} \alpha_{ij}(w_j) v_i(x, y, z), \quad (2.11)$$

onde $\alpha_{ij}(w_j)$ é a contribuição do modo i devido a uma excitação harmônica na frequência w_j . A equação anterior geralmente não é exata pois não foram considerados os efeitos dos diferentes ângulos de fase, da contribuição de cada modo, introduzidos pelo amortecimento.

Analogamente, em termos de deslocamento, tem-se:

$$u(x, y, z) = \sum_i^{modos} \sum_j^{freq} \alpha_{ij}(\omega_j) u_i(x, y, z). \quad (2.12)$$

Se a distribuição de massa da estrutura é conhecida, então a energia cinética pode ser calculada a partir da seguinte equação:

$$E_c = \frac{1}{2} \iiint_{vol} \rho v^2(x, y, z) dx dy dz, \quad (2.13)$$

onde ρ é a massa por unidade de volume e $v(x, y, z)$ a velocidade em um ponto (x, y, z) do sistema vibratório.

Da função polinomial de interpolação de um elemento do sistema discretizado por elementos finitos, obtêm-se a matriz $[N(x, y, z)]$, que representa a distribuição do deslocamento modal $u_i(x, y, z)$ por unidade dos valores dos deslocamentos $\{U_i\}$ dos nós [Nel79]. A matriz $[N]$ é composta pelos polinômios de interpolação definidos no programa de elementos finitos utilizado. Assim, para um elemento e , pode-se escrever:

$$u_i(x, y, z) = [N(x, y, z)]_e \{U_i\}_e. \quad (2.14)$$

Por outro lado, a velocidade $v_i(x, y, z)$ pode ser escrita em função do deslocamento através da expressão:

$$v_i(x, y, z) = \omega_j u_i(x, y, z). \quad (2.15)$$

Substituindo as equações (2.11), (2.14) e (2.15) na equação (2.13), obtêm-se a energia cinética calculada da contribuição de um elemento finito da discretização estrutural, ou seja:

$$E_c^e = \frac{1}{2} \sum_i^{modos} \sum_j^{freq} \alpha_{ij}^2(\omega_j) \omega_j^2 \{U_i\}_e^T \iiint_{vol} \rho [N]_e^T [N]_e dx dy dz \{U_i\}_e$$

ou

$$E_c^e = \frac{1}{2} \sum_i^{modos} \sum_j^{freq} \alpha_{ij}^2(\omega_j) \omega_j^2 \{U_i\}_e^T [M]_e \{U_i\}_e, \quad (2.16)$$

sendo $[M]_e$ a matriz de massa do elemento e .

A expressão da energia cinética dada pela contribuição de todos os elementos finitos utilizados no modelo é dada por:

$$E_c = \frac{1}{2} \sum_i^{modos} \sum_j^{freq} \alpha_{ij}^2(\omega_j) \omega_j^2 \{U_i\}^T [M] \{U_i\}. \quad (2.17)$$

onde $[M]$ é a matriz de massa total, construída pelo M.E.F. utilizado.

Algumas simplificações importantes podem ser feitas na equação anterior, facilitando o cálculo da energia cinética [Nas87]. Os autovetores $\{U_i\}$ obtidos na discretização, podem ser

normalizados pela massa, de tal forma que $\{U_i\}^T[M]\{U_i\}$ se reduz a identidade. Se a excitação é do tipo banda larga e se o sistema possui baixa densidade modal, isto é, os modos são desacoplados, é razoável assumir que o modo de vibração $\{U_i\}$ é dominante em relação aos outros quando se estiver próximo da frequência natural ω_{ni} correspondente, ou seja, ele praticamente não sofre influência dos modos adjacentes no seu perfil vibratório, como é ilustrado na figura 2.8.

Aplicando estas considerações a equação (2.17) chega-se a:

$$E_c = \frac{1}{2} \sum_i^{\text{modos}} \alpha_i^2 \omega_i^2. \quad (2.18)$$

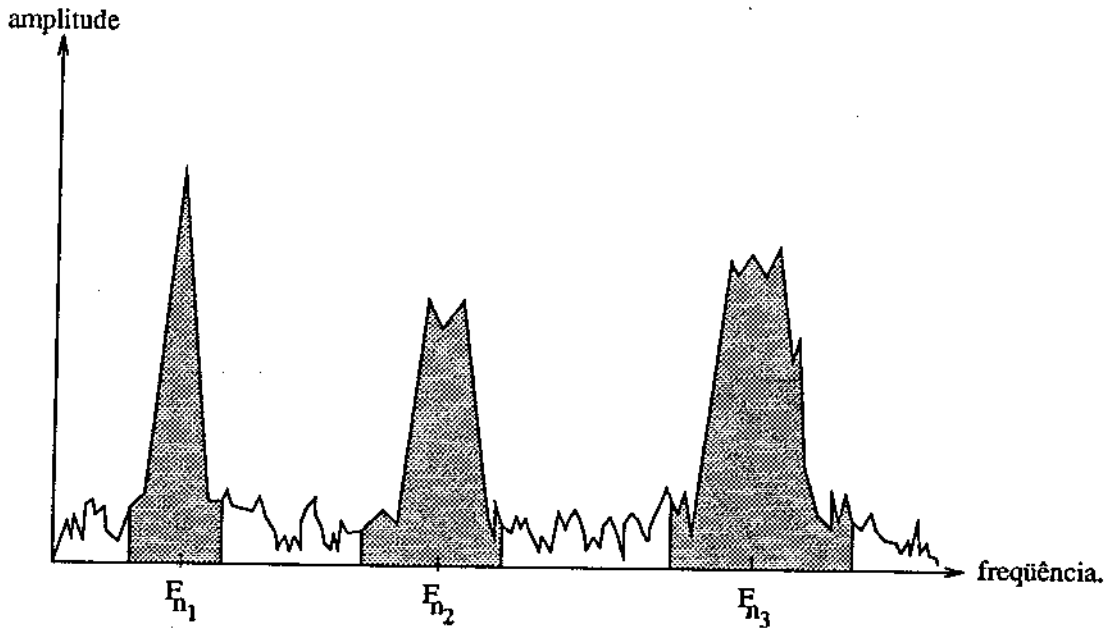


Figura 2.8: Exemplo de faixas de frequência com maior influência dos modos

O coeficiente α_i pode ser facilmente obtido utilizando a equação (2.12). Nesta equação, $u(x, y, z)$ pode representar o deslocamento global RMS de um ponto qualquer da máquina real, obtido pela integração da densidade espectral de potência do sinal em faixas de frequência próximas às frequências naturais, onde os respectivos modos são dominantes (figura 2.8).

Se um ponto de medição p da máquina real corresponder a um ponto da discretização do modelo matemático, então, para um modo de vibração i pode se escrever:

$$(RMS)_i^p = \alpha_i U_i^p \quad (2.19)$$

e

$$(RMS)_i^p = \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} G_p(f) df}; \quad f_1 < \omega_{ni} < f_2 \quad (2.20)$$

onde $G_p(f)$ corresponde à densidade espectral de potência e f_1 e f_2 são as frequências limites entre as quais o modo é dominante.

Observa-se na equação (2.19) que o coeficiente α_i não depende do ponto de medição p , e, desta forma, também a energia cinética de vibração e a velocidade equivalente não dependerão, como mostram as equações (2.10) e (2.18).

Na figura 2.9 encontra-se um diagrama simplificado de cálculo do V_{eq} , percorrendo todo o ciclo apresentado anteriormente, do espectro até a determinação do valor do V_{eq} total.

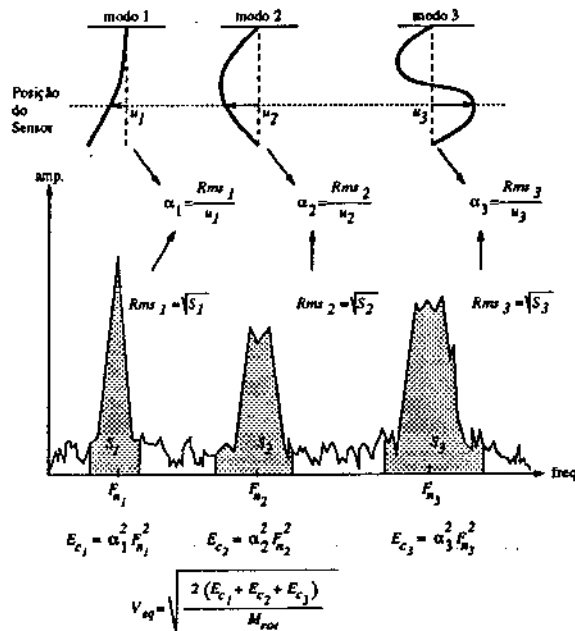


Figura 2.9: Diagrama de Cálculo do V_{eq}

Apesar do critério não depender do ponto de medição, deve-se garantir que os pontos de medição não correspondam a um nó de algum modo de vibração, pois como Nascimento [Nas87] observou, o valor calculado de α_i (eq.2.19) tem uma grande margem de erro, fazendo que a V_{eq} total não seja representativa.

Uma extensão a este método, seria considerar além dos modos próprios, as excitações da máquina, incluindo desta forma a energia introduzida no sistema. Como está implementado, o programa de monitoramento proposto permite a inclusão da excitação, adicionando-se bandas, correspondentes às excitações, ao cálculo do V_{eq} . Apesar disso, a determinação dos valores para a configuração destas novas bandas, necessitaria de um novo estudo ou alguma forma de determinação prática.

2.7 Banda

Muitas vezes é conveniente condensar as frequências do espectro em um conjunto de bandas. Vários tipos de bandas são utilizadas pelos *softwares* e analisadores de sinais existentes no mercado, as mais comuns são as seguintes [Noi90], assumindo f_1 a frequência inicial da banda, f_2 a frequência final e f_a a frequência central:

- **Oitava:** é definida como o intervalo entre duas frequências onde a razão entre elas é de 2 para 1:

$$f_2 = 2f_1, \quad f_a = \sqrt{f_1 f_2};$$

- **Terço de oitava:** é a divisão geométrica da oitava em três partes, sendo f_x e f_y os terços de oitava:

$$\frac{f_x}{f_1} = \frac{f_y}{f_x} = \frac{f_2}{f_y}, \quad f_x = \sqrt[3]{2} f_1, \quad f_y = \sqrt[3]{4} f_1;$$

- **Porcentagem Constante:** o tamanho da banda é uma porcentagem constante do valor da frequência central, sendo p a porcentagem:

$$f_1 = \left(1 - \frac{p}{2}\right) f_a, \quad f_2 = \left(1 + \frac{p}{2}\right) f_a;$$

- **Constante:** o tamanho da banda é um valor constante em frequência, sendo k uma constante:

$$f_1 = f_a - \frac{k}{2}, \quad f_2 = f_a + \frac{k}{2}.$$

Uma das mais utilizadas é a análise em terço de oitava, na figura 2.10 podemos observar um espectro real de um conjunto moto-bomba.

Como as informações estão condensadas, o número de dados utilizados para uma comparação, por exemplo, são bem menores, facilitando sensivelmente esta operação. A colocação de alarmes também fica facilitada pois caso ocorram pequenas variações de rotação ou das excitações o valor da banda permanece constante.

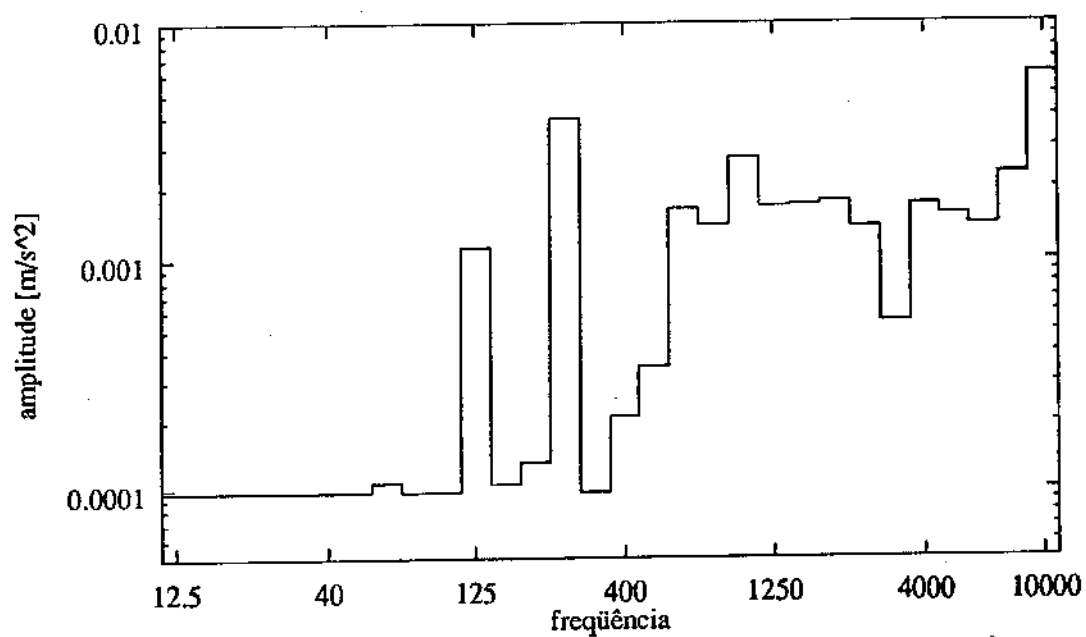


Figura 2.10: Espectro real em 1/3 de oitava

2.8 Tendência

Depois do valor RMS é um das ferramentas mais implementados em *softwares* de monitoramento contínuo de máquinas. Consiste basicamente do acompanhamento de um parâmetro que traduza o comportamento do equipamento analisado. Conforme a tendência de crescimento deste parâmetro algum tipo de alarme pode ser acionado, tentando-se prever quando a máquina estará sob uma condição de severidade muito elevada, levando ao colapso. Os parâmetro utilizados são, por exemplo, o valor RMS (o mais utilizado), folgas em mancais, performance [Col77a], valor de banda em espectro, *Veq*, etc..

Após um certo tempo de monitoramento, que pode variar de dias até anos, executa-se uma interpolação dos valores e determina-se a intersecção da curva interpolada com um certo valor máximo, determinado por modelos ou experimentalmente. A ordenada deste ponto de intersecção determina quando a máquina atingirá o limite, permitindo-se planejar a manutenção.

Este procedimento pode ser melhor visualizado na figura 2.11, neste caso uma interpolação linear foi executada, uma vez determinada a equação da reta o ponto de intersecção pode ser determinado, sabendo-se quando o parâmetro atinge o valor limite.

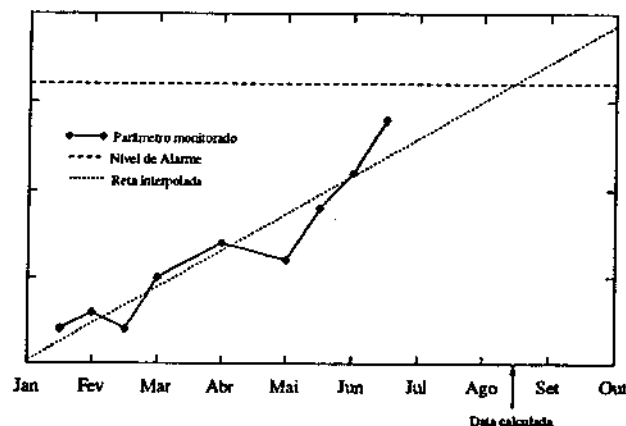


Figura 2.11: Exemplo de cálculo de tendência

Como depende de um valor escalar, este método é pouco sensível a mudanças sutis no comportamento da máquina, tendo as mesmas restrições do valor RMS. A utilidade deste método depende da progressão do fenômeno de falha e da capacidade do parâmetro utilizado traduzir o comportamento geral da máquina.

A interpolação deve ser utilizada com cautela, para posteriormente se poder confiar na extrapolação. Muitas vezes é necessária a censura de diversos pontos, visando retirar valores anormais da interpolação, que causariam um cálculo artificial da intersecção. Neste momento a presença do especialista é muito importante, para a censura e escolha do tipo de interpolação. E também para verificar se os resultados tem um valor razoável, para tanto o gráfico é uma ferramenta indispensável.

Com cautela na aquisição e na interpretação dos dados, em vários casos práticos o método

de tendências se mostrou eficaz. Utilizando sensores de ultra-som para monitorar a folga média de um mancal do gerador, Haramis [JKB89] conseguiu determinar com precisão o período limite de operação de uma turbinas a gás (Eastlake unit, 250 MW).

Atualmente a tendência é calculada com vários parâmetros de análise diferentes, e ainda com as combinações destes parâmetros com os parâmetros de operação da máquina (temperatura, vibração, etc.) [BG89]. Assim, a tendência torna-se mais uma ferramenta para o engenheiro de manutenção na determinação do tempo exato em se executar uma intervenção no equipamento.

Capítulo 3

Sistema de Monitoramento Permanente

Da análise dos *softwares* existentes no mercado constata-se existem poucos programas para o monitoramento de máquinas hidroelétricas. Dentre os *softwares* analisados, somente dois são específicos a máquinas hidroelétricas, o *Super* da Hydro-Québec e o *Vibro-Analyst* da Vibro-Meter.

Novas técnicas de monitoramento e diagnose estão aparecendo com o advento de melhores modelos matemáticos e com a viabilidade econômica da colocação de transdutores permanentes, gerando a necessidade de se dominar todas as etapas da automação do monitoramento. Nota-se esta tendência com o *software Super*, que está sendo desenvolvido pelo usuário final, a Hydro-Québec.

Neste capítulo será apresentado o *software* de monitoramento desenvolvido, todas as suas características e funcionamento para o sistema Unix, que apresenta uma maior facilidade de uso.

No capítulo 5 é apresentada a montagem do sistema de monitoramento da Cesp (Companhia Energética de São Paulo), onde este *software* está sendo implantado.

A estrutura dos arquivos de dados, o formato dos arquivos de configuração, tabelas de referência cruzada e a descrição das rotinas são apresentada no apêndice A. Esta documentação permite a implementação de outros métodos ou utilização dos dados armazenados em outros módulos ou *softwares*.

3.1 Descrição

O programa está todo escrito na linguagem C, contando atualmente com mais de 16 mil linhas. A linguagem C foi escolhida pois permite uma grande versatilidade no tratamento dos dados. Deste modo é possível implementar os métodos de análise, interação com o usuário e a parte gráfica em um só padrão.

Como está projetado, o programa roda em computadores pessoais (PC) e em estações de trabalho que utilizem o sistema Unix. A principal diferença destas versões está na interação com

o usuário, no PC foi utilizada uma interface no modo de texto e na versão Unix foi utilizada uma interface gráfica, padrão OpenLook (Openwindows).

No projeto da interface com o usuário utilizando-se o *software Guide* (*OpenWindows Developer's Guide*) e a biblioteca Xview ambos da Sun Microsystems. Este programa gera um código fonte em linguagem C, contendo as chamadas para a biblioteca Xview, que irão construir a interface gráfica. Para este projeto o *software Guide* utiliza conceitos de CAD.

A partir dos dados coletados em campo, o *software* armazena os valores em um arquivo, que além dos sinais de vibração contém as informações adicionais sobre as condições de operação e observações dos operadores. Este arquivo tem no nome a data da medição e na extensão o número da máquina, conforme o seguinte formato: DBaammdd.mq, onde aa é o ano, mm o mês, dd o dia e mq a máquina.

Para contornar a limitação do espaço disponível em disco rígido, estes arquivos são armazenados em disquetes. Cada disquete pode armazenar aproximadamente 50 dias de medições. Com a utilização de vários disquetes pode-se formar um banco de dados de um período longo a um custo baixo.

A análise direta com os disquetes é inviável, pois estes apresentam uma dificuldade no manuseio e baixa performance, todavia, pode-se contornar este problema transferindo para o disco rígido somente as medições desejadas, permitindo um acesso rápido e limitando o manuseio dos disquetes a uma só vez, quando da cópia dos dados.

O banco de dados armazena somente as informações medidas, sem nenhum tipo de pré-processamento, que poderia retirar dos dados alguma informação útil. Todo o processamento do sinal, com exceção da FFT, é executada no momento da análise. Isto permite a alteração da configuração ou até mesmo dos métodos, sem inutilizar os dados já armazenados.

O *software* permite as seguintes análises:

1. Espectro;
2. Sinal no tempo;
3. Órbita;
4. Cascata;
5. Mapa de espectros;
6. Corte em frequência;
7. Veq;
8. Raio máximo;
9. Valor RMS;
10. Amplitude máxima;
11. Visualização das características de operação;

12. Cruzamento de dados (12 tipos diferentes);
13. Tendência simples por interpolação.

O programa permite também:

- Filtragem digital (em sinais no tempo e órbita);
- Emissão de relatórios;
- Exportar os sinais (em frequência e no tempo) para outros programas;
- Comparação de espectros com uma máscara;
- Verificação de níveis de alarme;
- Verificação de níveis de alerta.

3.2 Fluxo da Informação

O ciclo da informação inicia com o dado adquirido pelo coletor de dados, convertido para o formato do banco de dados e gravados em disquete. Dos disquetes a informação passa para o disco rígido, conforme as necessidades da análise. Executados os procedimentos de análise, a informação é condensada e os resultados apresentados de uma forma gráfica ou em relatórios. Este ciclo pode ser visualizado na figura 3.1

3.3 Diagrama Funcional

As várias funções do programa são agrupadas em módulos, que compõem o sistema. A partir do módulo principal os módulos de banco de dados, informações, gráficos, relatórios e alarmes ficam acessíveis, conforme ilustra a figura 3.2.

3.4 Funcionamento

Toda a interação com o usuário é executada através de um sistema de janelas, utilizando o conceito *look and feel*. O uso da interface é bastante simples, todas as funções são apresentadas em ícones, botões e menus. As informações são facilmente alteradas utilizando somente o mouse. O teclado é utilizado o mínimo possível.

O programa consiste de 6 janelas, cada uma com uma função específica, sendo elas:

- **Controle:** contém todos os dados para as análises e permite o acesso as demais funções do programa através dos botões e dos menus.

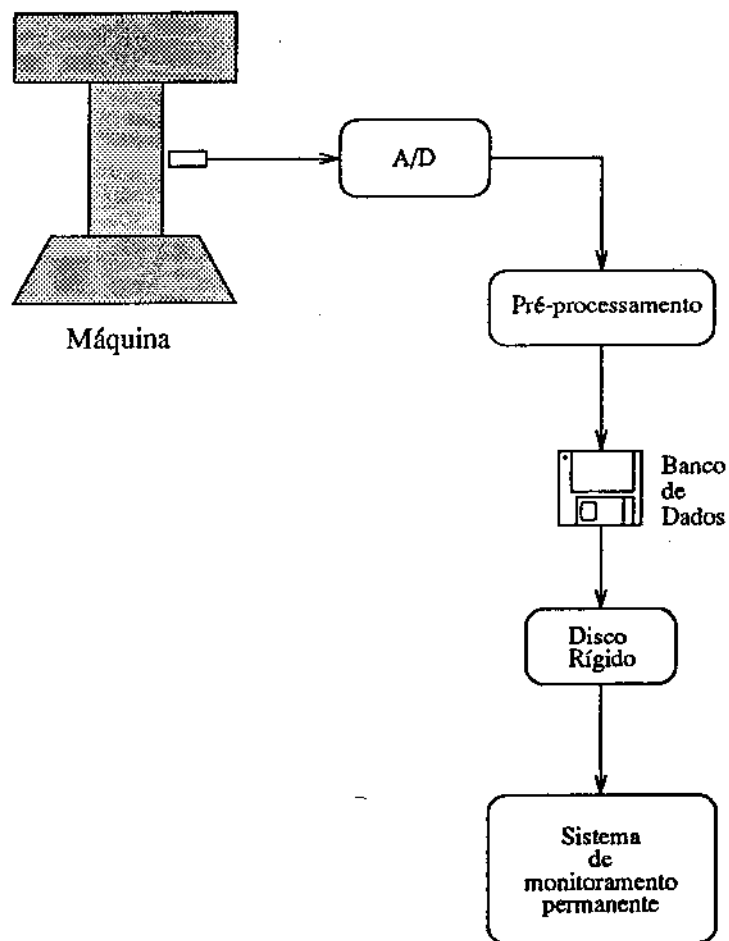


Figura 3.1: Fluxo da Informação

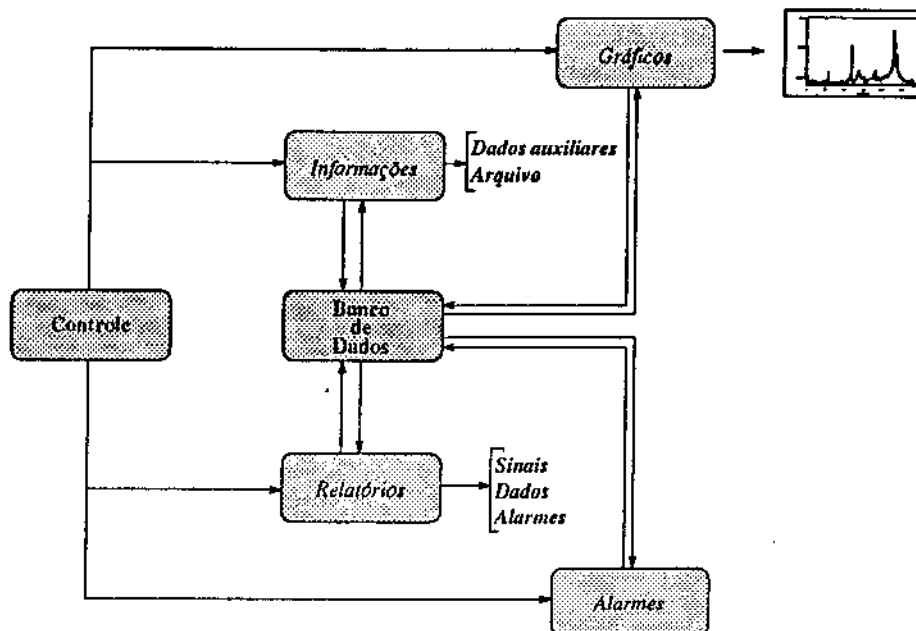


Figura 3.2: Diagrama Funcional

- **Dados auxiliares:** contém os valores de operação da máquina, potência, vazão, etc. e as informações do operador.
- **Informações:** contém os dados das informações que estão armazenadas no disco rígido, data inicial, data final, incremento e número de amostras.
- **Relatórios:** contém os tipo e nome de arquivo do relatório; permite a criação do relatório.
- **Alarmes:** contém os valores de alarme e alertas para os valores RMS, Veq, Máxima amplitude e Raio máximo; permite a visualização dos valores e da curva da máscara de espectros.
- **Gráfico:** contém os gráficos, desenhados a partir de funções da janela de controle ou de alarmes.

3.4.1 Janela de Controle

É a janela principal do programa, sendo a primeira a aparecer ao usuário. As demais janelas são abertas a partir da utilização dos menus ou dos botões desta janela. Toda a configuração das análises são executadas pelo seu painel de controle. Esta janela é apresentada na figura 3.3.

As funções que podem ser executadas estão representadas pelos ícones da parte superior da tela. Estas funções são:

SMP

BD Graf Info Quit

Relat Alarm

Controle

Máquina: 3 / 5

Data Inicial: 01/08/99

Data Final: 30/08/99 Inc: 1 / 5

Freq. (Hz): 0.0

Nº Canal: 1 2 3 4

Escala Y: Grid: Máscara:

linear log Sim Não Sim Não

Interação:

Sim Não Filtro: x Nenhum

Cruzamento: A vs B A / B XA e XB

A: ☐ Montante

B: ☐ Montante

Dado:	Montante	Jusante
Nível (mm)	Va-Lo	
P. Ativa	P. Reativa	
	Ven	
RMS	Ráio Máximo	
Máx. Amplitude	Amp. Frequência	

Vnq: Total

Banda nº

ready (w) WS

Figura 3.3: Janela de Controle

- : menu de banco de dados, com as seguintes opções:
BD
 - **Dados Arquivo:** abre a janela de informações;
 - **Copia Dados:** copia os dados dos arquivos para o disco rígido conforme configuração da máquina, data inicial, data final e incremento no painel de controle.
- : menu de gráficos, a partir dos dados do painel de controle executa os seguintes
Graf
gráficos,
 - **Espectro;**
 - **Sinal no Tempo;**
 - **Órbita;**
 - **Cascata;**
 - **Mapa de Espectros;**
 - **Dados:** executa um gráfico referente ao dado escalar especificado no campo de dados do painel de controle;
 - **Cruzamento:** executa um gráfico de cruzamento das informações, conforme o tipo e dados especificados no painel de controle;
 - **Tendência:** executa um gráfico similar ao da opção **Dados**, mas mostra o nível de alarme, interpola linearmente e calcula a interseção desta reta com o alarme;
- : menu de informações, com as seguintes opções:
Info
 - **Dados Auxiliares:** abre a janela de dados auxiliares;
 - **Dados Arquivo:** abre a janela de informações;
- : abre a janela de relatórios;
Relat
- : abre a janela de alarmes;
Alarm
- : termina a execução do programa.

No restante da janela encontramos o painel de controle, a partir do qual o usuário configura as datas, os dados e os tipos da análise. Os componentes do painel são:

- **Máquina:** número da máquina em análise;

- **Data Inicial:** data inicial de análises de períodos, tais como cascata e Veq; ou data inicial para cópia do banco de dados; ou a data para análise diária, tais como espectro ou órbita;
- **Data Final:** data final para análises de períodos; ou data final para cópia do banco de dados;
- **Inc:** incremento para as análises de período, indica o número mínimo de dias entre medições;
- **[+] e [-]:** adiciona ou subtrai o valor do campo Inc da Data Inicial;
- **Freq:** valor em *Hz* para Amplitude de Frequência (corte em frequência);
- **Nº Canal:** número do canal a ser utilizado nos gráficos de espectro, sinal no tempo, cascata, mapa, corte e rms;
- **Escala Y:** chave para escala Y logarítmica ou linear;
- **Grid:** chave para desenho do *grid*;
- **Máscara:** chave para desenho da máscara de alarme nos gráficos de espectro;
- **Interação:** chave para interação do usuário com a janela de gráficos, se sim permite a utilização de recursos de *zoom*, digitalizar valores e cursor;
- **Filtro:** menu de filtragem digital do sinal no tempo ou órbita, tem como opções: *Nenhum*, 10 *Hz*, 20 *Hz*, 50 *Hz*, 100 *Hz* e 150 *Hz*;
- **Cruzamento:** controle para o tipo de gráfico de cruzamento desejado:
 - **A vs B:** desenha o campo A no eixo x e B no eixo y;
 - **A/B:** desenha o campo A dividido pelo campo B;
 - **%A e %B:** desenha os campos A e B em porcentagem, no mesmo gráfico;

Os campos A e B tem os mesmos valores do controle de dados Dados, logo a seguir;

- **Dados:** contém o dado escalar a ser gráficoado pela função Dados do menu de gráficos, podendo ser:
 - Montante;
 - Jusante;
 - Desnível (montante-jusante);
 - Vazão;
 - Potência ativa;
 - Potência reativa;

Dados Auxiliares

Informações Adicionais

Máquina: 2

Data: 01/08/93 Hora: 00:00:00

Montante: 0.000 P. Ativa: 140.000

Jusante: 1.000 P. Reativa: 50.000

Varão: 400.000 Temperatura: 50.000

Operador: Computador

Obs:

- Teste 0: 02/08/93
- Teste 1: 02/08/93
- Teste 2: 02/08/93
- Teste 3: 02/08/93
- Teste 4: 02/08/93

Figura 3.4: Janela de Dados Auxiliares

- Temperatura;
 - Veq;
 - RMS;
 - Raio máximo;
 - Máxima amplitude (em frequência);
 - Amplitude em frequência (corte em frequência).
- Veq: controle da banda do Veq para os diversos gráficos que utilizem este valor, caso a opção **Banda** for selecionada, um campo para a seleção da banda desejada aparecerá logo abaixo deste controle.

3.4.2 Janela de Dados Auxiliares

Os valores dos dados auxiliares, armazenados com os sinais de vibração são mostrados nesta janela. Esta janela é apresentada na figura 3.4.

Os componentes desta janela são: o botão com o ícone, que fecha janela, e os dados auxiliares. Estes dados são os seguintes:

- **Máquina:** número da máquina;
- **Data:** data da medição dos sinais;
- **Hora:** horário da medição;
- **Montante:** nível a montante [m];
- **Jusante:** nível a jusante [m];
- **P.Ativa:** potência ativa [MW];
- **P.Reativa:** potência reativa [$MW - reat$];
- **Vazão:** vazão [m^3/s];
- **Temperatura:** temperatura do mancal [$^{\circ}C$];
- **Operador:** nome do operador da máquina;
- **Obs:** observações sobre as condições operacionais que o operador achar pertinente.

3.4.3 Janela de Informações

As informações referentes aos dados que estão armazenados no disco rígido de uma determinada máquina são mostradas nesta janela. Esta janela é apresentada na figura 3.5.

Os componentes desta janela são: o botão com o ícone, que fecha janela, e as informações. As informações são as seguintes:

- **Máquina:** número da máquina;
- **Data Inicial:** data inicial armazenada;
- **Data Final:** data final armazenada;
- **Inc:** incremento usado quando da cópia para o disco rígido, corresponde ao número mínimo de dias entre medições;
- **Nº dias:** número de dias realmente copiados para o disco rígido;

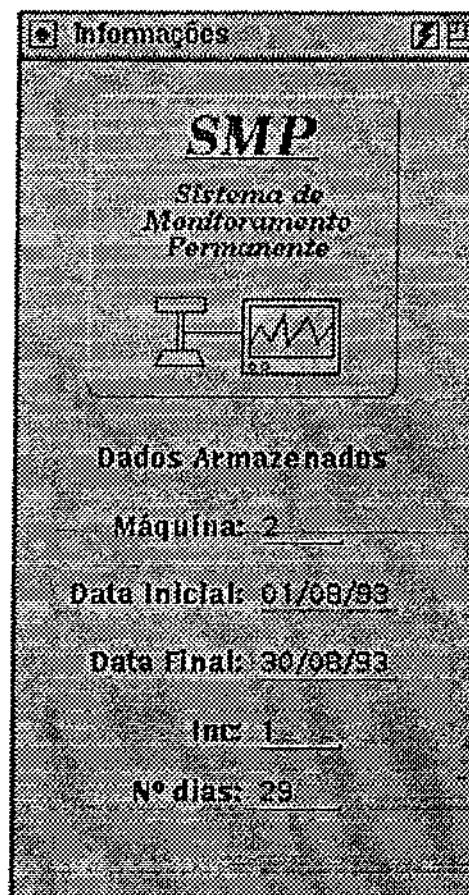


Figura 3.5: Janela de Informações

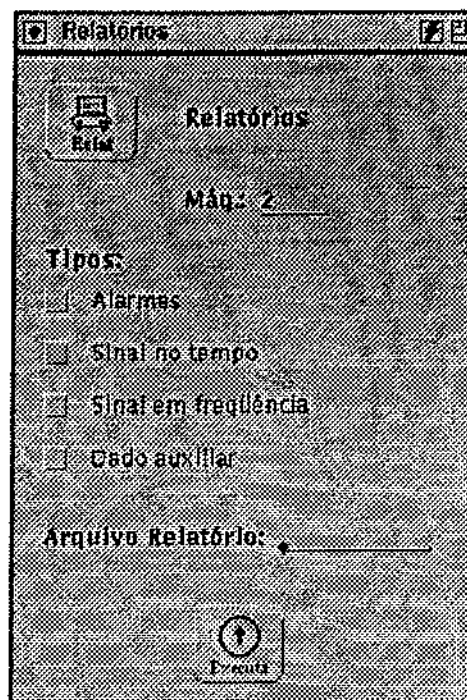


Figura 3.6: Janela de Relatórios

3.4.4 Janela de Relatórios

O controle da emissão de relatórios é executado por esta janela. Nela é possível escolher o tipo de relatório, o arquivo de saída e, finalmente, criar o relatório. É possível também exportar os dados armazenados, no formato ASCII, para utilização em outros *softwares*. Esta janela é apresentada na figura 3.6.

Os componentes desta janela são: os botões com os ícones, o controle do tipo de relatório, o dado a ser gravado, caso a tipo **Dado** esteja selecionado e o nome do arquivo de saída.

Os botões executam as seguintes funções:

- : aborta a geração do relatório e fecha esta janela;
Relat
- : cria o(s) relatório(s) desejado(s) e fecha esta janela.
Executa

Os tipos de relatórios possíveis são:

- **Alarmes**: gera um relatório com todos os valores que excedam os alarmes ou alertas, caso estes existam. O resultado deste relatório é gravado em um arquivo o nome especificado no campo **Arquivo Relatório** e com extensão **.alarm**;

- **Sinal no tempo:** gera um arquivo de 3 colunas com os dados no tempo, sendo tempo, em segundos, canal 1 e canal 2, respectivamente. O arquivo o nome base, com extensão **.time**;
- **Sinal em frequência:** gera um arquivo de 4 colunas com os dados em frequência, sendo frequência, em Hertz, parte real, parte imaginária e valor absoluto, respectivamente. O arquivo o nome base, com extensão **.freq**;
- **Dado auxiliar:** gera um arquivo de 2 colunas com os valores do dado auxiliar, sendo número de dias, a partir da data inicial e valor do dado, respectivamente. O arquivo o nome base, com extensão **.data**;

Os dados necessários para a geração do relatório são obtidos da janela de controle, tais como data, data inicial, data final, incremento, N^o do canal, dado auxiliar e banda, no caso de Veq. O nome base do arquivo de saída, ao qual será acrescentado uma extensão, conforme o tipo de relatório, é obtido no campo **Arquivo Relatório**.

3.4.5 Janela de Alarmes

A entrada e visualização dos valores de alarme pode ser realizada por esta janela. Qualquer valor dos alarmes ou alertas podem ser alterados, ou utilizando o teclado ou o *mouse*. A máscara de espectro pode ser visualizada, as configurações ou alterações são executadas via arquivo de configuração. Esta janela é apresentada na figura 3.7.

Os componentes desta janela são: os botões com os ícones, os campos com os valores de alarme/alerta, valores da máscara, controle do canal e o botão de término.

Os botões tem as seguintes funções:

-  : aborta a entrada de dados e fecha esta janela;
Alarm
-  : cria um gráfico com a máscara do alarme para o canal desejado;
Masc
-  : Armazena os valores de alarme/alerta no arquivo e fecha esta janela.

Os campos de alerta correspondem a uma porcentagem do valor do alarme, quando esta porcentagem é zero, nenhum alerta é emitido para o determinado campo. Os campos da janela correspondem à:

- **RMS:** alarme/alerta no valor RMS;
- **Veq:** alarme/alerta no valor do Veq total;
- **Máx.Amp:** alarme/alerta no valor da máxima amplitude (em frequência);

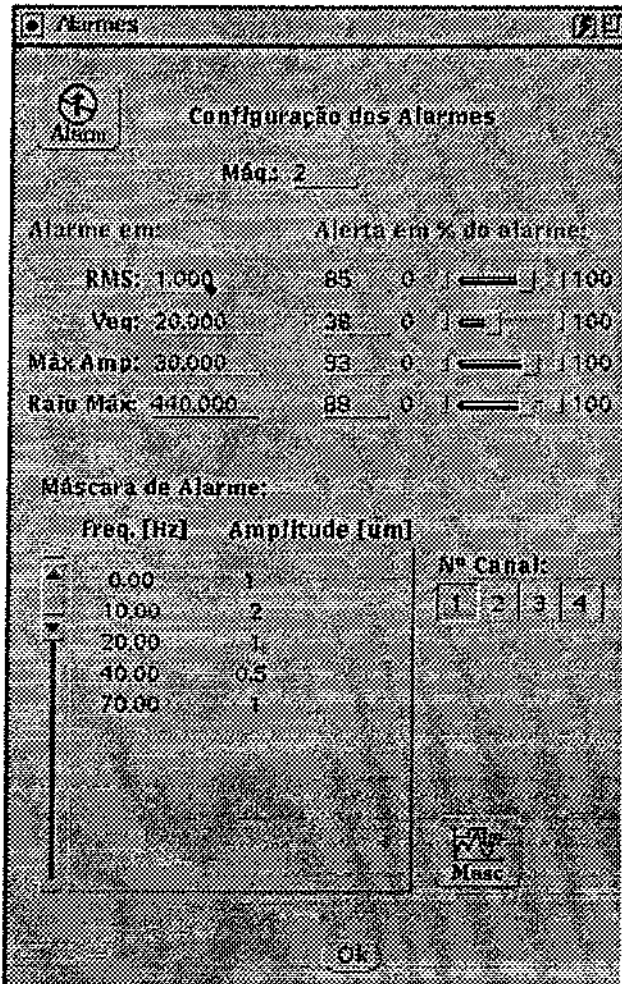


Figura 3.7: Janela de Alarmes

- **Raio Máx:** alarme/alerta no valor do raio máximo;
- **Máscara de Alarme:** mostra os valores lidos do arquivo de configuração para a máscara;
- **Nº Canal:** número do canal a ser utilizado nos dados de máscara;

Os valores da máscara, do canal especificado no controle à direita da lista, são apresentados em uma lista, na qual o usuário tem acesso a todos os valores com a utilização da barra de rolagem (*scroll bar*). Os valores da lista podem ser plotados utilizando o botão do canto inferior direito. Os valores desta lista são lidos de um arquivo de configuração, *mask.n* onde *n* é o número da máquina. O formato deste arquivo é apresentado no apêndice A.

3.4.6 Janela de Gráficos

Todas as saídas gráficas do programa são direcionadas para esta janela. Nela o usuário além de poder visualizar os gráficos, pode executar ampliações (*zoom*), determinar valores e utilizar um cursor. Estas operações estão disponíveis após o usuário colocar a opção Interação da janela de controle como Sim.

Estão disponíveis 3 funções de interação, o *zoom*, *pointer* e *cursor* :

- **pointer:** permite a visualização dos valores no ponto determinado pela posição do cursor. A função é iniciada com a tecla [p], com a mensagem *Pointer*, no canto inferior esquerdo. Os pontos são digitalizados apertando qualquer tecla do *mouse*, que são apresentados no formato: *Pointer X:x.x Y:y.y* onde *x.x* e *y.y* são os valores no eixo X (horizontal) e no eixo Y (vertical) respectivamente. Com a barra de espaço ou a tecla [q] esta operação é finalizada.
- **zoom:** permite a ampliação de uma região do gráfico. Inicia a operação com a tecla [z], o primeiro ponto é solicitado com a mensagem *Zoom First Point* no canto inferior direito, com o auxílio do *mouse* escolhe-se o primeiro ponto apertando qualquer um dos botões. Com isso um retângulo é traçado, com um dos cantos na posição do primeiro ponto e outro canto na posição atual do cursor. O programa mostra a mensagem *Zoom Second Point*, solicitando ao usuário o segundo ponto, que determinará a área a ser ampliada. O usuário pode retornar a escala apresentada antes deste comando utilizando a tecla [b].
- **cursor:** permite percorrer as diversas curvas do gráfico ponto a ponto, lendo os valores e executando ampliações. Com a tecla [c] inicia-se a operação. Durante a execução a seguinte mensagem é apresentada: *Cursor curva X:x.x Y:y.y (n)* onde *curva* é o título da curva, *x.x* e *y.y* as coordenadas do cursor e *n* o passo utilizado na movimentação. As teclas válidas são apresentadas na tabela 3.1. A ampliação é executada pressionando a barra de espaço no ponto inicial, após o posicionamento do cursor no ponto final, pressiona-se a barra de espaço novamente, executando a ampliação desejada. Durante a escolha do ponto final, o ponto inicial é marcado por uma linha vertical, que permanece fixa até o termino da função de ampliação. A escala anterior ao comando de ampliação pode ser restabelecida utilizando a tecla [b].

Todas as teclas válidas durante a interação com o gráfico são apresentadas na tabela 3.1.

Tecla	Função
p	função <i>pointer</i>
z	função <i>zoom</i>
c	função <i>cursor</i>
q	termina a interação/função cursor
b	volta a escala anterior
+	aumenta o passo em 1 ponto
-	diminui o passo em 1 ponto
Ctrl-E	aumenta o passo em 5 pontos
Ctrl-X	diminui o passo em 5 pontos
1-9	atribui 1-9 ao passo
Ctrl-S	movimenta cursor a esquerda
Ctrl-D	movimenta cursor a direita
Ctrl-R	muda para próxima curva
Ctrl-C	muda para curva anterior

Tabela 3.1: Teclas Válidas na Janela Gráfica

Enquanto o usuário está executando a interação, a janela de controle permanece inativa. A interação é finalizada utilizando a tecla **q**. Os gráficos de cascata e mapa de espectros não aceitam as funções de interação, apesar disto, quando a opção **Interação** está acionada, o usuário necessita pressionar alguma tecla na janela de gráficos, para o programa continuar o funcionamento.

Capítulo 4

Simulações

Neste capítulo é apresentado um modelo matemático simples, onde são executadas algumas simulações. Os dados destas simulações são inseridos no *software* de monitoramento, obtendo-se como resultados os gráficos para as diversas técnicas implementadas. O modelo matemático apresentado a seguir é somente ilustrativo, tem a finalidade de exemplificar a etapa da utilização do modelo, apresentada no ciclo de utilização do programa de monitoramento (figura 1.5).

A aplicação do monitoramento da melhor maneira possível requer a utilização de um modelo matemático. De posse do modelo, o especialista pode simular as diversas condições operativas da máquina, e estudar a sensibilidade dos métodos de análise aos problemas que aparecem em campo.

Com isso, novos métodos podem ser desenvolvidos e implementados em um programa de monitoramento, melhorando a performance da manutenção de uma maneira geral. Pode-se também eliminar técnicas que não indiquem os problemas reais do equipamento.

O objetivo desta etapa é mostrar a viabilidade de se utilizar o *software* proposto como uma ferramenta na análise das diversas técnicas de monitoramento, de uma maneira simples e direta. Para exemplificar o procedimento, utiliza-se o modelo de seis graus de liberdade [Ata92], que representa uma aproximação inicial de uma bancada de testes (conforme figura 4.1) existente no Departamento de Projeto Mecânico.

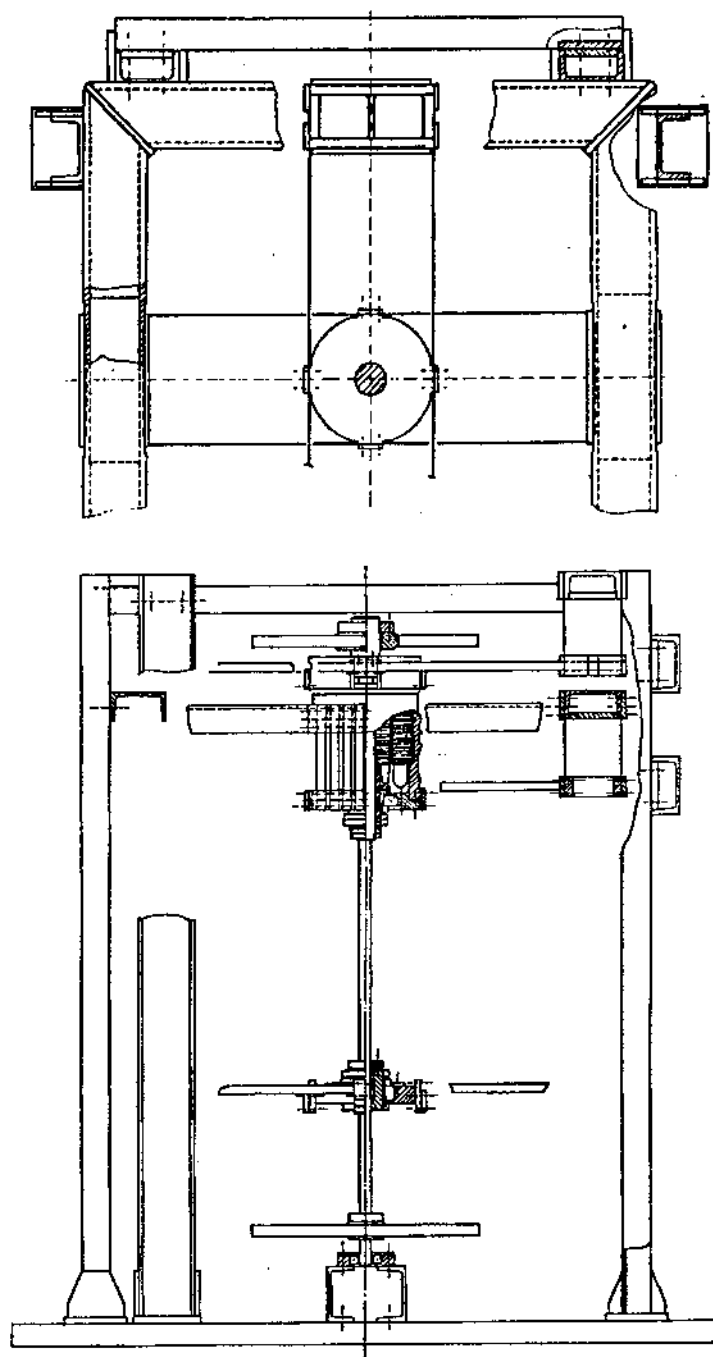


Figura 4.1: Diagrama da bancada de testes

4.1 Modelo Matemático

O modelo matemático, que representa o diagrama apresentado na figura 4.2, é apresentado logo abaixo:

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} M_m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_d & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_d & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_m \\ \ddot{x}_d \\ \ddot{\varphi}_y \\ \ddot{y}_m \\ \ddot{y}_d \\ \ddot{\varphi}_x \end{Bmatrix} + \\
 & + \begin{bmatrix} C_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -I_p \Omega \\ 0 & 0 & 0 & C_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_p \Omega & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_m \\ \dot{x}_d \\ \dot{\varphi}_y \\ \dot{y}_m \\ \dot{y}_d \\ \dot{\varphi}_x \end{Bmatrix} + \\
 & + \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & 0 & 0 & 0 \\ K_{12} & K_{22} & K_{23} & 0 & 0 & 0 \\ K_{13} & K_{23} & K_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{44} & K_{12} & -K_{13} \\ 0 & 0 & 0 & K_{12} & K_{22} & -K_{23} \\ 0 & 0 & 0 & -K_{13} & -K_{23} & K_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_m \\ x_d \\ \varphi_y \\ y_m \\ y_d \\ \varphi_x \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ M_d \epsilon \Omega^2 \cos \Omega t + F_x \\ 0 \\ 0 \\ M_d \epsilon \Omega^2 \sin \Omega t + F_y \\ 0 \end{Bmatrix}
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

onde:

M_m é a massa do mancal;

M_d é a massa do disco inferior;

$I_t = \frac{M_d(3r_d^2 + e_d^2)}{12}$ é o momento de inércia transversal do disco;

$I_p = \frac{M_d r_d^2}{2}$ é o momento de inércia polar do disco;

Ω é a velocidade de rotação própria do disco;

ϵ é a distância entre o centro geométrico e o centro de gravidade do disco;

x_m, y_m, x_d e y_d são respectivamente os deslocamentos nas direções x e y do mancal e do disco, e φ_x e φ_y são as rotações do disco em torno dos eixos x e y respectivamente;

F_x e F_y são as forças de excitação externa, aplicada nas direções x e y do disco, respectivamente;

$$K_{11} = \frac{12EI}{l_1^3} + \frac{12EI}{l_2^3} + K_x;$$

$$K_{44} = \frac{12EI}{l_1^3} + \frac{12EI}{l_2^3} + K_y;$$

$$K_{12} = -\frac{12EI}{l_2^3};$$

$$K_{13} = -K_{23} = \frac{6EI}{l_2^2};$$

$$K_{22} = \frac{12EI}{l_2^3};$$

$$K_{33} = \frac{4EI}{l_2};$$

$$K_x = K_y = K_m;$$

$$C_x = C_y = C_m;$$

$I = \frac{\pi d^4}{64}$ é o momento de inércia de área do eixo.

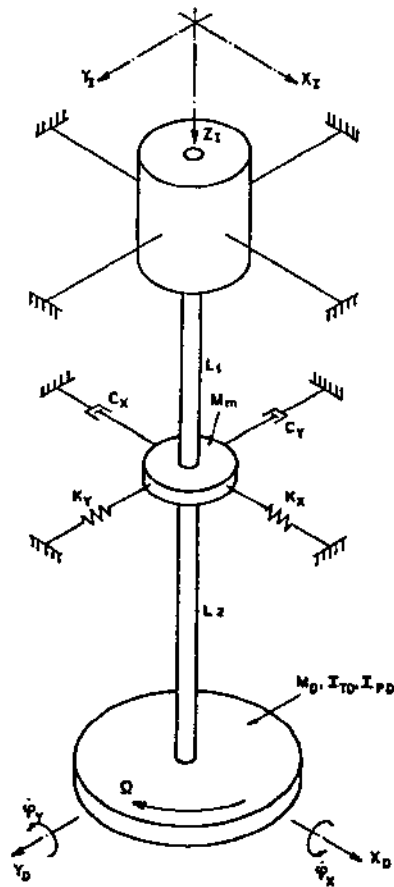


Figura 4.2: Diagrama Esquemático

4.2 Descrição da Simulação

No modelo utilizou-se os seguintes dados:

$M_m = 15 \text{ kg}$
$M_d = 10 \text{ kg}$
$I_t = 0.25 \text{ kg.m}^2$
$I_p = 0.50 \text{ kg.m}^2$
$r_d = 0.316 \text{ m}$
$l_1 = 0.40 \text{ m}$
$l_2 = 0.40 \text{ m}$
$\epsilon = 2 \times 10^{-4} \text{ m (estimado)}$
$E = 2.1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$
$I = 7.2 \times 10^{-9} \text{ m}^4$
$\Omega = 40.0 \text{ Hz}$
$C_m = 4000 \text{ N.s/m}$
$K_m = 500000 \text{ N/m}$

O algoritmo utilizado na simulação foi a integração direta por Newmark, conforme descrito em [BW76]. Este algoritmo foi escolhido por apresentar grande estabilidade e facilidade de implementação. O programa de simulação está escrito em linguagem C, e permite a utilização de outro modelo (linear) somente alterando os arquivos com as matrizes M , C e K , que podem ser de qualquer ordem. Os dados gerados na simulação são convertidos para o formato do banco de dados, por um programa semelhante ao utilizado na Cesp, os dados convertidos servirão de entrada para o programa SMP. O fluxo de dados é apresentado na figura 4.3.

A simulação foi executada utilizando uma taxa de amostragem de 400 Hz . Para a análise de frequência, que no programa de monitoramento utiliza sinais até 200 Hz , o sinal da simulação é reamostrado. Estes valores derivam dos parâmetros utilizados atualmente em campo, no sistema de monitoramento em implantação na Cesp.

A força de excitação utilizada foi uma excitação em banda, excitando as frequências de 0 Hz até 50 Hz , conforme a figura 4.4. Esta força (F_x e F_y) é introduzida no modelo juntamente com a excitação devida ao desbalanceamento.

Os casos simulados foram:

1. Aumento da velocidade de rotação:

Ω : 10 Hz até 60 Hz ;

2. Variação das constantes do mancal:

C_m : 4000 até 400 N.s/m e

K_m : 5×10^5 até $5 \times 10^4 \text{ N/m}$

3. Variação do momento de inércia:

I : 7.2×10^{-9} até 7.2×10^{-10}

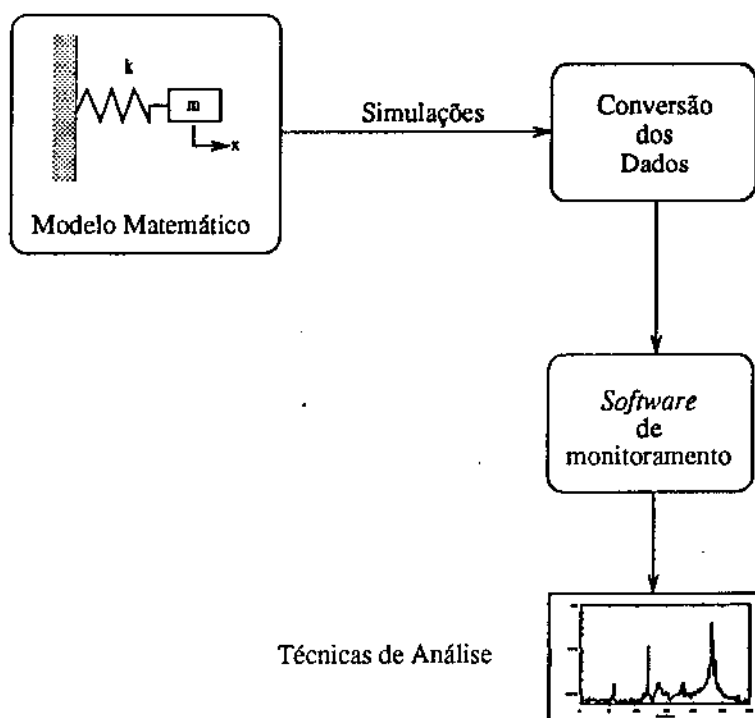


Figura 4.3: Fluxo da Informação na Simulação

Devido a simplicidade do modelo, não são muitos os parâmetros que podem ser alterados. Apesar de não representar a máquina hidroelétrica, tentou-se executar simulações que fossem compatíveis com os defeitos apresentados por este tipo de equipamento. No primeiro caso executa-se uma variação na velocidade de rotação, para simular uma partida. No segundo caso é feita uma variação simultânea dos valores de rigidez e amortecimento, tentando reproduzir uma possível alteração do comportamento do mancal intermediário. O terceiro caso simulado tenta reproduzir alguma falha no eixo, variando-se o momento de inércia.

O programa de monitoramento utiliza sinais de 4 canais para as análises no domínio da frequência, e 2 canais para análises no domínio do tempo. Os valores correspondentes a x_m , y_m , x_d e y_d serão armazenados nos canais de 1 a 4, nesta ordem, para as análises de frequência, e os valores x_m e y_m para as análises no tempo.

Para cada caso, utilizando um incremento apropriado, foram gerados 20 conjuntos de dados, que irão corresponder a 20 dias de medições no sistema de monitoramento. O valor do parâmetro que está sendo alterado é armazenado como sendo uma temperatura. Para a variação da velocidade o valor armazenado é própria velocidade e para os demais casos o valor armazenado está em porcentagem.

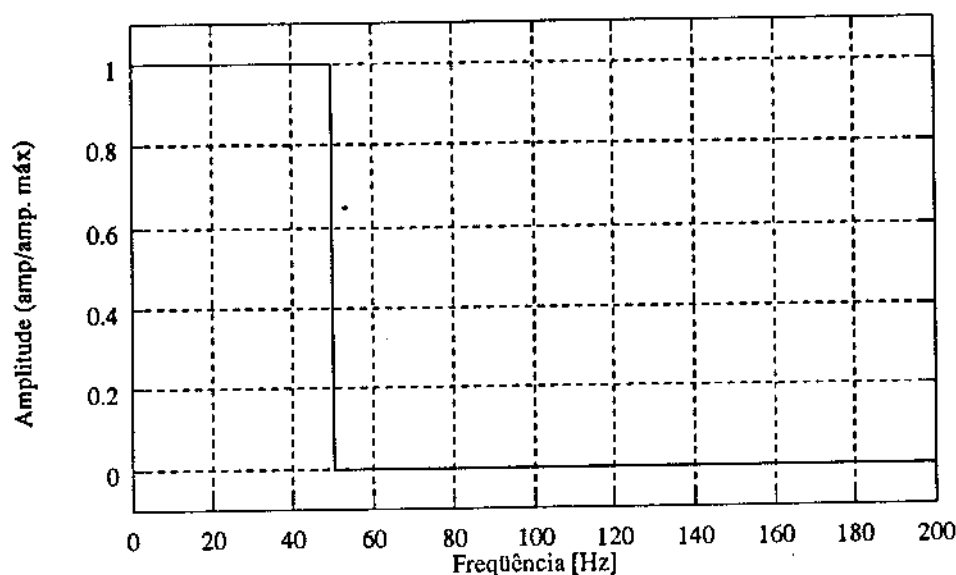


Figura 4.4: Força de Excitação (normalizada)

4.3 Resultados

Alguns dos resultados são mostrados a seguir, não foram apresentados todos os gráficos possíveis de se obter com o programa SMP, mas somente os mais interessantes.

4.3.1 Caso 1

Nestas simulações, varia-se a velocidade de rotação (Ω) de 10 Hz até 60 Hz . Os valores de velocidade (em Hz) estão armazenados como temperatura, para o cruzamento deste valor com os demais resultados das técnicas de análise.

Na figura 4.5 observa-se os vários espectros para o ponto 3, que no modelo corresponde à x_d . Nota-se a progressão da velocidade crítica retrógrada, de menor valor, que aparece devido ao efeito giroscópico. Nota-se também, a passagem da velocidade de rotação pela segunda velocidade crítica, que corresponde ao pico do dia 03/09/93.

Estes mesmos valores podem ser observados na figura 4.6 no mapa de espectros. Nesta figura pode-se observar de uma maneira mais precisa toda a variação dos valores de frequência.

A variação do valor RMS, no ponto 1, pode ser observada na figura 4.7. Note que este gráfico atinge o valor máximo quando da passagem da velocidade de rotação pelo segundo modo. Na figura 4.8 é apresentado um cruzamento do valor da velocidade (linha contínua), armazenado na temperatura, com o valor do raio máximo (linha pontilhada), que apresentam comportamentos diversos.

Cascata - Máquina 2 - Sensor 3

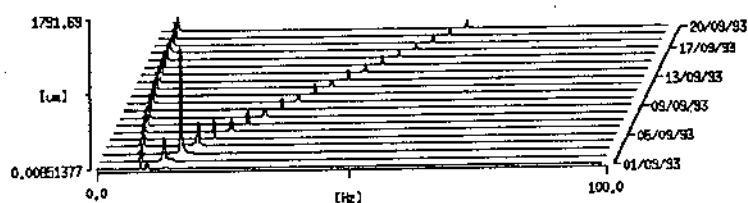


Figura 4.5: Caso 1: Cascata - Ponto 3

Mapa de Espectros - Máquina 2 - Ponto 3

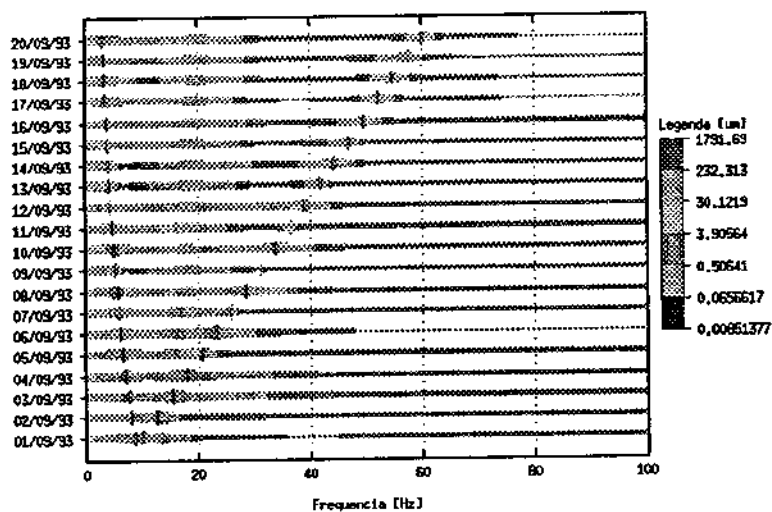


Figura 4.6: Caso 1: Mapa de Espectros - Ponto 3

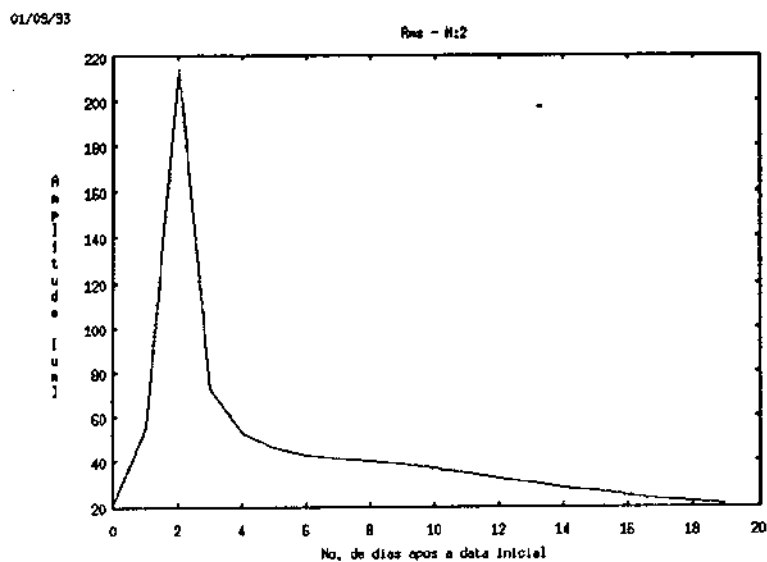
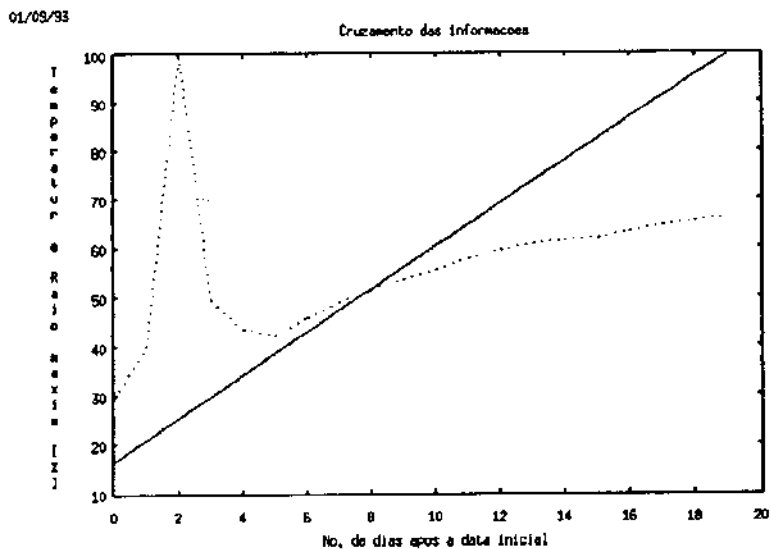


Figura 4.7: Caso 1: RMS - Ponto 1

Figura 4.8: Caso 1: Cruzamento Velocidade $\times$ Raio Máximo (em %)

4.3.2 Caso2

Simula-se, neste caso, a variação simultânea das constantes do mancal, tanto o valor da rigidez quando do amortecimento, de 100% até 10% dos valores iniciais, $5 \times 10^5 \text{ N/m}$ e 4000 N s/m . Esta porcentagem está armazenada como temperatura, para o posterior cruzamento deste valor com os demais resultados das técnicas de análise.

A figura 4.9 apresenta o gráfico de cascata para o ponto 4 (y_d), onde a variação das constantes do mancal se traduz em uma diminuição da segunda velocidade crítica. Esta diminuição aparece no gráfico quase como uma linha vertical, atenuada pela inclinação à direita do gráfico.

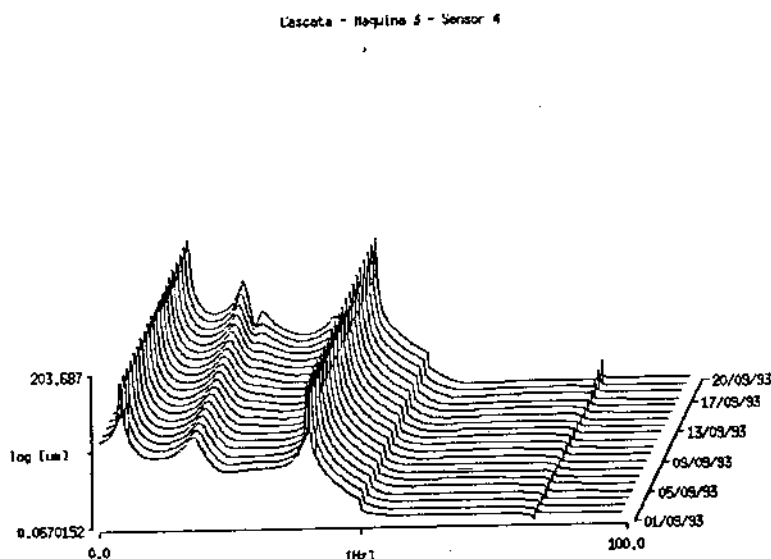


Figura 4.9: Caso 2: Cascata – Ponto 4

Esta diminuição é melhor notada pelo mapa de espectros, apresentado na figura 4.10. A faixa de variação da velocidade crítica fica mais acentuada, e pode ser determinada mais facilmente.

O valor RMS aumenta quase que linearmente com a diminuição das constantes do mancal, o que era esperado, pois com o mancal menos rígido as amplitudes de vibração tenderiam a aumentar. Isto pode ser observado na figura 4.11 onde o valor RMS, para o ponto 1 (x_m), aparece como uma linha contínua e a porcentagem de variação das constantes aparece como uma linha pontilhada.

Apesar do valor RMS ter uma variação linear, a máxima amplitude apresenta um aumento e depois uma estagnação próxima ao ponto de máximo. Este comportamento pode ser observado na figura 4.12, onde a linha contínua corresponde ao valor da amplitude máxima, para o ponto 1, e a linha pontilhada a porcentagem de variação.

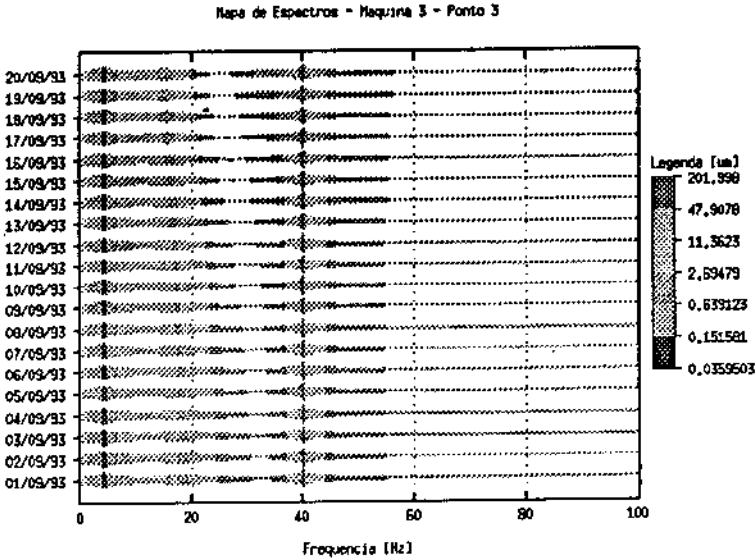


Figura 4.10: Caso 2: Mapa de Espectros – Ponto 3

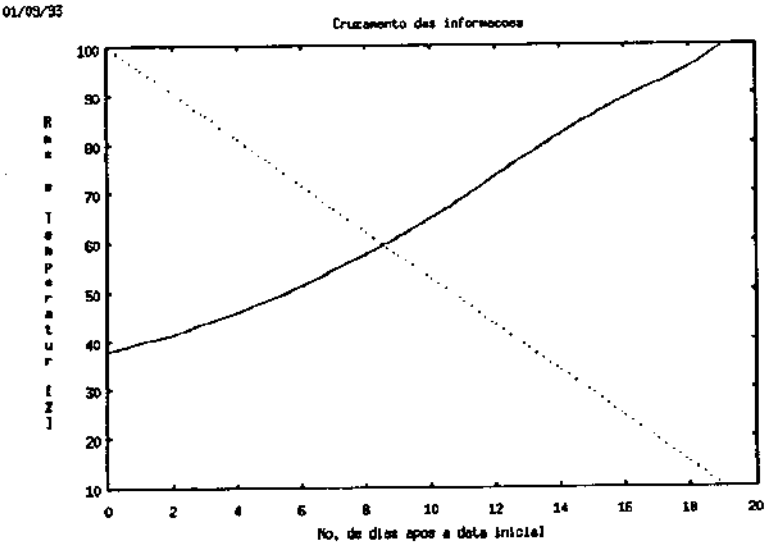


Figura 4.11: Caso 2: Cruzamento RMS × Variação (em %)

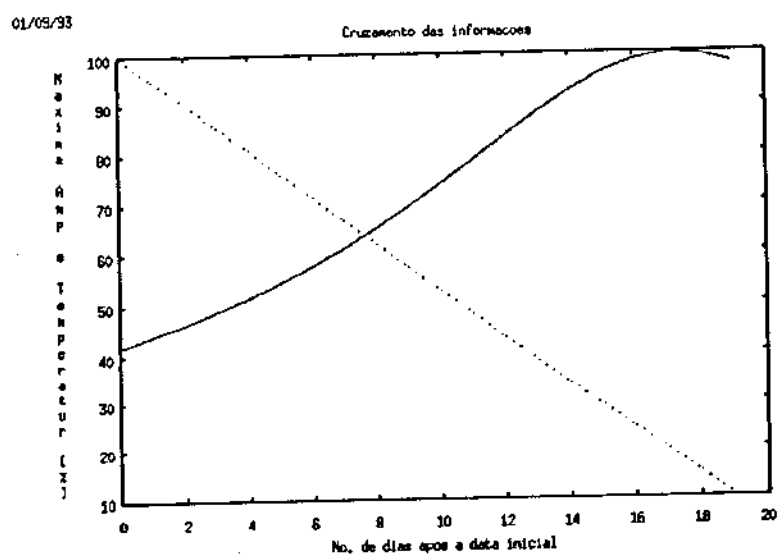


Figura 4.12: Caso 2: Cruzamento Máxima Amplitude (1) $\times$ Variação (em %) -

4.3.3 Caso 3

Este caso simula a variação do momento de inércia do eixo (I), que altera toda a matriz de rigidez do modelo. O valor de I é alterado de 7.2×10^{-9} (100%) até 7.2×10^{-10} (10%). O valor em porcentagem é armazenado como temperatura, para o cruzamento deste valor com os demais resultados das técnicas de análise.

A figura 4.13 apresenta o gráfico de cascata para o ponto 4 (y_d), onde a variação do momento de inércia aparece como uma diminuição da segunda velocidade crítica e a excitação/diminuição da terceira frequência natural. Amplitude da velocidade de rotação diminui, conforme a figura 4.14, que apresenta esta frequência (40 Hz) ao longo do tempo.

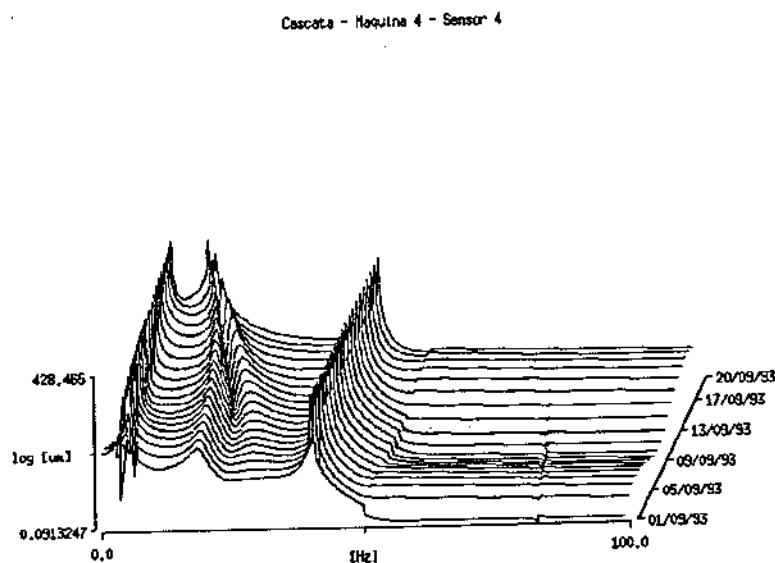


Figura 4.13: Caso 3: Cascata - Ponto 4

O comportamento do valor V_{eq} , é apresentado na figura 4.15. Para a configuração do V_{eq} somente foram utilizados os 3 primeiros modos. O aumento no final do intervalo se deve a proximidade e a alta amplitude das segunda e terceira frequência natural que, nas últimas simulações, permanecem na banda de integração correspondente a primeira velocidade crítica.

O valor RMS apresenta uma queda e após uma inflexão volta a crescer. Este comportamento também é observado no valor de máxima amplitude, mas este apresenta uma diminuição linear e após o ponto de mínimo um crescimento rápido. Estes valores podem ser observados na figura 4.16, onde a linha contínua representa a máxima amplitude e a linha pontilhada o valor RMS.

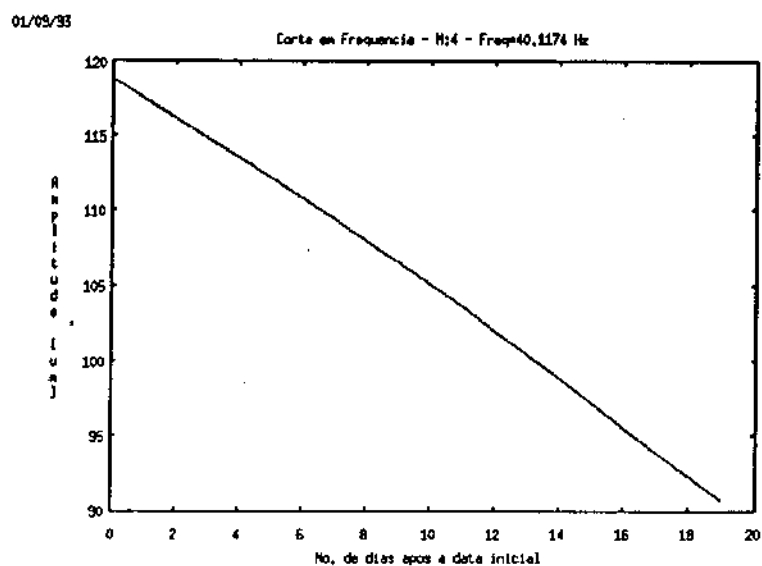


Figura 4.14: Caso 3: Corte em Frequência - 40 Hz, Ponto 4

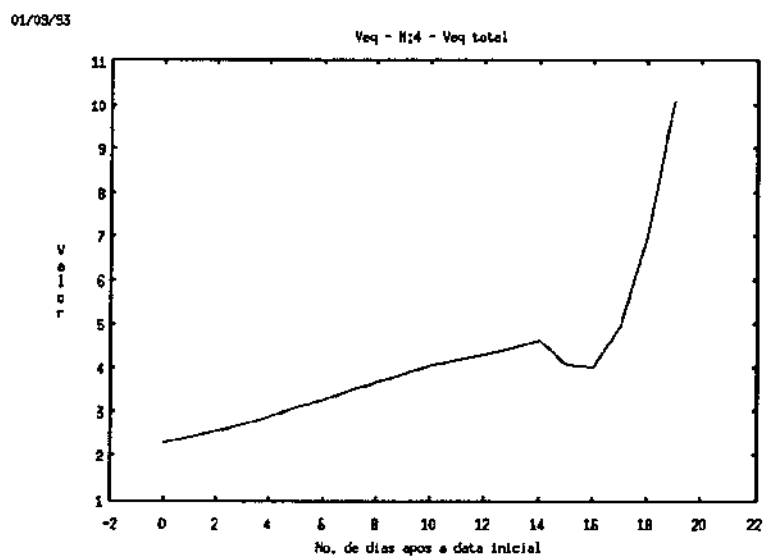


Figura 4.15: Caso 3: Veq

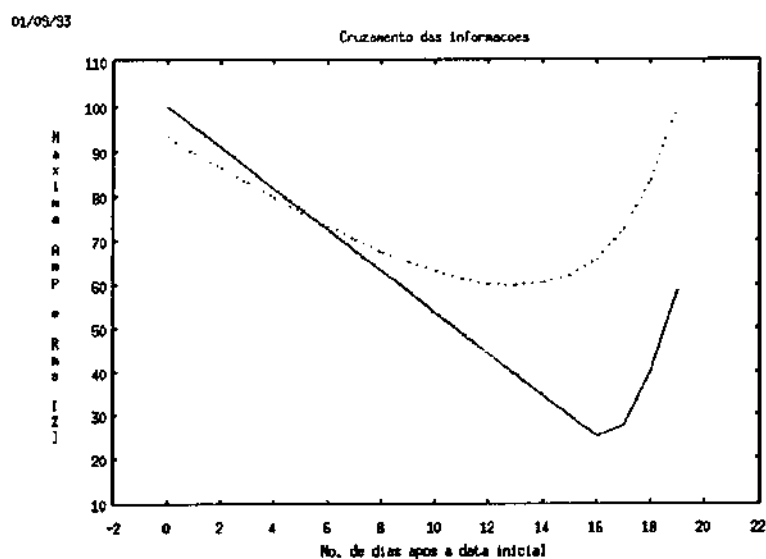


Figura 4.16: Caso 3: Cruzamento Máxima Amplitude $\times$ RMS - Ponto 2 (em %)

4.4 Comentários

Como observa-se através das figuras apresentadas, de posse de um modelo matemático e do programa de monitoramento, pode-se testar as diversas ferramentas. A observação do comportamento de cada ferramenta é feito de uma maneira simples e rápida.

Para uma perfeita utilização desta metodologia, um modelo mais refinado seria necessário. Procurou-se aqui, somente apresentar esta metodologia e ressaltar a necessidade de um modelo matemático, para a perfeita utilização do programa de monitoramento.

No próximo capítulo serão apresentados alguns resultados para uma máquina real, conseguidos a partir da implementação do *software* na CESP.

Capítulo 5

Aplicações

A Companhia Energética de São Paulo está implantando um sistema de monitoramento permanente nas suas unidades geradoras, com a instalação de um conjunto de sensores permanentes e a aquisição de analisadores de sinais. Este processo foi acompanhado pelo Departamento de Projeto Mecânico, através de convênios entre a Cesp e a Unicamp.

A Unicamp coube as atividades de modelagem matemática, especificação de sensores e equipamentos, construção de alguns sensores, medições em campo e implementação do *software* de monitoramento, já apresentado anteriormente.

5.1 Histórico

Os convênios entre a Cesp e a Unicamp foram formados desde 1981. Inicialmente foram executados estudos das condições operativas e a construção dos primeiros modelos. Foram executadas também várias medições experimentais, para suprir dados para a pesquisa teórica e algumas vezes resolver problemas de funcionamento das máquinas.

Com os modelos matemáticos e os dados experimentais foi possível a aplicação de novas técnicas de monitoramento, como por exemplo o Veq. No ano de 1987, com o maior conhecimento das reais características da máquina foram especificados os sensores e o procedimento de análise. Neste ano também iniciou-se a construção de transdutores de deslocamento e caixa de controle, que iriam começar a ser instaladas em 1988, nas máquinas da Usina de Ilha Solteira. A modelagem foi retomada em 1990, com a construção de modelos mais apurados. Ainda hoje várias pesquisas estão sendo feitas procurando um modelo que contemple todos os fenômenos observados nas medições experimentais.

A modelagem como já citada, foi o ponto principal atacado pela Unicamp para tentar solucionar os problemas apresentados pela Cesp. Um dos primeiros estudos foi executado por Nascimento [Nas87]. Este estudo procurou aprofundar o conhecimento das características das forças de excitação, presentes na máquina hidroelétrica. Para se estudar o comportamento da máquina a estas forças, foram construídos vários modelos matemáticos, utilizando o método dos elementos finitos. A partir de simulações e medições experimentais foram testados alguns

critérios de severidade de vibrações, com resultados satisfatórios.

Ainda abordando o problema da vibração da máquina devido as forças de excitação, Brandão [Bra87] estudou a fundo a vibração induzida pelos fenômenos hidráulicos. Estudou principalmente a formação de vórtices de núcleo nos dutos de sucção da máquina hidroelétrica. Após alguns estudos teóricos, foram executadas algumas medições experimentais em uma bancada, correspondendo a um modelo em escala da turbina.

Para se conseguir resultados mais apurados, Rodmar [Car92] estudou o comportamento do mancal hidrodinâmico. Com um modelo bem refinado do mancal, foi construído um modelo não linear, que também levava em conta o comportamento dos selos. A partir deste modelo e de medições experimentais, uma nova abordagem à diagnose de máquinas foi apresentada.

5.2 Transdutores permanentes

Na usina de Ilha Solteira, estão instalados 4 transdutores de deslocamentos, dois no mancal do gerador e 2 no mancal da turbina. Estes transdutores estão instalados, num mesmo mancal perpendicularmente, para fornecer dados de órbita, e em mancais diferentes aproximadamente na mesma direção vertical. Este posicionamento foi resultado de vários estudos teóricos e medições experimentais.

Cada transdutor é composto de uma ponta sensível (sensor) e um condicionador/linearizador, que é alimentado pela caixa de controle. Além das fontes para os condicionadores, na caixa de controle existe um banco de filtros e *slots* para a inclusão de acelerômetros. A caixa de controle, conjunto sensor/condicionador é apresentado na figura 5.1

Nas demais usinas da Cesp, está sendo instalados outros tipos de sensores e caixas de controle, que estão sendo fornecidas pela indústria, seguindo as especificações da Unicamp.

5.3 Sistema de Monitoramento

O ciclo da informação no sistema de monitoramento em funcionamento na Cesp inicia com a aquisição dos dados utilizando o analisador de sinais da Lynx Tecnologia Ltda. Este analisador grava os dados no formato TEM, que contém os parâmetros da aquisição e os valores em binários, resultado direto dos conversores analógico/digital.

Os dados estão no domínio do tempo, o banco de dados requer os dados em domínio do tempo e em frequência e em um formato específico. A conversão e cálculo da FFT é executada pelo programa CONVERT. A saída do programa CONVERT é armazenada em disquete, que irá formar o banco de dados.

Com o banco de dados, pode-se executar todas as análises descritas no capítulo 3. Este ciclo completo pode ser visualizado na figura 5.2.

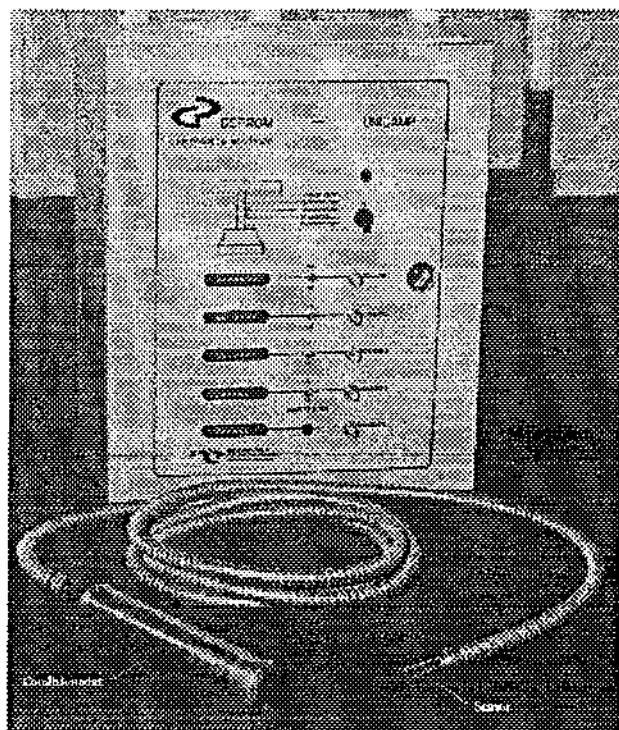


Figura 5.1: Foto da Caixa de Controle e Transdutor

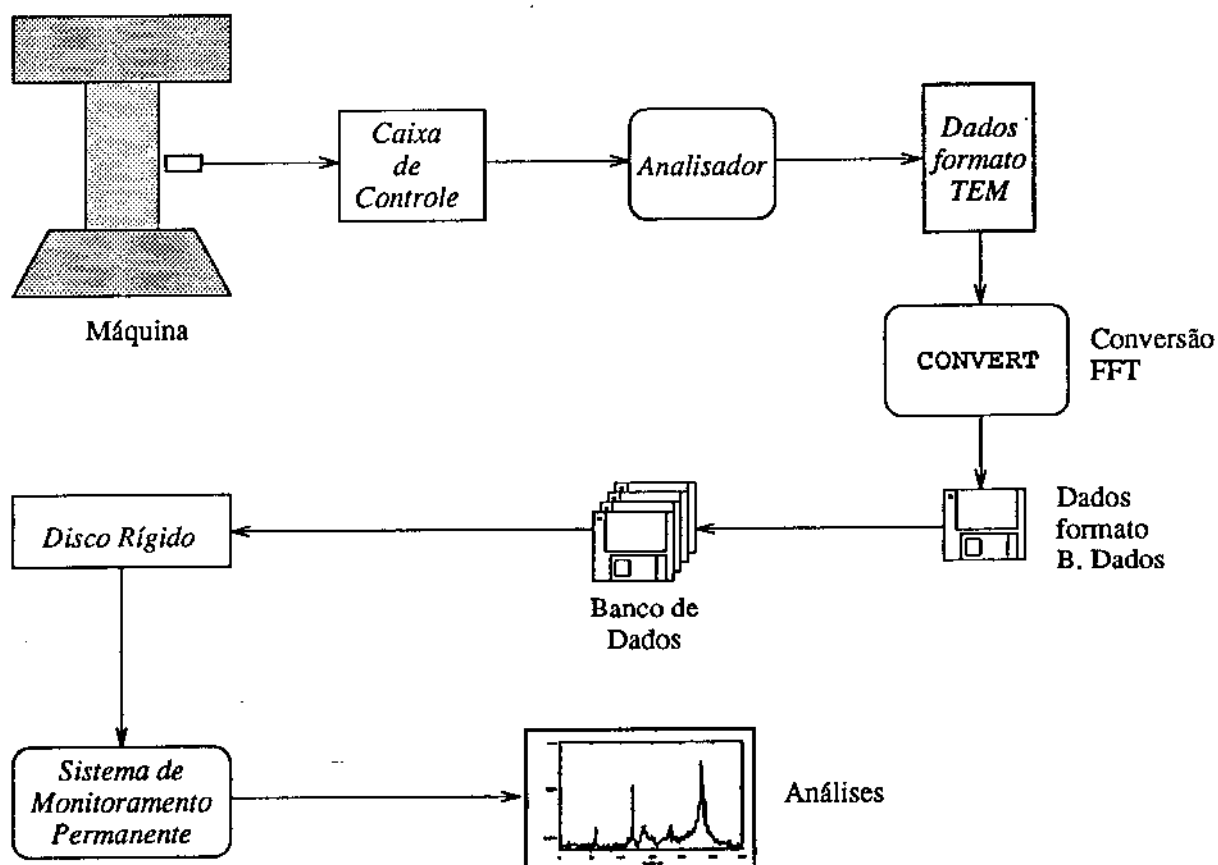


Figura 5.2: Diagrama do Sistema de Monitoramento aplicado a Cesp

5.4 Resultados

O programa de monitoramento está, como já foi mencionado, em implantação na Cesp. Com isso já foi possível a obtenção de vários dados experimentais, seguindo o diagrama 5.2.

A seguir são apresentados alguns destes resultados, que foram obtidos em uma das medições de teste em Ilha Solteira. Nesta medição, alterou-se a potência ativa da máquina, para verificar o comportamento dinâmico nas diversas condições operativas. Nos gráficos apresentados, a potência variou de 20 MW até 160 MW, com incrementos de 20 MW. O valor de 160 MW corresponde a potência nominal das máquinas de Ilha Solteira. O primeiro dia corresponde ao valor de 20 MW.

Na figura 5.3, pode-se notar a instabilidade hidráulica, que aparece em potências baixas. Observa-se, predominantemente, a velocidade de rotação, e as duas frequências naturais, aproximadamente 4.3 Hz e 13 Hz (figura 5.4. Note que a excitação ocorre até praticamente 50 Hz, sendo por este motivo a utilização da banda até 50 Hz na simulação.

Cascata - Máquina 1 - Sensor 1

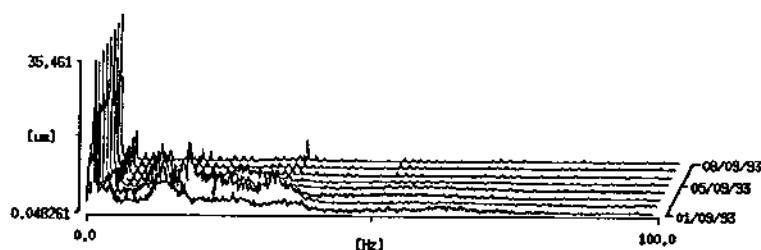


Figura 5.3: Cesp: Cascata - Ponto 1

Devido às grandes amplitudes e ao ruído, a visualização no gráfico de cascata ficam um tanto prejudicadas. Na figura 5.5 observa-se estes mesmos valores, note que o nível de vibração nos primeiros dias é alto em grande parte das frequências, indicando uma má condição operativa. Isto pode ser melhor visualizado na figura 5.6, onde é apresentado o valor RMS.

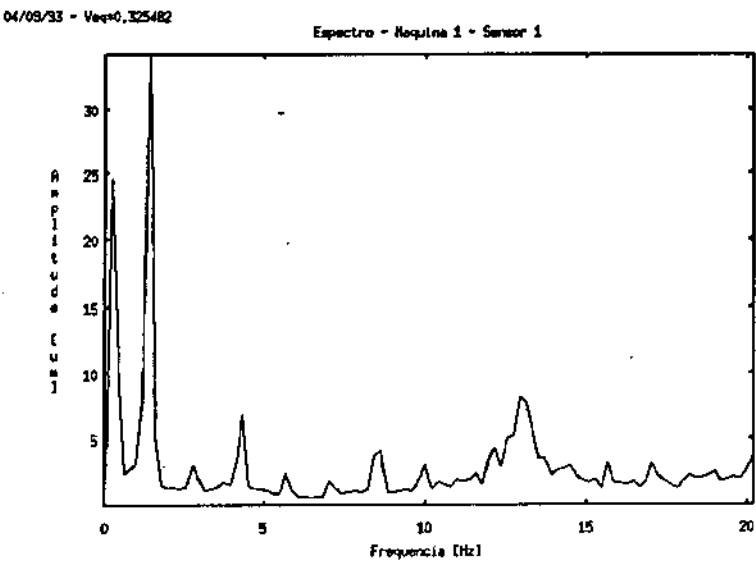


Figura 5.4: Cesp: Espectro – Ponto 1

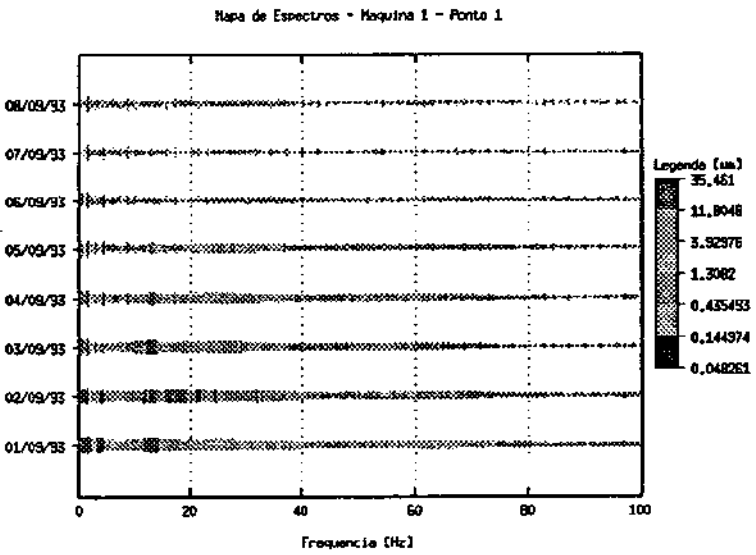


Figura 5.5: Cesp: Mapa de espectros

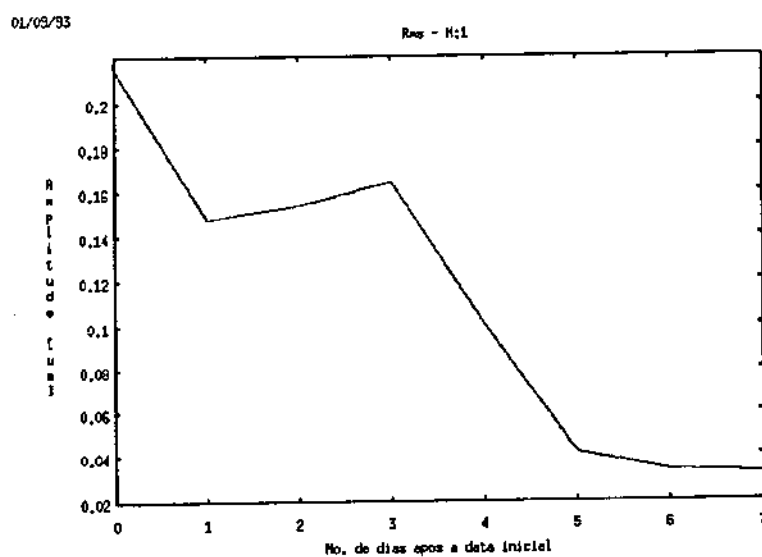


Figura 5.6: Cesp: Valor RMS

Na figura 5.7 pode-se observar a órbita para 40 MW, com várias componentes de alta frequência. Para tentar observar melhor o comportamento do rotor, pode-se aplicar aos dados no tempo um filtro, onde todas as componentes acima de 20 Hz são atenuadas, conforme apresentado na figura 5.8.

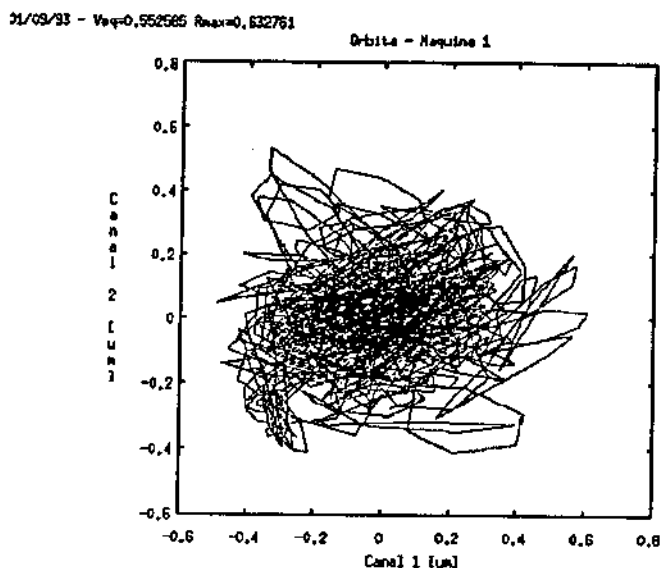


Figura 5.7: Cesp: Órbita 40 MW

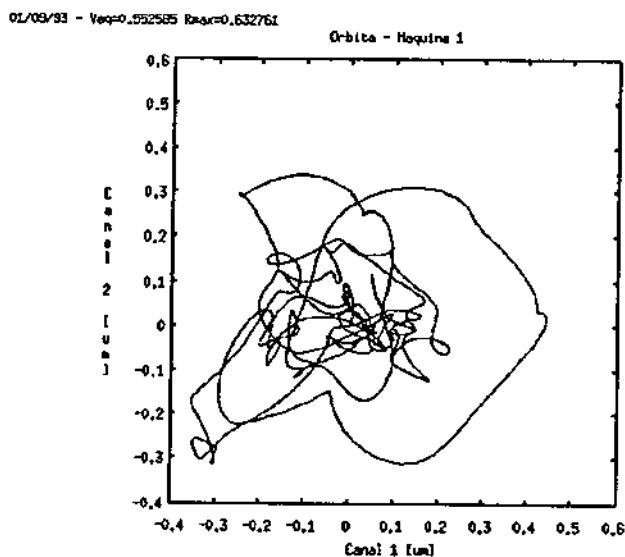


Figura 5.8: Cesp: Órbita 40 MW - Com filtro em 20 Hz

O valor do V_{eq} pode ser visualizado, em função da potência na figura 5.9. Note que o valor de máximo corresponde a menor potência e que após 60 MW este valor é muito baixo, devido a baixa instabilidade hidráulica.

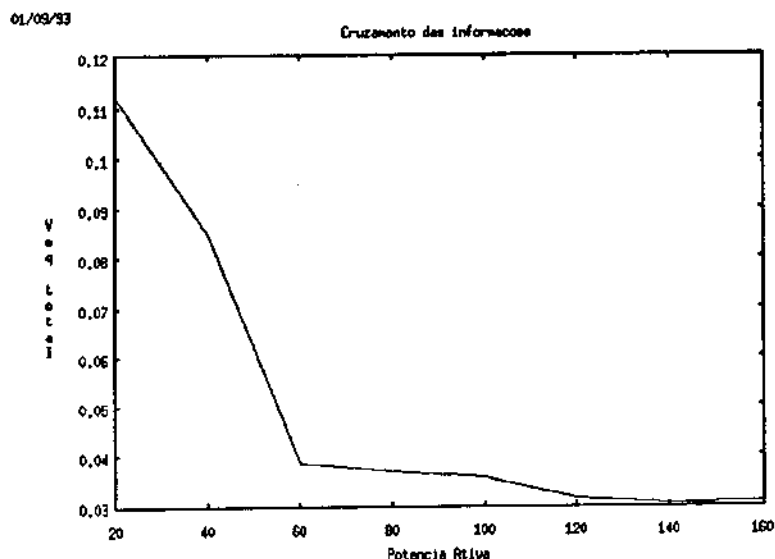


Figura 5.9: Cesp: Potência $\times$ V_{eq}

O comportamento do raio máximo e do valor RMS são bem semelhantes, conforme a figura 5.10, a linha contínua corresponde ao valor RMS e a linha pontilhada ao raio máximo.

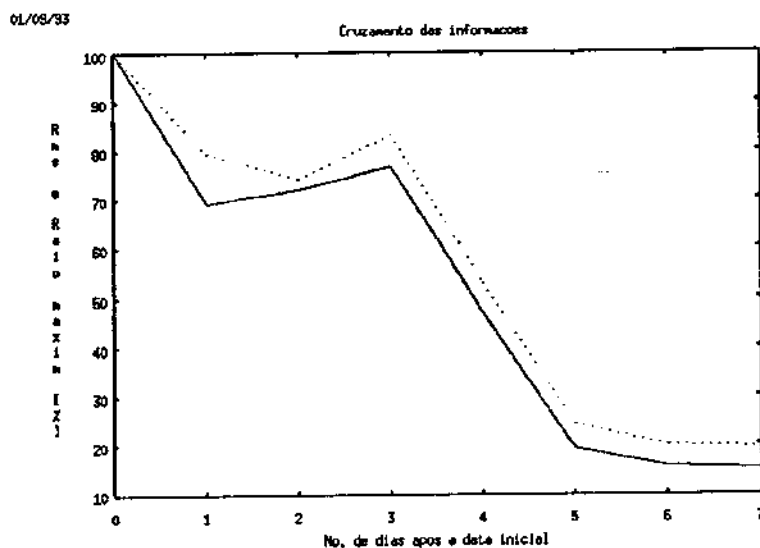


Figura 5.10: Cesp: Cruzamento RMS $\times$ Raio Máximo (em %)

Na figura 5.11 podemos observar que o valor da máxima amplitude corresponde exatamente à amplitude na velocidade de rotação. Indicando que esta é vibração predominante da máquina.

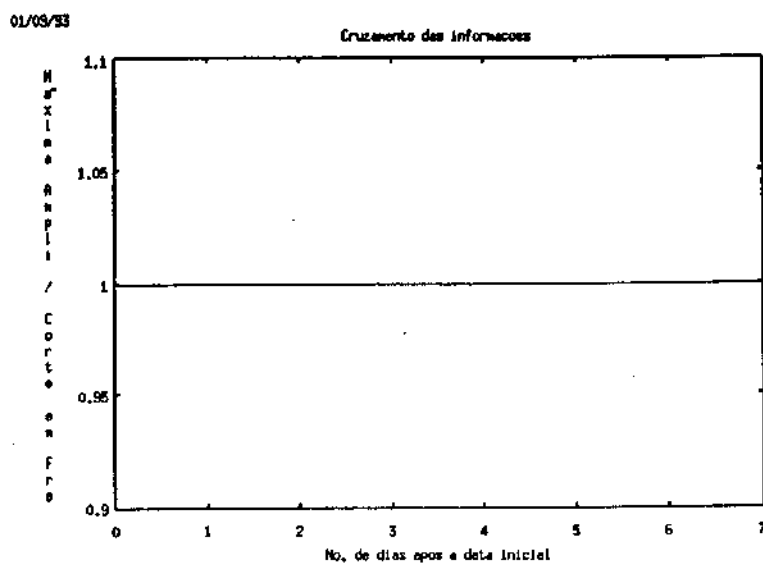


Figura 5.11: Cesp: Cruzamento Máxima Amplitude $\times$ Amplitude em 1.37 Hz

5.5 Comentários

O objetivo das figuras apresentadas foi o de ilustrar o funcionamento do ciclo medição-análise utilizando dados reais. Muitas informações sobre o comportamento dinâmico da máquina, já foram conseguidas ao longo do tempo, com a experiência adquirida com as modelagens e medições experimentais.

Estas informações ainda não foram compiladas, de uma maneira objetiva e prática, correndo o perigo de toda esta experiência se perder. Para o armazenamento destas informações poderia se projetar um sistema especialista, que poderia responder as questões de uma maneira automatizada.

A falta de literatura em máquinas hidroelétricas, de baixa velocidade de rotação, em parte foi suprida pela realização de diversos estudos, provenientes dos convênios Cesp-Unicamp. Entretanto, o esgotamento deste assunto está longe de ser alcançado.

Capítulo 6

Conclusões

O presente trabalho apresenta uma metodologia para a utilização do monitoramento de uma forma mais eficiente. Somente o monitoramento pode não fornecer todos os subsídios ao engenheiro de manutenção. Com a utilização de modelos matemáticos consegue-se obter o melhor rendimento possível do sistema de monitoramento.

As várias metodologias de manutenção existentes foram apresentadas no capítulo 1, abordando especificamente o monitoramento de máquinas. Atualmente esta é uma das metodologias mais utilizada, que pode ser notado pelo grande número de *softwares* de monitoramento existentes no mercado. É feita uma análise crítica dos diversos programas, tentando compilar todas as suas características, para balizar o projeto do programa de monitoramento proposto. A metodologia da aplicação do monitoramento também é descrita neste capítulo, que indica a linha geral deste trabalho.

Dos *softwares* existentes no mercado obtêm-se as técnicas de análise mais utilizadas, que são analisadas no capítulo 2. Com o auxílio da bibliografia, além da descrição de cada uma das técnicas são feitas várias considerações, referentes a utilização e eficácia destas técnicas em condições de campo.

Neste capítulo, uma nova ferramenta é proposta, o mapa de espectros. Com esta técnica é possível salientar alguns fenômenos, tais como aparecimento de novas componentes de frequência e a determinação de frequências naturais. Pode-se também, visualizar o aumento do nível geral de vibração diretamente, somente observando a escala de cores.

O *software* de monitoramento proposto é apresentado no capítulo 3, que inicia com a definição do fluxo das informações. Após o diagrama de funcionamento dos diversos módulos, é descrito o funcionamento do programa, que foi implementado em computadores tipo IBM-PC (DOS) e em estações de trabalho (Unix). A versão unix é apresentada, com uma descrição dos campos de cada uma das janelas que compõem o programa.

No capítulo 4 é apresentado, a título de exemplo, um modelo matemático para uma bancada de testes, pertencente ao Departamento de Projeto Mecânico. Com este modelo são executadas algumas simulações, que fornecem dados para o sistema de monitoramento. Alguns resultados são apresentados, exemplificando a utilização das diversas técnicas implementadas no *software*

proposto.

O sistema de monitoramento em implantação pela Companhia Energética de São Paulo (Cesp) é apresentado no capítulo 5. Após um breve histórico dos convênios entre a Cesp e a Unicamp é feita uma descrição geral deste sistema, e a inserção do programa de monitoramento proposto neste contexto, que é apresentado em forma de diagrama. Uma grande parte dos convênios eram de modelagem matemática e medições experimentais, indicando uma preocupação da Cesp na perfeita utilização do monitoramento.

Com a utilização do *software* de monitoramento é possível organizar os dados coletados nos equipamentos de uma maneira lógica e de simples recuperação. Do banco de dados formado por estas medições é possível a implementação de novas técnicas, como por exemplo o diagnóstico.

Num futuro próximo as técnicas de monitoramento irão se fundir com os conceitos de inteligência artificial para construir sistemas inteligentes, que monitoram e diagnosticam a máquina quase sem interferência humana. Dentre as técnicas de inteligência artificial, as redes neurais, lógica nebulosa (*fuzzy*) e sistemas especialistas se sobressaem, pois são de simples implementação.

Somente o uso de inteligência artificial pode a solução ótima. A melhoria e a construção de novos modelos matemáticos deve ser estimulada, pois estes modelos possibilitam a perfeita compreensão do comportamento do equipamento monitorado. Deste conhecimento pode-se projetar melhor a fusão destas técnicas e obter uma solução mais próxima da ótima.

Bibliografia

- [AIP86] J. R. F. Arruda, F. Iguti, e R. Pavanello. *Vibration severity limits for hydraulic turbines*. Em *International Conference on Condition Monitoring*, Brighton, England, Maio 1986.
- [Ata92] Mauro Jorge Atalla. *Determinação de Amortecimento Ótimo em Sistemas Mecânicos Rotativos*. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas/SP, 1992.
- [AW⁺84] J. R. F. Arruda, H. I. Weber, et al. *Condition monitoring and mathematical modeling of francis turbine-generator sets*. Em *Proceedings of the third International Seminar on Hydroelectric Machinery of the University of Wien*, páginas 118–135, Wien, Austria, 1984.
- [BG89] Sidney J. Bragg e A. Leonard Graves. *Conditioning monitoring at the bath pumped storage station*. Em *Proceedings of the First International Machinery Monitoring & Diagnostics Conference & Exhibit*, páginas 210–214, Las Vegas, Nevada, USA, Setembro 1989. Union College.
- [Bk] Brüel & Kjær. Predictive Maintenance of Pulp and Paper Machinery. *Application Paper BG 0104-11*.
- [Bra87] J.G.T. Brandão. *Vibrações em Turbinas Francis com Ênfase em Vórtice de Núcleo*. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas/SP, 1987.
- [Bra89] Gary H. Brawley. *Diagnostic health condition performance monitoring – does this make sense?* Em *Proceedings of the First International Machinery Monitoring & Diagnostics Conference & Exhibit*, páginas 215–221, Las Vegas, Nevada, USA, Setembro 1989. Union College.
- [BW76] Kalus-Jürgen Bathe e Edward L. Wilson. *Numerical Methods in Finite Element Analysis*, páginas 322–325. Prentice-Hall Inc., New jersey, 1976.
- [Car92] Rodmar Cardinali. *Modelagem e Aplicações em Diagnose de Máquinas Rotativas Verticais*. Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas/SP, 1992.

- [Col77a] R. A. Collacott. *Mechanical Fault Diagnosis*. Chapman and Hall, London, 1977.
- [Col77b] R. A. Collacott. *Vibration Monitoring and Diagnosis*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1977.
- [Eri84] U. Ericsson. Vibration monitoring – the state of the art – with cases studies. Technical report, VDI Berichte, 1984.
- [FP84] B. Friedlander e B. Porat. The modified yule-walker method of arma spectral estimation. *IEEE Transactions on Aerospace Electronic System*, AES-20(No. 2):158–173, Março 1984.
- [Iso2372] ISO2372 – Mechanical Vibration of Machines with Operating Speeds from 10 to 200 rev/s – Basis for Evaluation Standards.
- [Iso3945] ISO3945 – Mechanical Vibration of Machines with Operating Speeds from 10 to 200 rev/s – Measurement and Evaluation of the Vibration Severity.
- [JKB89] G. T. Haramis Jr., W. E. Karberg, e R. E. Berris. *Ultrasonic on-line bearing condition monitoring technology*. Em *Proceedings of the First International Machinery Monitoring & Diagnostics Conference & Exhibit*, páginas 127–133, Las Vegas, Nevada, USA, Setembro 1989. Union College.
- [Nas87] L.P. Nascimento. *Estudos das Forças Excitadoras e da Modelagem Matemática de Máquinas Hidroelétricas*. Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas/SP, 1987.
- [Nel79] H.D. Nelson. Finite rotating shaft element using timoshenko beam theory. *ASME Journal of Mechanical Design*, 1979.
- [Noi90] Machinery condition monitoring – vibration diagnostic techniques: Part 1. *Noise & Vibration Worldwide*, 21(No. 5):4–8, Maio 1990.
- [OS75] Alan V. Oppenheim e Ronald W. Schaffer. *Digital Signal Processing*. Prentice/Hall International, Inc., London, 1975.
- [SJBH85] Henrik V. Sorensen, Douglas L. Jones, Sidney Burrus, e Michael T. Heideman. On computing the discrete hartley transform. *IEEE Transactions on Acoustic, Speech and Signal Processing*, ASSP-33(No. 4):1231–1238, 1985.
- [Tra89] Jason Tranter. *The fundamentals of, and the application of computers to, condition monitoring and predictive maintenance*. Em *Proceedings of the First International Machinery Monitoring & Diagnostics Conference & Exhibit*, páginas 394–401, Las Vegas, Nevada, USA, Setembro 1989. Union College.
- [Vdi2056] VDI2056 – Evaluation Standards for Mechanical Vibrations, 1964.

[W⁺86] H. I. Weber et al. *Flexural vibrations of francis turbines in partial load operations*. Em *IAHR Symposium*, Montreal, 1986.

Apêndice A

Descrição dos Arquivos e Fluxograma

O formato dos arquivos é apresentado, após uma breve descrição de seu conteúdo. Inicialmente são descritos os arquivos de dados e posteriormente os arquivos de configuração.

O fluxograma é apresentado no final deste apêndice.

A.1 Arquivo de dados

O arquivo que armazena os dados de análise em disco rígido tem o mesmo formato dos dados armazenados em disquete, somente que é composto de vários destes dados em seqüência. Este formato é apresentado a seguir, como uma struct da linguagem C. A estrutura principal é composta de três estruturas básicas, os valores de máximo e mínimo dos dados de vibração, os dados auxiliares e os valores de vibração:

```
typedef struct {                                /* Estrutura de dados armazenados */

    struct {                                    /* Maximos e minimos */
        float  MaxY[NCanaisEsp];
        float  MinY[NCanaisEsp];
        float  MaxOrbX;
        float  MinOrbX;
        float  MaxOrbY;
        float  MinOrbY;
    } Maximos;

    struct {                                    /* Dados auxiliares */
        float  Jusante;
        float  Montante;
        float  Vazao;
        float  PotAtiva;
```

```

float   PotReativa;
float   Veq;
float   FreqAnaliseEsp;
float   FreqAnaliseOrb;
float   TemperaturaMancal;
int     NumMaquina;
int     DBVersion;
data_t  Data;
hora_t  Horario;
char    OpInfo[5][80];
char    OpName[50];
char    PlantName[50];
float   FatorConvEsp[NCanaisEsp];
float   FatorConvOrb[NCanaisOrb];
int     TipoSensorEsp[NCanaisEsp];
int     TipoSensorOrb[NCanaisOrb];
float   Expansion[20]; /* Para futuras expansoes */
} Dados;

struct {
    /* Valores de vibra\c{c}\~{a}o */
    float EspectroReal[NCanaisEsp][LenBuffEsp];
    float EspectroImag[NCanaisEsp][LenBuffEsp];
    float Orbita[NCanaisOrb][LenBuffOrb];
} Sinais;
} signal_t;

```

Para o acesso rápido destes dados em disco rígido é utilizado um arquivo de índice, que contém as posição das diversas datas armazenadas no arquivo de dados principal. Este arquivo de índice é formado por um cabeçalho:

```

typedef struct {

    data_t  di; /* primeira data */
    data_t  df; /* ultima data */
    int     dt; /* intervalo minimo entre datas */
    int     mq; /* numero da maquina */
    int     nd; /* numero de dias realmente gravados */

} index_header_t;

```

E por campos, que indexam as diversas datas armazenadas, com a seguinte estrutura:

```

typedef struct {

    data_t  d; /* data armazenada */
    long int dgreg; /* numero de dias no calendario gregoriano */
}

```

```

int      dif;      /* numero de dias desta data com a anterior */

} index_t;

```

A.2 Arquivos de Configuração

O programa utiliza dois tipos arquivos de configuração, um para o Veq e outro para as máscaras de espectro.

A.2.1 Configuração do Veq

A configuração do Veq é feita, para todas as máquinas, a partir de um único arquivo. Este arquivo contém a configuração do Veq, com o seguinte formato, para cada máquina:

```

% <Maquina> <sensor no.> <no. de bandas> <massa_total_girante>
<freq. natural banda 1> <f.inicial> <f.final> <desloc.nodal> <peso p/media>
<freq. natural banda 2> <f.inicial> <f.final> <desloc.nodal> <peso p/media>

```

As linhas que iniciam com o símbolo # são assumidas como linhas de comentários. A seguir podemos ver um exemplo de configuração de Veq, que deve ser armazenado com o nome de `veqconf.dat`. Como exemplo configura-se a máquina 1 de 150 toneladas, utilizando os dados do sensor 2 e três bandas de análise:

F_n	Faixa	Desloc. nodal	Peso
4 Hz	2.5 → 6 Hz	0.877	1
12.5 Hz	11 → 14 Hz	0.113	1
27.5 Hz	23 → 32 Hz	1.000	1

```

#
# Configuracao do Veq
#

# Maquina 1, Sensor 2, 3 Bandas
% 1 2 3 150e3
4. 3 7 0.877 1
12.5 10 15 0.113 1
27.5 22 31 1.000 1

```

A.2.2 Configuração das Máscaras

Cada máquina tem o seu arquivo de configuração, o arquivo `mask.n` onde `n` é o número da máquina.

A máscara é entrada em forma de um par de colunas, onde é especificado a frequência e a amplitude da máscara. A amplitude é utilizada na frequência especificada e nos pontos

posteriores até uma nova especificação. Os canais são diferenciados pela marcação : channel onde channel é o canal que se está definindo. Quando da definição dos canais pode-se utilizar o formato = channel onde channel especifica o canal origem, que irá fornecer os valores para o canal em definição. Abaixo podemos encontrar um exemplo deste arquivo de configuração:

```
# Canal 1
:1
# Freq      Amp
0           1
10          2
20          1
40          0.5
70          1
# Canal 2
:2
=1
# Canal 3
:3
0           2
10          1
40          0.4
50          2
60          1
80          1.5
# Canal 4
:4
= 3
```

A.3 Fluxograma

É apresentado aqui o fluxograma do programa, gerado pelo programa cflow a partir do módulo de gráficos. Quase todas as funções estão mapeadas aqui. O formato desta lista é a seguinte:

nnn: function: <filename line>

onde nnn é o número da linha do fluxograma, function é o nome da função e <filename line> é o nome do arquivo e o número da linha onde se encontra a definição desta função. Os níveis mais internos (a direita) correspondem a uma chamada de função, funções no mesmo nível são chamadas na mesma função origem. A lista pode ter, ainda, o seguinte formato:

nnn: function: line

onde line corresponde linha do fluxograma onde aparece pela primeira vez a lista de chamadas da função function.

```
1      main: void*(), <grafico.c 174>
2          setbuf: <>
3          mon_message: void*(), <monitor.c 58>
4              fopen: <>
5              fprintf: <>
6              perror: <>
7              exit: <>
8              setbuf: 2
9              fclose: <>
10         gp_init: <>
11         gp_set: <>
12         fgets: <>
13         get_info: void*(), <grafico.c 269>
14             sscanf: <>
15         Espectro: void*(), <grafico.c 344>
16             ReadSignalDay: char(), <bdados.c 472>
17                 sprintf: <>
18                 fopen: 4
19                 InfoBox: char(), <grafico.c 304>
20                     sprintf: 17
21                     mon_message: 3
22                 ReadIndex: char(), <bdados.c 349>
23                     sprintf: 17
24                     fopen: 4
25                     InfoBox: 19
26                     fread: <>
27                     fclose: 9
28                     free: <>
29                     calloc: <>
30                 fclose: 9
31                 FindDate: char(), <bdados.c 414>
32                     WofGreg: long(), <date.c 82>
33                     fseek: <>
34                 ReadSignal: char(), <bdados.c 441>
35                     fread: 26
36                     InfoBox: 19
37                 CalcVeq: void*(), <misc.c 215>
38                     ReadVeqData: int(), <misc.c 155>
39                         fopen: 4
40                         InfoBox: 19
41                         fgets: 12
42                         sscanf: 14
43                         sprintf: 17
44                         fclose: 9
45                 floor: <>
46                 ceil: <>
47                 sqrt: <>
```

```
48         AllocVector: double*(), <misc.c 53>
49             calloc: 29
50             printf: <>
51             exit: 7
52     PowerSpectrum: void*(), <misc.c 101>
53         sqrt: 47
54     sprintf: 17
55     ReadAlarm: char(), <alarm.c 201>
56         FreeMask: void*(), <alarm.c 113>
57             FreeMaskList: void*(), <alarm.c 100>
58                 free: 28
59             sprintf: 17
60             fopen: 4
61             fread: 26
62             fclose: 9
63         ReadMask: char(), <alarm.c 130>
64             sprintf: 17
65             fopen: 4
66             fgets: 12
67             atoi: <>
68             fprintf: 5
69             AllocMaskNode: struct*(), <alarm.c 26>
70                 calloc: 29
71                 printf: 50
72                 exit: 7
73             sscanff: 14
74             AddMaskNode: void*(), <alarm.c 38>
75     MakeMask: void*(), <alarm.c 256>
76     gp_plot: <>
77     free: 28
78     SinalTempo: void*(), <grafico.c 432>
79         ReadSignalDay: 16
80         CalcVeq: 37
81         AllocVector: 48
82         FilterSignal: void*(), <misc.c 396>
83             AllocVector: 48
84             free: 28
85         sprintf: 17
86         gp_plot: 76
87         free: 28
88     Orbita: void*(), <grafico.c 504>
89         ReadSignalDay: 16
90         CalcVeq: 37
91         sprintf: 17
92         AllocVector: 48
93         FilterSignal: 82
94         gp_plot: 76
```

```

95         free: 28
96     Cascata: void*(), <grafico.c 564>
97         ReadInfo: char(), <bdados.c 323>
98             sprintf: 17
99             fopen: 4
100             InfoBox: 19
101             fread: 26
102             fclose: 9
103         AllocVector: 48
104         AllocPointerVector: double**(), <misc.c 66>
105             calloc: 29
106             printf: 50
107             exit: 7
108         ReadDataValue: int(), <bdados.c 517>
109             sprintf: 17
110             fopen: 4
111             InfoBox: 19
112             ReadIndex: 22
113             fclose: 9
114             ReadVeqData: 38
115             NofGreg: 32
116             fseek: 33
117             ReadSignal: 34
118             sqrt: 47
119             log10: <>
120             CalcVeq: 37
121             CalcRMS: double(), <misc.c 112>
122                 sqrt: 47
123             CalcRmax: double(), <misc.c 129>
124             AllocVector: 48
125         free: 28
126         FreePointerVector: void*(), <misc.c 83>
127             free: 28
128         printf: 50
129         PlotWaterfall: void*(), <grafico.c 1039>
130             gp_initialize: <>
131             setgraphmode: <>
132             cleardevice: <>
133             gp_getdeviceinfo: <>
134             InitHide: void*(), <hide.c 45>
135                 getmaxx: <>
136                 calloc: 29
137                 fprintf: 5
138             moveto: <>
139             getx: <>
140             gety: <>
141             hide_line: void*(), <hide.c 112>

```

```

142         line: <>
143         hide_update: void*(), <hide.c 86>
144         CloseHide: void*(), <hide.c 141>
145         free: 28
146         settextjustify: <>
147         sprintf: 17
148         outtextxy: <>
149         line: 142
150         ceil: 46
151         AssignDate: void*(), <date.c 160>
152         memcpy: <>
153         IncData: void*(), <date.c 109>
154         NofMonth: int(), <date.c 65>
155         strdate: char*(), <date.c 46>
156         sprintf: 17
157         xbgf_flush: <>
158         xbgf_readch: <>
159         restorecrtmode: <>
160     DataGraphics: void*(), <grafico.c 977>
161         ReadInfo: 97
162         AllocVector: 48
163         ReadDataValue: 108
164         free: 28
165         sprintf: 17
166         gp_plot: 76
167     Mapa: void*(), <grafico.c 628>
168         ReadInfo: 97
169         AllocVector: 48
170         AllocPointerVector: 104
171         ReadDataValue: 108
172         free: 28
173         FreePointerVector: 126
174         printf: 50
175         PlotMap: void*(), <grafico.c 1199>
176             gp_initialize: 130
177             setgraphmode: 131
178             cleardevice: 132
179             gp_getdeviceinfo: 133
180             getmaxcolor: <>
181             fabs: <>
182             make_tics: <>
183             floor: 45
184             ceil: 46
185             setcolor: <>
186             settextstyle: <>
187             draw_map_xtics: void*(), <grafico.c 1396>
188                 settextjustify: 146

```

```
189         floor: 45
190         ceil: 46
191         fabs: 181
192         setlinestyle: <>
193         line: 142
194         pow: <>
195         sprintf: 17
196         outtextxy: 148
197     setlinestyle: 192
198     rectangle: <>
199     setviewport: <>
200     log10: 119
201     putpixel: <>
202     line: 142
203     arc: <>
204     settextjustify: 146
205     sprintf: 17
206     outtextxy: 148
207     AssignDate: 151
208     IncData: 153
209     strdate: 155
210     pow: 194
211     setfillstyle: <>
212     bar: <>
213     setbkcolor: <>
214     xbgi_flush: 157
215     xbgi_readch: 158
216     restorecrtmode: 159
217 DrawCrossInfo: void*(), <grafico.c 826>
218     ReadInfo: 97
219     AllocVector: 48
220     ReadDataValue: 108
221     free: 28
222     sprintf: 17
223     gp_plot: 76
224     fabs: 181
225 DrawMask: void*(), <grafico.c 947>
226     ReadAlarm: 55
227     AllocVector: 48
228     MakeMask: 75
229     sprintf: 17
230     gp_plot: 76
231     free: 28
232 atoi: 67
233 gp_exit: <>
234 exit: 7
235 strstr: <>
```

```
236 InitData: void*(), <grafico.c 329>
237     getdate: void*(), <date.c 210>
238     time: <>
239     localtime: <>
240     NofMonth: 154
241 CopySignals: char(), <bdados.c 212>
242     sprintf: 17
243     fopen: 4
244     InfoBox: 19
245     fclose: 9
246     AssignDate: 151
247     fwrite: <>
248     MakeFileName: void*(), <bdados.c 148>
249         sprintf: 17
250     ExistFile: char(), <bdados.c 169>
251         fopen: 4
252         fclose: 9
253     ReadSignal: 34
254     NofDays: int(), <date.c 101>
255         NofGreg: 32
256     WriteSignal: char(), <bdados.c 459>
257         fwrite: 247
258         InfoBox: 19
259     NofGreg: 32
260     IncData: 153
261     PutDiskIntoDrive: char(), <bdados.c 182>
262         MakeFileName: 248
263         sprintf: 17
264         InfoBox: 19
265     rewind: <>
266 BdadosExit: void*(), <bdados.c 399>
267     free: 28
268 ExportTimeSignal: void*(), <bdados.c 705>
269     ReadSignalDay: 16
270     sprintf: 17
271     fopen: 4
272     fprintf: 5
273     fclose: 9
274 ExportFreqSignal: void*(), <bdados.c 736>
275     ReadSignalDay: 16
276     sprintf: 17
277     fopen: 4
278     sqrt: 47
279     fprintf: 5
280     fclose: 9
281 ExportData: void*(), <bdados.c 768>
282     ReadInfo: 97
```

```
283         AllocVector: 48
284         ReadDataValue: 108
285         free: 28
286         sprintf: 17
287         fopen: 4
288         fprintf: 5
289         fclose: 9
290     init_graphic: void*(), <monitor.c 29>
291         popen: <>
292         fprintf: 5
293         perror: 6
294         exit: 7
295         setbuf: 2
296     exit_graphic: void*(), <monitor.c 39>
297         pclose: <>
298     send_command: void*(), <monitor.c 47>
299         fprintf: 5
300     send_ok: void*(), <monitor.c 52>
301         fprintf: 5
302     mon_read: char*(), <monitor.c 73>
303         fopen: 4
304         fprintf: 5
305         perror: 6
306         exit: 7
307         setbuf: 2
308         time: 238
309         rewind: 265
310         fgets: 12
311         strlen: <>
312         strcpy: <>
313         fclose: 9
314     mon_wait: char(), <monitor.c 102>
315         fopen: 4
316         fprintf: 5
317         perror: 6
318         exit: 7
319         setbuf: 2
320         time: 238
321         rewind: 265
322         fgets: 12
323         strlen: 311
324         strcmp: <>
325         fclose: 9
326     mon_status: char*(), <monitor.c 127>
327         fopen: 4
328         fprintf: 5
329         perror: 6
```

```
330         exit: 7
331         setbuf: 2
332         fgets: 12
333         strlen: 311
334         fclose: 9
335     mon_error: char(), <monitor.c 148>
336         fopen: 4
337         fprintf: 5
338         perror: 6
339         exit: 7
340         setbuf: 2
341         time: 238
342         rewind: 265
343         fgets: 12
344         strlen: 311
345         strcpy: 312
346         strstr: 235
347         fclose: 9
348     strhora: char*(), <date.c 55>
349         sprintf: 17
350     DayOfWeek: int(), <date.c 146>
351         NofGreg: 32
352     StrDayOfWeek: char*(), <date.c 153>
353         NofGreg: 32
354     SameDate: char(), <date.c 166>
355     DateBetween2: char(), <date.c 180>
356         NofDays: 254
357     DateBetween1: char(), <date.c 192>
358         NofDays: 254
359     hide_plot: void*(), <hide.c 66>
360         outtextxy: 148
361         setcolor: 185
362         moveto: 138
363         getmaxx: 135
364         lineto: <>
365         xbgf_readch: 158
366         xbgf_flush: 157
367     MaskLenght: int(), <alarm.c 50>
368     PrintMask: void*(), <alarm.c 64>
369         fprintf: 5
370     PrintMaskList: void*(), <alarm.c 80>
371         fprintf: 5
372     WriteAlarm: char(), <alarm.c 230>
373         sprintf: 17
374         fopen: 4
375         fwrite: 247
376         fclose: 9
```