

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
MESTRADO PROFISSIONALIZANTE EM ENGENHARIA**

**MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE E ANÁLISE DE VIBRAÇÃO**

**Julinho Alberto Benedetti**

**Porto Alegre, Junho de 2002.**

**Este Trabalho de conclusão foi analisado e julgado adequado para obtenção do título de mestre em ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo orientador e pelo coordenador do Mestrado Profissionalizante em Engenharia, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.**

---

**Prof. Alberto Tamagna, Dr.**

Orientador  
Escola Engenharia  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

---

**Prof. Vilson João Batista, Dr. Eng.**

Coordenador  
Mestrado Profissionalizante em Engenharia  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Vilson João Batista, Dr. Eng.**

DEMEC/EE/UFRGS

**Prof. Ignácio Inturrioz, Dr. Eng.**

DEMEC/EE/UFRGS

**Prof. Joyson Luiz Pacheco, Dr. Eng.**

Faculdade de Engenharia da PUCRS

**Prof. Ignácio Benvegnu Morsch, Dr.**

DEMEC/EE/UFRGS

## DEDICATÓRIA

*“ Não há ventos favoráveis para aqueles que não sabem para onde ir.”*

**Sêneca**

*“Nada é particularmente difícil se for dividido em pequenas tarefas.”*

**Henry Ford**

Ofereço este trabalho à sociedade educacional  
e à indústria.

## **AGRADECIMENTOS**

À empresa John Deere Brasil pelo investimento e desafio proposto em trazer o mestrado, compartilhando com o investimento e estrutura logística.

Agradeço ao Prof. Alberto Tamagna, pela orientação, dedicação, participação e no desenvolvimento deste trabalho, possibilitando a sua conclusão.

Aos Prof. Wilson João Batista, Ignácio Inturrioz, Joyson Luiz Pacheco e Ignácio Benvegna Morsch, pela contribuição realizada ao examinarem este trabalho, discutindo e propondo as melhorias.

Ao gerente Lory Antônio Izolan da John Deere Brasil pelo apoio ao tema e abertura para que o trabalho fosse realizado.

Aos colegas de mestrado que passamos muitas horas discutindo diversos assuntos, realizados durante as aulas, que juntos podemos contribuir com temas do dia-a-dia, idealizados em grupo.

Aos colegas de trabalho que várias vezes durante os fins de semana e feriados puderam contribuir nas medições. Os facilitadores e mantenedores que hoje podem usar este trabalho na continuidade do processo, muito obrigado.

Aos supervisores de produção, pelo apoio logístico e liberação no entendimento geral sobre o tema.

À minha esposa Prof. Vera Lúcia pelo apoio e força durante todo o período de realização e conclusão deste trabalho. Obrigada pela compreensão de tantas horas dedicadas ao desenvolvimento do mesmo. Aos nossos filhos Gustavo e Gabriel que muito nos orgulham, e que vieram nos alegrar neste período.

Agradeço a todos que contribuíram de alguma forma ou de outra para a realização deste trabalho.

## RESUMO

As empresas, cada vez mais, buscam a redução de custo, para serem mais competitivas. A necessidade de aumentar a vida útil dos equipamentos, através de técnicas apropriadas é prioritário para manutenção dos ativos.

Neste trabalho estudou-se o método para implantação da análise e monitoramento da vibração em equipamentos rotativos, com base nos conceitos da manutenção centrada em confiabilidade, usando técnicas preditiva e pró-ativa de manutenção pela condição, com foco na tarefa. Primeiramente foi analisado o comportamento dos componentes em relação ao processo de falha, como as falhas atuam, os tipos de modos de falha, falhas funcionais e seus efeitos. Após foram analisados e selecionados os critérios de níveis de vibração para os equipamentos rotativos em função da potência e rotação. Também, foi determinado em que condições os espectros seriam analisados em função da amplitude e frequência de rotação. Então, foram preparados os locais para coletas dos dados de vibração. Assim, os níveis de vibração global foram coletados em função das amplitudes, em cada posição específica do equipamento em seu plano. Isto faz com que, análise dos níveis globais de vibração e o diagnóstico através do espectro e a forma de onda, permitissem encontrar a causa do problema. Finalmente, são apresentados os resultados em níveis de amplitude, espectro após ações, a correção da causa do problema e os tipos de defeitos de tendência de falhas e a implementação do método.

## **ABSTRACT**

The companies more and more are looking for the cost reduction to be more competitive. The necessity of increasing the useful life of the equipment through appropriate techniques is priority for maintenance of the assets.

In this work it was studied the method implantation of the vibration monitoring and analysis in rotating equipment on the basis of the concepts the reliability centred maintenance using techniques predictive and proactive maintenance for the condition, with focus in the task. First the behaviour of the components was analysed in relation to the failure process, as the failure they act, the types of failure modes, functional failure and its effect. After they were analysed and selected the criteria of vibration levels for rotative equipments due to of the power and rotation. Also, it were certain in that conditions the spectral vibration data would be analysed in function of the amplitude and rotation frequency. Then, the local was prepared for collections of vibration data. Thus, the overall vibration levels had been collected in function of amplitude in each specific point of the equipment and it planes. This makes it the vibration levels analyses and the diagnosis through the spectral vibration and waveform allowed to find out the cause of the problem. Finally, the results were presented in amplitude levels, spectral vibration after actions, the correction of the cause problem and the types of trend of failure defects and the implementation of the method.

# ÍNDICE

<b>RESUMO .....</b>	<b>V</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>VI</b>
<b>ÍNDICE .....</b>	<b>VII</b>
<b>LISTA DE SIGLAS.....</b>	<b>X</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>XII</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS .....</b>	<b>XIV</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 INFORMAÇÕES HISTÓRICAS DA MANUTENÇÃO. ....	1
1.2 FERRAMENTA DA CONFIABILIDADE .....	2
1.3 JUSTIFICATIVA DO TEMA E DEMANDA.....	3
1.4 OBJETO DE ESTUDO.....	4
<b>2. MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE (RCM) .....</b>	<b>5</b>
2.1 HISTÓRICO DO RCM. ....	5
2.2 FILOSOFIA E ANÁLISE.....	6
2.3 FALHA .....	8
2.3.1 <i>Função e Funcionalidade da Falha.</i> .....	8
2.3.2 <i>Modos de Falha.</i> .....	9
2.3.3 <i>Confiabilidade.</i> .....	9
2.3.4 <i>Modelos de Falhas</i> .....	10
2.4 MODOS DE FALHAS ANÁLISES E EFEITOS.....	11
2.4.1 <i>Causas das Falhas</i> .....	12
2.5 COMPONENTES DO RCM. ....	12
2.5.1 <i>Manutenção Corretiva</i> .....	13
2.5.2 <i>Manutenção Preventiva.</i> .....	13
2.5.3 <i>Manutenção Preditiva</i> .....	14
2.5.4 <i>Manutenção Pró-Ativa</i> .....	15

<b>3.TECNOLOGIA PREDITIVA.....</b>	<b>17</b>
3.1 ANÁLISE E MONITORAMENTO DA VIBRAÇÃO.....	17
3.2 APLICAÇÃO E TÉCNICAS.....	18
3.2.1 <i>Condições Monitoradas</i> .....	18
3.2.2 <i>Intervalo de Detecção</i> .....	18
3.2.3 <i>Vibração Global</i> .....	19
3.2.4 <i>Equipamento de Medição</i> .....	19
3.2.5 <i>Análise do Espectro</i> .....	21
3.3 FONTES DE VIBRAÇÃO EM MÁQUINAS ROTATIVAS .....	23
3.4 AS FORÇAS QUE ATUAM EM MÁQUINAS ROTATIVAS .....	23
3.4.1 <i>Rotores e Acoplamentos</i> .....	24
3.4.2 <i>Mancais e seus Elementos</i> .....	25
3.4.3 <i>Mancais Planos</i> .....	26
3.5 DESBALANCEAMENTO E DESALINHAMENTO .....	26
<b>4. MONITORAMENTO DA VIBRAÇÃO .....</b>	<b>30</b>
4.1 CRITÉRIOS DA VIBRAÇÃO MEDIÇÃO EM NÍVEL GLOBAL.....	30
4.2 CRITÉRIOS DE VIBRAÇÃO PARA MOTORES ELÉTRICOS.....	30
4.2.1 <i>Critérios de Balanceamento para Motores Elétricos</i> .....	32
4.2.2 <i>Critério de Vibração no Espectro</i> .....	32
4.2.3 <i>Vibração Máxima em Motores Elétricos em Função da Banda</i> .....	33
4.2.4 <i>Critérios no Espectro para Motores Elétricos</i> .....	34
4.3 ACIONAMENTO VENTILADOR POR CORREIAS.....	34
4.3.1 <i>Vibração Máxima Permitida em Função da Banda</i> .....	35
4.4 LOCAL DE MONITORAMENTO DA VIBRAÇÃO.....	37
4.5 TRANSDUTOR .....	38
4.6 MEDIDA DE VIBRAÇÃO NA DIREÇÃO DOS EIXOS .....	39
4.6.1 <i>Unidades de Medidas de Vibração</i> .....	39
4.7 LIMITES DAS BANDAS E AMPLITUDE GLOBAL.....	40
4.8 LISTA DE EQUAÇÕES .....	41
<b>5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>43</b>
5.1 ESTUDO DE CASO.....	43
5.2 TECNOLOGIA DE MANUTENÇÃO NO PROCESSO.....	44
5.3 MEDIDA DE VIBRAÇÃO.....	47

5.3.1 Medida com Acelerômetro.....	47
5.3.2 Função Janela.....	48
5.3.3 Registro do Nível Global de Vibração.....	49
5.3.4 Registro do Espectro.....	50
5.3.5 Analisador de Vibração.....	51
5.3.6 Listas dos Equipamentos em Análises.....	51
5.3.7 Croqui dos Ventiladores e Posição de Medida.....	52
5.3.8 Planilha de Monitoramento.....	54
5.3.9 Apresentação da Análise do Espectro.....	54
5.4 FREQUÊNCIA QUE OCORRE DENTRO DA BANDA.....	55
<b>6. ANÁLISES DOS RESULTADOS.....</b>	<b>57</b>
6.1 NÍVEIS DE VIBRAÇÃO.....	58
6.1.1 Níveis de Vibração Amplitude Velocidade.....	58
6.1.2 Níveis de Vibração Amplitude Aceleração.....	59
6.1.3 Níveis de Vibração Amplitude Deslocamento.....	61
6.2 ANÁLISE DOS DEFEITOS ENCONTRADOS.....	62
6.3 BALANCEAMENTO NA PRÁTICA.....	68
6.3.1 Efeito do Desbalanceamento.....	70
6.4 RESULTADO DENTRO DO RCM.....	71
6.4.1 Curvas de Tendência de Falhas.....	72
6.5 RESULTADOS ENCONTRADOS.....	73
6.6 DEFINIÇÃO DA FREQUÊNCIA DE ANÁLISE.....	74
6.7 IMPLANTAÇÃO DO MÉTODO BASEADO NOS RESULTADOS.....	75
6.8 PRÁTICAS E LIÇÕES APRENDIDAS.....	76
<b>7. CONCLUSÕES.....</b>	<b>78</b>
7.1 RECOMENDAÇÕES NOS TRABALHOS FUTUROS.....	79
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>80</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>86</b>

## LISTA DE SIGLAS

AC - Sinal Analógico.

CA - Corrente Alternada.

CC - Corrente Contínua.

Db - Decibéis.

DC - Sinal Digital.

G's - Quanto da Aceleração da Gravidade.

HP- Horse Power.

Hz - Frequência em ciclos por segundo ou hertz

mV - Milivolt.

pH - Potencial de Íons .

OS - Ordem de Serviço.

A, B, C, D - Ponto de Medição.

API - *American Petroleum Institute.*

ASTM- *American Society for Testing and Materials.*

CBM - *Condition Based Maintenance.*

CPM - Ciclos Por Minuto.

H, V, A - Direção de Medição da Vibração, Horizontal, Vertical e Axial.

IEC - *International Electrical Commission*

JDB - John Deere Brasil.

I S O - *International Organization for Standardization.*

FFT - *Fast Fourier Transform*

PdM - Prevenção da Manutenção.

RCM - *Reliability Centred Maintenance*

RMS - *Root Mean Square*

RPM - Rotação por Minuto.

SAE - Society of Automotive Engineers.

TPM - *Total Productive Maintenance.*

TBM - *Time Based Maintenance.*

1X- Na frequência de rotação.

2X - Duas vezes a frequência de rotação.

3X - Três vezes a frequência de rotação.

NX - Várias vezes a frequência de rotação.

\$ - Cifrão da moeda em dolar.

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1 : PROCESSO DE ANÁLISE DE MANUTENÇÃO.....	7
FIGURA 2.2 : CONDIÇÃO DAS CURVAS DE FALHA. ....	11
FIGURA 2.3 : COMPONENTES DO PROGRAMA RCM.....	13
FIGURA 2.4 : COMPORTAMENTO DA FALHA. ....	15
FIGURA 2.5 : ESTRATÉGIA DE MANUTENÇÃO.....	16
FIGURA 3.1 : VALOR PICO, PICO - PICO, MÉDIA E RMS. ....	19
FIGURA 3.2 : FUNÇÃO DA PLACA AC/DC.....	20
FIGURA 3.3 : RESPOSTA DO SISTEMA DE MEDIÇÃO.....	21
FIGURA 3.4 : ESPECTRO MANCAIS MOTORES ELÉTRICOS ANTES DA AÇÃO. ....	22
FIGURA 3.5 : ESPECTRO NOS MANCAIS MOTOR ELÉTRICO APÓS AÇÃO.....	22
FIGURA 3.6 : ESPECTRO DE VIBRAÇÃO MOTOR DE INDUÇÃO. ....	24
FIGURA 3.7 : ESPECTRO FALHA DE LUBRIFICAÇÃO, ANTES DA AÇÃO. ....	25
FIGURA 3.8 : ESPECTRO DO MANCAL, APÓS A LUBRIFICAÇÃO. ....	26
FIGURA 3.9 : ESPECTRO DESBALANCEAMENTO. ....	28
FIGURA 3.10 : ESPECTRO DE DESALINHAMENTO PARALELO.....	29
FIGURA 4.1: LIMITES ACEITÁVEIS DE AMPLITUDE VELOCIDADE PARA VENTILADOR. ....	36
FIGURA 4.2 : LIMITES ACEITÁVEIS DE AMPLITUDE ACELERAÇÃO PARA VENTILADOR. ....	37
FIGURA 4.3 : DIREÇÃO DO FLUXO E SEQÜÊNCIA DAS POSIÇÕES.....	38
FIGURA 4.4 : MEDIDA DE VIBRAÇÃO NA DIREÇÃO DOS EIXOS.....	39
FIGURA 4.5 : FREQUÊNCIA DAS BANDAS.....	40
FIGURA 5.1 : ESQUEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.....	44
FIGURA 5.2 : FALHAS EM VENTILADORES.....	47
FIGURA 5.3 : FUNÇÃO JANELA. ....	49
FIGURA 5.4 : TIPOS DE VENTILADORES POR ACIONAMENTO E POSIÇÃO. ....	53
FIGURA 5.5 : ESPECTRO PONTO "A", POSIÇÃO VERTICAL "V " AMPLITUDE VELOCIDADE "v ". ....	54
FIGURA 5.6 : ESPECTRO PONTO "D", POSIÇÃO VERTICAL "V" AMPLITUDE VELOCIDADE "V".....	55
FIGURA 6.1 : (A) PREPARAÇÃO DO LOCAL E (B) PREPARAÇÃO PARA ACESSO.....	57
FIGURA 6.2 : (C) APOIO POSIÇÃO VERTICAL E (D) APOIO POSIÇÃO HORIZONTAL.....	58
FIGURA 6.3 : GRÁFICOS NÍVEIS DE VIBRAÇÃO AMPLITUDE VELOCIDADE. ....	59
FIGURA 6.4 : GRÁFICO NÍVEL DE VIBRAÇÃO AMPLITUDE ACELERAÇÃO.....	60

FIGURA 6.5 : GRÁFICO DE NÍVEIS DE VIBRAÇÃO AMPLITUDE DESLOCAMENTO. ....	61
FIGURA 6.6 : DESALINHAMENTO HORIZONTAL PARALELO PSCI 03, POSIÇÃO D. ....	63
FIGURA 6.7 : ESPECTRO DEFEITO ELÉTRICO MOTOR. ....	63
FIGURA 6.8 : ESPECTRO DESALINHAMENTO PARALELO. ....	64
FIGURA 6.9 : ESPECTRO DEFEITO EM MANCAL. ....	65
FIGURA 6.10 : DEFEITO PROVOCADO NOS ROLAMENTOS. ....	65
FIGURA 6.11 : DEFEITO PROVOCADO NOS MANCAIS PELO DESBALANCEAMENTO. ....	67
FIGURA 6.12 : SUBSTITUIÇÃO DO CONJUNTO VENTILADOR. ....	68
FIGURA 6.13 : BALANCEAMENTO NA PRÁTICA. ....	69
FIGURA 6.14 : ESPECTRO DE BALANCEAMENTO. ....	69
FIGURA 6.15 : ANÁLISES COMPONENTES MOTOR E VENTILADOR. ....	72
FIGURA 6.16 : CURVAS DE FALHAS DOS VENTILADORES. ....	73
FIGURA 6.17 : FREQUÊNCIA DE ANÁLISE. ....	75

## ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 3.1: TOLERÂNCIAS EM ALINHAMENTO. ....	29
TABELA 4.1: CLASSE ACEITÁVEL DE VIBRAÇÃO. ....	31
TABELA 4.2: SEVERIDADE DA VIBRAÇÃO ISO 3945 E ISO 10816-1.....	31
TABELA 4.3: CLASSIFICAÇÃO DAS MÁQUINAS.....	32
TABELA 4.4: LIMITES BALANCEAMENTO MOTORES. ....	32
TABELA 4.5: CRITÉRIO DE VIBRAÇÃO PARA MOTOR ELÉTRICO.....	33
TABELA 4.6: VIBRAÇÃO MÁXIMA PERMITIDA PARA MOTORES ELÉTRICOS. ....	34
TABELA 4.7: LIMITES DE VIBRAÇÃO VENTILADOR ACIONAMENTO POR CORREIAS. ....	35
TABELA 4.8: NÍVEIS MÁXIMOS DE VIBRAÇÃO PARA VENTILADORES EM FUNÇÃO DA BANDA. ....	36
TABELA 4.9: UNIDADES DE MEDIDA DE VIBRAÇÃO.....	39
TABELA 5.1: TECNOLOGIA NO PROCESSO. ....	45
TABELA 5.2: INDICADOR E <i>BENCHMARK</i> .....	46
TABELA 5.3: CONJUNTOS MOTORES E VENTILADORES. ....	52
TABELA 5.4: ANÁLISE DE VIBRAÇÃO.....	54
TABELA 5.5: ANÁLISE DAS BANDAS DA ZE01.....	56
TABELA 6.1: NÍVEIS GLOBAIS DE VIBRAÇÃO EM AMPLITUDE DE VELOCIDADE.....	62
TABELA 6.2: NÍVEIS GLOBAIS DE VIBRAÇÃO AMPLITUDE ACELERAÇÃO.....	64
TABELA 6.3: NÍVEL GLOBAL VIBRAÇÃO AMPLITUDE VELOCIDADE E ACELERAÇÃO ZE-01.....	66
TABELA 6.4: NÍVEIS GLOBAIS DE VIBRAÇÃO APÓS SUBSTITUIÇÃO DO CONJUNTO VENTILADOR.....	67
TABELA 6.5: BALANCEAMENTO NA PRÁTICA.....	70
TABELA 6.6: EFEITO DO DESBALANCEAMENTO.....	70

# 1. INTRODUÇÃO

A grande dúvida deste momento e do futuro é saber como manter o estado atual em que se deseja preservar as máquinas e equipamentos. A maior parte deste mundo dos equipamentos pode usar técnicas de retorno rápido ou apenas fazer conservação mínima para o estado funcional. No momento, busca-se a melhor performance, melhor técnica, custo baixo, condições necessárias, que asseguram de maneira clara e permanente a função de qualquer equipamento.

O mundo da manutenção sempre andou junto com as grandes tecnologias. Já, no passado, estabeleciam-se regras, de maneira a tratar as atividades ligadas à manutenção, com certos princípios e filosofia. O modelo sempre foi de administração das atividades ligadas a consertos, reparos e substituição, não se importando com a atividade de manutenção [Tailor, 1990].

## 1.1 Informações Históricas da Manutenção.

Até o ano 1940, o conceito era de reparar as quebras, quando os EUA lançaram a manutenção preventiva como uma nova técnica revolucionária, para manter a performance dos equipamentos. Este tipo de manutenção teve como foco o tempo, o intervalo pré-definido para todas as tarefas programadas a executar. Também tem como regra, a substituição de peças e componentes em qualquer estágio de maturidade. Um relatório, espécie de planilha loca-se às tarefas em forma seqüencial, de acordo com as características do equipamento.

Enquanto, em 1950, era consolidado o processo de manutenção preventiva, ou manutenção baseada no tempo (TBM), nasce no meio industrial a manutenção baseada na performance e desempenho, também conhecida como manutenção baseada nas condições, em que se encontra o equipamento (CBM). A manutenção preventiva com base no tempo (TBM) e a manutenção da condição são baseadas em técnica preditiva, também chamada de manutenção preditiva.

Em 1960, aparecem no meio industrial, com grande ênfase, os conceitos de confiabilidade, segurança e economicidade para trabalhar em projetos de instalações industriais. Também visto como manutenção do sistema de produção.

Já, em 1970, nasce no Japão, um sistema de manutenção com enfoque administrativo na pessoa, com visão global nos setores industriais, administração voltada à participação (TPM). TPM revoluciona conceitos industriais, onde congrega a mais alta direção e todo operário de

fábrica, enquanto, até neste momento, a preocupação das atividades de manutenção somente era com mantenedores. Este sistema proporciona os conceitos de prevenção da manutenção (PdM) e principalmente execução de atividades voluntárias [Nakajima,1989].

Por volta de 1978, Stan Nowlan e Howard Heap relatam em um documento, com base em um guia de manutenção de 1967, onde envolve o modelo da Boeing 747 e revisado, em 1974, pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos como primeiro programa desenvolvido para aviação civil. Este desenvolvimento inicial na indústria de aviação comercial americana melhora a segurança e confiabilidade de seus equipamentos. Uma melhora significativa na aviação, passa de 60 quedas por milhão, para menos de duas quedas por milhão, hoje. Comparando o 747 original com o DC-8. Os 747 necessitava de 66 000 mil horas de inspeção, para voar 20 000 mil horas , enquanto o DC-8 precisava 4 milhões de horas de inspeção, para voar as mesmas 20 000 mil horas.

Assim, nasce o RCM (*Reliability Centred Maintenance*), ou Manutenção Centrada em Confiabilidade, incorpora todos os outros tipos de manutenção, prioriza as técnicas de monitoramento e principalmente o estado da falha. Este sistema trabalha na condição da tarefa e monitora a condição da tarefa .

O RCM se espalhou pelo mundo e ganhou força, incorporou, além das atividades acima, políticas de ação sobre as falhas e políticas administrativas. Tem base em quatro tipos de manutenção: Preditiva, Preventiva, Corretiva e Detectiva. Detectiva, nome dado por John Moubrey para definir em inspeção, de que maneira era detectado uma falha funcional em um alarme. John Moubrey,1999, moderniza e chama de RCM II .

## **1.2 Ferramenta da Confiabilidade**

Este trabalho está baseado na ferramenta da confiabilidade, Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM), com exploração na Análise de Vibração. O trabalho proposto tem enfoque de usar os princípios do RCM, analisando o estado de falhas e como esta ferramenta pode contribuir, para preservar as funções estabelecidas, verificando a importância da confiabilidade no processo tecnológico de manutenção. Os critérios de confiabilidade do RCM mostram como e porque ocorrem falhas e principalmente qual é sua função, causa e efeito.

Também são analisados, os níveis de vibração, que se encontram, através dos resultados das medições, e na análise do espectro da vibração detectar em que rotação a vibração está ocorrendo. Outra tarefa é tomar ações em função deste nível de vibração e retornar a medir, para certificar o nível de vibração especificado. Analisar também no nível de frequência na banda.

Verificar em que banda está ocorrendo em função da velocidade e comparar com a linha aceitável de amplitude. Monitorar a tendência destes níveis, através de uma frequência de inspeção específica, em função do comportamento do equipamento no processo.

A medida de vibração é o principal parâmetro utilizado em manutenção pela condição. Aqui o processo vai se estender como os tipos de falhas se apresentam nestes equipamentos e seus componentes e propor a medida de vibração, como indicador do bom estado funcional da máquina.

O objetivo principal, usar a técnica preditiva, medir e implantar um plano de análise e monitoramento do nível de vibração em máquinas rotativas dentro dos conceitos do RCM.

Objetivos específicos:

- Implantar um sistema de medição e análise de vibração;
- Usar a medição de vibração como indicador desempenho dos equipamentos;
- Introduzir a confiabilidade (RCM) como elemento chave para uso da tecnologia de medição;
- Propor uma cultura de monitoramento da vibração através de facilitadores que auxiliam na manutenção dos níveis de vibração;
- Estabelecer critérios de periodicidade de monitoramento e indicadores;
- Recomendar análise de vibração para equipamentos novos e certificação;
- Contribuir para o processo de redução dos custos, com diminuição das paradas de produção e quebras inesperadas.
- O uso destas técnicas como análise de vibração e análise de lubrificação, solucionam cerca de 80% dos problemas industriais e outros 20% estão relacionados em causas comuns [Nasa,1996].

### **1.3 Justificativa do Tema e Demanda**

As estratégias de manutenção mostram que a Manutenção Baseada na Condição provêm do custo baixo de manutenção e alta disponibilidade da função do ativo (equipamento). Na prática, este benefício pode ser medido. Esta conexão entre confiabilidade e análise de vibração permite uma estratégia de manutenção, baseado na saúde da máquina a ser institucionalizado nas atividades pelo usuário. Do ponto de vista da confiabilidade, a tecnologia de medição da vibração, deve fazer parte da condição necessária, para manter as funções do ativo físico funcionando [Dunn,1997].

A falha sempre teve enfoque de anomalia, defeito, palavras que geralmente estão sendo mal usadas, com efeito, de minimizar os danos causados por perdas de produção. Estas perdas podem envolver componentes e levar a parada do equipamento. Segundo Smith, 1990, cerca de 35% das organizações aplicaram RCM para todos os equipamentos e os restantes 65% revisaram alguns de seus equipamentos a maioria planeja continuar usando .

As tecnologias de medição, quando integradas facilitam o processo de manter a vida útil do equipamento. As técnicas como a termografia (aplicação de instrumento, para detectar e identificar pontos, ou imagem de diferentes temperaturas, chamados de termograma), análise de lubrificantes (identificar componentes de uma amostra, viscosidade e contaminantes) e análises e monitoramento de vibração. A termografia neste trabalho é uma técnica de monitoramento secundária em relação a análise de vibração. Uso desta técnica permite confirmar o que análise de vibração tem determinado, através do resultado dos níveis de vibração encontrados. A termografia é preferível usar em instalações elétricas em geral, onde é mais efetivo e tem um retorno do investimo da técnica num prazo menor.

#### **1.4 Objeto de Estudo**

A demanda deste projeto está focada nos equipamentos rotativos do processo de pintura. Estes equipamentos têm como objetivo no processo manter o desempenho e suas funções de: insuflamento do ar, circulação e exaustão. Os ventiladores são conjuntos constituídos pela montagem de rotor, pás do ventilador, eixos sustentados por mancais e acoplados direto, ou indireto, acionados com correias a um motor elétrico.

Uma população de 43 máquinas principais do processo de pintura serão analisadas, sendo estas representadas, por 60% da população instalada no sistema. A seleção teve como critério principal a função da máquina no processo, criticidade do processo e potência do conjunto motor-ventilador. Estes conjuntos fazem parte do sistema de pintura das cabinas, compartimento de aplicação de tintas. A função destes conjuntos é manter o pleno do ar, através do insuflamento e da exaustão, mantendo a cortina de água de arraste de borra de tinta. Alguns dos conjuntos fazem o resfriamento através do insuflamento e outros, através de exaustão, com a função de retirada do ar (troca com ar exterior). Um conjunto de sete (7) ventiladores mantém funcionando o sistema de uma cabina.

## **2. MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE (RCM)**

Manutenção Centrada em Confiabilidade (RCM) é o processo que é usado, para determinar a manutenção mais efetiva. Envolve e identifica ações, que reduzem falhas com menor custo. Estas ações podem ser baseadas na condição, ou baseadas no ciclo e no tempo de vida do equipamento .

### **2.1 Histórico do RCM.**

A política de análise começou, em 1960, na indústria aeronáutica e, a partir de 1970 desenvolveu os conceitos de RCM. Os princípios e aplicações foram documentados por Nowlan e Heap's [22]. O trabalho foi desenvolvido em cima da idade e na falha do equipamento. Até então a premissa básica era de que a manutenção baseada na condição era falsa para maioria dos equipamentos.

De 1960 até 1980, a manutenção preventiva era a técnica mais usada pelos usuários de manutenção das organizações. A manutenção preventiva era baseada em dois princípios: um relacionado à idade do equipamento e à falha, e outro determina a vida do componente, através do método estatístico. Assim, partes dos equipamentos podem ser substituídas.

A manutenção preventiva assume que a probabilidade de falha pode ser determinada estatisticamente para máquinas individuais. Componentes e partes podem ser substituídos em um tempo, antes de ocorrer à falha. No passado, era comum substituir rolamentos, ou mancais, após um número de operações, considerando-se que a taxa de falha aumenta com o tempo de operação [Moubray,1991].

Não muito recente os estudos mostram que existia uma diferença entre a vida útil dos mancais para um mesmo modelo e capacidade de carga. A descoberta foi que, em muitos casos, para a maioria dos equipamentos e componentes, a vida dos mancais crescia, excedendo a expectativa de vida projetada. A SKF, indústria de mancais, propôs a troca do método de vida esperada - método original empírico pelo método de vida mínima (pela fadiga). Esta pré-definição da vida dos mancais resultou de um modelo predeterminado em função da rotação. A vida dos elementos teve como base a extensão do tempo, entre o intervalo de troca e a substituição do equipamento .

Este processo, conhecido como exploração da idade foi desenvolvido, em 1970, pela marinha americana, que estendeu o tempo entre o intervalo e a substituição da tarefa, baseada no tempo pela tarefa baseada na condição.

Novas tecnologias durante os anos de 1990 foram desenvolvidas, incluindo os microprocessadores, que aumentaram o desempenho dos computadores na força do trabalho. Com isto, é possível determinar a real condição do equipamento, não necessitando ter o conhecimento de quando o equipamento pode falhar, baseado na idade. Este novo conceito de tecnologia tem correlação entre a idade e a falha em muitas partes dos equipamentos e têm ênfase no monitoramento pela condição. Monitoramento pela condição, chamado de Preditiva ou inspeção, está dentro do ambiente de manutenção e tem resultado da necessidade de revisar as tarefas programadas dentro do conceito de manutenção preventiva. O RCM vem suprir a estrutura e determinar a melhor eficiência, para assegurar e a manter a função do equipamento [2].

## 2.2 Filosofia e Análise

A filosofia do RCM emprega as técnicas de manutenção Corretiva, Preventiva, Preditiva Pró-ativa ou Detectiva. Estas técnicas são integradas para aumentar a confiabilidade que uma máquina, ou componente, funciona, de maneira a atender ao ciclo de vida, projetado com o mínimo de manutenção. A filosofia é prover o estado da função, com disponibilidade e custo baixo. O RCM requer que a decisão de manutenção seja baseada no suporte pela técnica e por justificção econômica[Smith,1990 ]

A análise do RCM tem sido usada intensamente pela indústria aérea, onde a funcionalidade da falha tem um potencial resultante em grandes perdas de vida, implicações de segurança e impacto ambiental. A análise está baseada e detalhada em cima dos modos de falha e efeitos e com confiabilidade para o sistema. Esta análise determina a manutenção apropriada para cada tarefa e identifica o modo e as conseqüências. O RCM reconhece que nem todo modo de falha pode ser determinado e/ou analisado. Os vários processos em uso têm determinado que o mais econômico e eficiente é usar uma combinação dos processos, para diminuir o impacto da falha.

A rigor, o processo de análise deve responder às seguintes questões:

- Função - Qual é a função do componente, ou do equipamento?
- Efeitos - O que acontece, quando cada falha ocorre?

- Intervalo das tarefas e Ações Pró-ativa - O que deve ser feito, para prevenir, ou prever cada falha?
- Conseqüência - De que maneira cada falha age?

As respostas para estas questões devem satisfazer a condição necessária, para um ativo físico, ou componente manter-se funcionando. A figura 2.1 mostra o processo de manutenção.

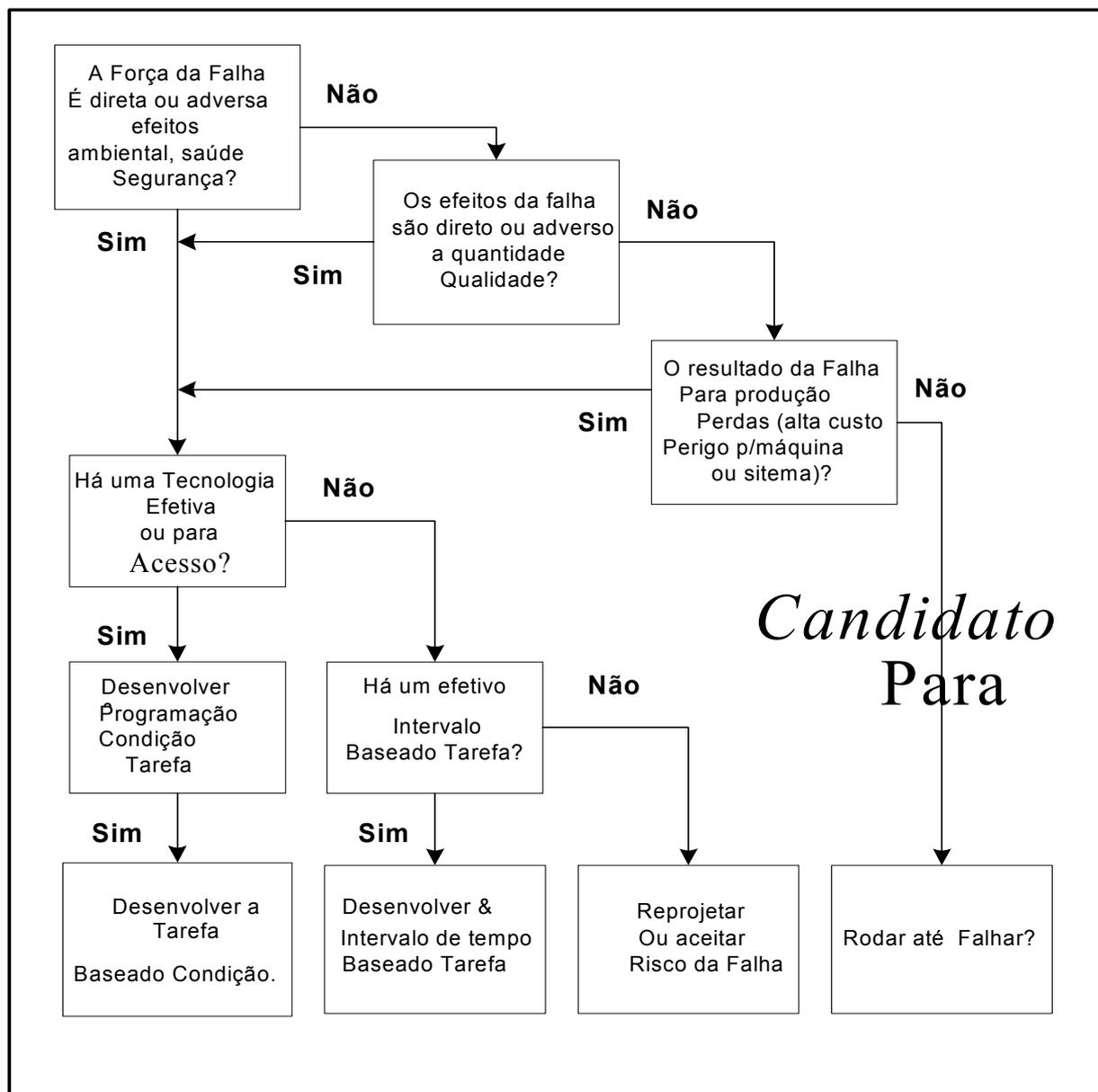


FIGURA 2.1 : PROCESSO DE ANÁLISE DE MANUTENÇÃO.

Fonte: NASA,1996.

## 2.3 Falha

Segundo *John Moubray*, o processo de constituição da falha é a interrupção da propriedade da função, ou da performance. O RCM realiza vários exames em nível de sistema, de subsistema, de componente, de partes e a nível global. A meta de uma efetiva manutenção de uma organização é prover um sistema que funciona a custo baixo. Isto significa que a manutenção deve estar baseada em um entendimento claro da falha em cada nível do sistema. Um componente pode ser atingido, ou entrar em falha, e assim mesmo não causar falha em um sistema. De outro lado, vários componentes atingidos, podem causar uma falha no sistema e assim mesmo alguns componentes não tiver falha individualmente .

Alguns conceitos de falhas:

- Interrupção da função do componente, ou da máquina.
- Qualquer perda que interrompe o processo de produção.
- É a perda do ativo disponível.
- É a indisponibilidade do equipamento.

### 2.3.1 Função e Funcionalidade da Falha.

O objetivo da manutenção é definido pelas funções do equipamento, que, quando associadas podem ter muitos elementos. Estes elementos incluem propriedades físicas, operações de performance, tolerâncias, tempo de operação, limite de disponibilidade e operacionalidade. Entendendo estas propriedades, fica claro como funciona o equipamento. A função de um equipamento deve ser definida em termos de qual volume de ar deslocado, em que pressão, rotação e qual a eficiência, por exemplo, um ventilador .

O funcionamento da falha é descrito de vários modos, na qual um sistema ou subsistema pode falhar em sua função dentro de um equipamento. Um sistema que opera em estado de degradação, mas não de impacto, em qualquer situação, pode ter origem na interface de elaboração, ou de contorno (montagem).

No mundo do RCM, o estado de falha é conhecido como falha funcional, porque ela ocorre, quando um equipamento, ou componente inibe sua função. Nesta inibição, o componente ainda funciona, mas em um nível, em que o componente não pode sustentar sua função por completo [Moubray,1995 e 2000].

### 2.3.2 Modos de Falha

Os modos de falhas se identificam, através dos eventos, que são causadores de cada estado de falha. Estes eventos são conhecidos como modos da falha. Modos de falhas são equipamentos e componentes específicos, que resultam na funcionalidade da falha do sistema. Por exemplo, uma máquina composta de um motor e ventilador podem falhar catastróficamente, devido à interrupção completa da falha do rotor, ou dos mancais, ou das fixações, ou dos controles, ou do motor, ou em conjunto destes componentes [Kenneth,1996].

Como a falha funcional trata da perda da função, o modo de falha trata da causa da falha. No caso do ventilador, a função é deslocar um volume de ar. A falha funcional é a incapacidade de transferir este ar e o modo de falha é o rotor obstruído provocado pelas trincas nas pás. Nem todo o modo de falha previne, ou prediz, porque a probabilidade de ocorrer é remota e seu efeito é inconseqüente[SAE,1999].

O mantenedor deve evitar este tipo de modo de falha, simplesmente pela adoção de medidas pró-ativas, desde que são conhecidos os modos de falhas, que podem ocorrer, neste tipo de equipamento [Nepumuceno,1985].

### 2.3.3 Confiabilidade

A confiabilidade é a probabilidade que um item tem de se manter no estado funcional em um período operacional específico e em condições de operação, dentro do período da falha. A condição de probabilidade de falha mede a probabilidade de um item falhar no intervalo de vida, durante o intervalo de falha. Para um item aumentar a probabilidade da condição da falha, este deve mostrar características de desgaste externo, na superfície. Um item que sofre os efeitos da idade, pode ser atingido pela probabilidade da condição da falha e isto não é relevante para a troca de um item no equipamento [Latino,1994].

As conseqüências podem variar em função dos modos de falhas do equipamento. Quanto mais componentes, ou máquinas, no processo estão envolvidos, aumenta a condição de modos de falhas e conseqüentemente aumentam os efeitos. No exemplo acima, a perda do rotor e a parada do equipamento são fundamentos dos efeitos da conseqüência da falha .

### 2.3.4 Modelos de Falhas

A diferença entre os modelos de falhas do item complexo, ou simples, têm importantes implicações para a manutenção. Todos os itens têm uma relação quase direta entre a idade e a possibilidade de manter as funções do item, durante o período de conservação. A figura 2.2 apresenta esta variação entre os itens elétricos e os mecânicos. Um estudo, na Suécia em 1973, e outro na U.S. Navy, em 1983 apontaram resultados similares. As falhas aleatórias para 77% a 92% do total das falhas e a falha relativa à idade entre 8% e 23%.

Têm-se seis modelos de falhas encontrados em relação à condição de falha e o tempo de operação:

**Tipo A** - Constante, aumenta no fim da vida, segue um desgaste e pode a qualquer momento vir à tona a falha (motores, ventiladores).

**Tipo B** - Mortalidade infantil, segue constante e vagorosamente, aumenta a probabilidade da falha (componentes eletrônicos).

**Tipo C** - Baixa probabilidade de falha, quando o item é novo, segue um aumento rápido em um nível constante.

**Tipo D** - Constante em toda a idade.

**Tipo E** - Curva da banheira, mortalidade infantil segue uma constante e aumenta com o desgaste, chegando o fim da idade.

**Tipo F** - Aumenta gradualmente a probabilidade da falha, mas não identifica o desgaste com a idade. A idade limite não é aplicável.

Os tipos A e E são típicos de peças simples, itens como ventilador, pneu, compressor. Os itens B,C,D e F são mais complexos.

Estas diferenças básicas entre os modelos têm implicações importantes para a manutenção. As peças simples sempre mostram uma relação entre a confiabilidade e a idade. As peças complexas demonstram alguma mortalidade infantil, após aumenta gradualmente a probabilidade de falha [Moubray,1995;Nowlan e Heap,1978].

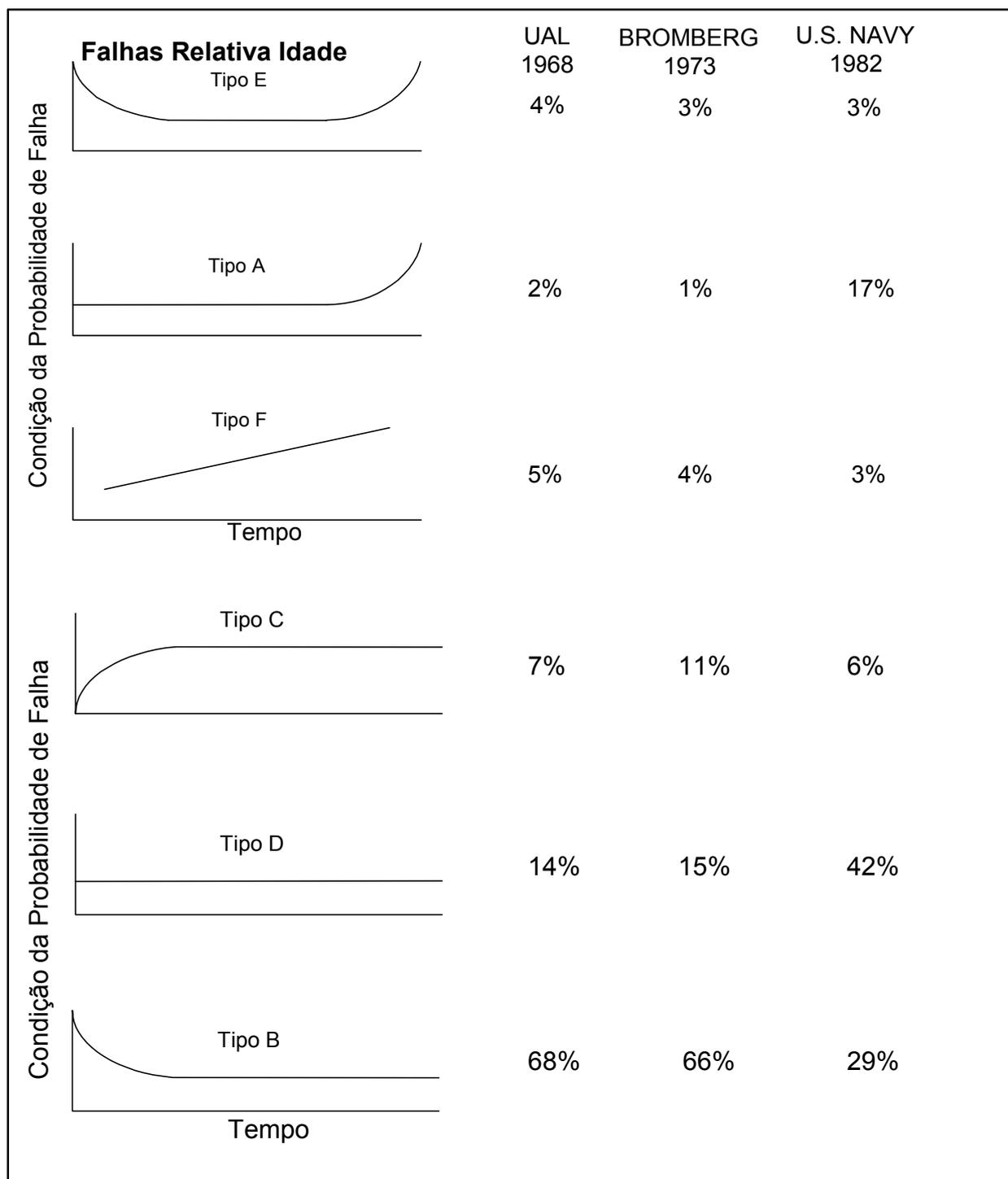


FIGURA 2.2 : CONDIÇÃO DAS CURVAS DE FALHA.  
Fonte: Nowlan e Heap,1978.

## 2.4 Modos de Falhas Análises e Efeitos

O modelo característico é aplicado para cada sistema, subsistema e identificando o componente em sua definição. Identificado, a função do item, ou componente, podem ser

identificados os modos de falhas. Os modos de falhas associadas com cada falha podem indicar as conseqüências da falha. A questão é saber que efeito a falha tem na operação de um equipamento.

Sistemas similares em máquinas freqüentemente têm o mesmo modo de falha. Entretanto, o sistema usado determina as conseqüências das falhas. O modo de falha de um item, por exemplo, o mancal de esferas, troca de máquina para máquina, mesmo sendo a mesma, a causa da falha pode trocar e os efeitos da falha diferem uma para outra [Nasa,1996].

#### 2.4.1 Causas das Falhas

Uma das funções do modo de falhas é entender se é necessário investigar a causa da falha. Dentro deste entendimento deve ser determinada a aplicabilidade de manutenção no item, ou no equipamento. Exemplo, modo de falha pode ser um mancal incluindo as vedações, lubrificação, fixação e rolamento; o mecanismo desta falha é a fadiga por ter excesso de carga e a causa é o desbalanceamento, ou desalinhamento. Este tipo de falha gera as vibrações, que determinam a ação de usar uma tecnologia, para medir e avaliar [Latino, 2001].

### 2.5 Componentes do RCM.

Os componentes do RCM incluem manutenção corretiva, preventiva, preditiva e pró-ativa. O mantenedor deve entender estes como um sistema que facilita a análise, falhas funcionais e os modos de falhas, todos são componentes críticos da ferramenta. Aqui são determinados os níveis de prioridade, termos muito usados nas atividades de manutenção:

- Emergência: que trata da aplicação de segurança, impacto na missão;
- Urgência: nas operações de risco, a rotina nos serviços básicos.

A figura 2.3 apresenta como os componentes atuam na atividade de manutenção.

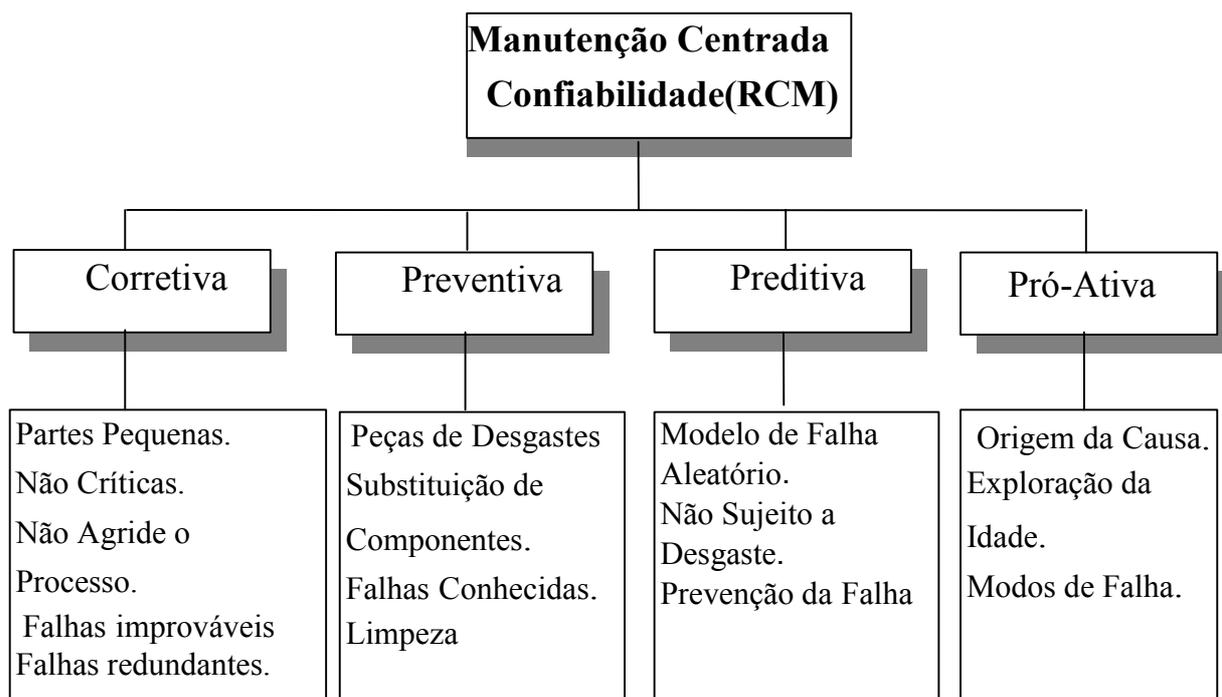


FIGURA 2.3 : COMPONENTES DO PROGRAMA RCM.

Fonte: Nasa,1996.

### 2.5.1 Manutenção Corretiva

Este tipo de manutenção também é chamado de reativa, reparo, falhas, quebra, quando aplicado no reparo, ou substituição de componentes. Esta manutenção somente ocorre, quando há a deterioração no equipamento pela causa da condição da funcionalidade da falha. Este tipo de manutenção supõe que todas as partes do equipamento são identificadas por reparos, como sendo a única necessária. Se um item falhar, as peças de reposição não estão seguras, atrasos ocorrem, para serem obtidas.

Quando este tipo de manutenção é praticado, com certa porcentagem, indica a falta de planejamento nas atividades, provoca um alto volume de peças de reposição, estoque alto e um ineficiente uso das estratégias de manutenção. Este componente pode ser usado em motores elétricos abaixo de 7,5 HP, ar condicionado, micros ventiladores, onde as conseqüências das falhas são negligenciadas [Levit,1997].

### 2.5.2 Manutenção Preventiva

Usualmente, significa tarefas determinadas em intervalos fixos e com substituição de partes. Consiste regularmente de inspeções, ajustes, limpeza, relubrificação, calibração e reparos

de componentes do equipamento. Manutenção preventiva também pode ser chamada de manutenção baseada no intervalo [Rockwell, 1998].

As inspeções periódicas, ou eventos em intervalos pré-definidos ajudam a reduzir a falha nos equipamentos. Também pode reduzir a mudança de intervalos e o ajuste de frequência, indicado pela manutenção de rotina. Outra redução significativa no potencial de falhas e que ajuda consideravelmente na determinação da frequência é o tempo médio entre falhas. Isto funciona como um guia na determinação do intervalo da tarefa.

Para alguns itens, enquanto a falha é relativa à idade, não ocorre igualmente, através da vida do item. De fato, a maioria dos equipamentos não é relativa ao desgaste e sim à operação específica na condição da falha. Portanto, o intervalo de manutenção não garante manutenção necessária. Em resumo, pode-se aumentar os custos e a ineficiência, quando somente este tipo de manutenção é aplicado [Dunn,1997].

### 2.5.3 Manutenção Preditiva

Esta técnica teve início, no final da década de 1950 e início de 1960, com os estudos voltados às vibrações e ruídos. Até então tudo era visto como ruído, as máquinas e equipamentos tinham seu controle no nível de ruído. Contudo, a partir desta época, passou-se a usar análise e monitoramento de vibração como elemento essencial para indicação da performance dos equipamentos. A vibração ganhou foco e começou a ser evidenciada no meio industrial como uma técnica, para manter as condições de funcionalidade de máquinas e equipamentos [Nepomuceno,1985].

A manutenção Preditiva, também chamada de manutenção baseada na condição ou monitoramento da condição, é estritamente focada na tarefa, verificando se está falhando. Esta tecnologia usa a inspeção visual, técnicas não destrutivas e dados de performance da condição da máquina. Permite uma análise contínua das condições do equipamento, monitora dados e programa a manutenção, trabalha com a funcionalidade da falha[Piotrowski, 2000 ].

Os métodos de análises que determinam o percurso da falha são: Dados comparativos, Correlação com Tecnologias Múltiplas, Análise de Tendência e principalmente Dados do Fornecedor e Estatística Interna.

Entre estas correlações destacam-se três: análises de lubrificantes, termografia e monitoramento da vibração. A análise de lubrificantes é feita pela contagem de partículas e tem uma correlação com a vibração. A termografia é feita pela condição de alta temperatura em isolamento em motores e a própria vibração. Com a integração destas técnicas, pode-se determinar

a melhor condição do estado real da função do item ou do equipamento. A figura 2.4 mostra, quando se deve praticar este tipo de análise.

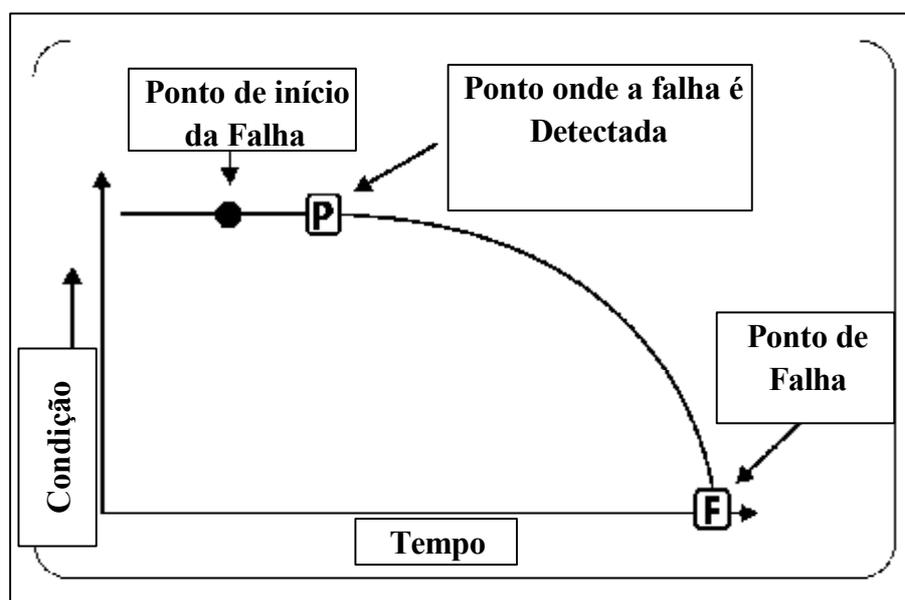


FIGURA 2.4 : COMPORTAMENTO DA FALHA.

Fonte: Moubray, 1999.

#### 2.5.4 Manutenção Pró-Ativa

É a manutenção realizada antes de tornar a funcionalidade da falha em modos da falha. Portanto, toma ação, antes da maturação do processo de falha. Tem-se desenvolvido esta técnica, através do melhor projeto, instalação, mantenedor, procedimentos de manutenção e programação. A manutenção pró-ativa emprega as seguintes técnicas básicas:

- Condições para equipamento novo;
- Parâmetros de reconstrução;
- Indicação de desempenho dos componentes;
- Seleciona fornecedor, através das análises dos componentes chaves;
- Baseia-se no resultado dos processos de medição;
- Análises da origem da causa.

Usando-se esta realimentação, é assegurado e estendido o ciclo de vida de um componente. Estas adoções ou metas conduzem um processo de confiabilidade. Como especificação para o equipamento, que envolve o desenho desde sua condição do equipamento ainda, quando em operação.

Outro enfoque é sobre os componentes das máquinas, que transferem forças para as bases, por exemplo, as cargas parasitas nos mancais, originadas por cargas resultantes do excesso de vibração. Este excesso é causado pelo desbalanceamento e desalinhamento, determinando a vida do componente.

Resolvidos estes problemas, a próxima etapa é incluir na aquisição, critérios como o balanceamento, alinhamento e a vibração. Isto conduz para especificação da documentação para um novo equipamento, ou para reconstrução. Outros critérios mais complexos podem ser introduzidos, como: critério de vibração na banda, quantificar alinhamento e especificar o balanceamento. A figura 2.5 resume componente de manutenção com a técnica necessária [Piotrowski, 1997].

<b>Estratégia de Manutenção</b>	<b>Necessidade Técnica</b>
Manutenção Pró – Ativa	Monitoramento e Correção das Falhas, Origem das Causas, Ação.
Manutenção Preditiva	Monitoramento da Vibração, alinhamento e Análise de Lubrificantes.
Manutenção Preventiva	Substituição de Componentes em Intervalos Determinados.
Manutenção Corretiva	Bom Orçamento de Manutenção

FIGURA 2.5 : ESTRATÉGIA DE MANUTENÇÃO.

### **3.TECNOLOGIA PREDITIVA**

Nos últimos anos, segundo Barkov, a prática predominante, para manter em funcionamento qualquer equipamento é através do reparo. Este reparo é determinado pelas ações de: funcionar até quebrar; reparar de acordo com o funcionamento do equipamento e experiência do mantenedor; reparar de acordo com resultado do diagnóstico e monitoramento da condição. Somente esta última técnica é eficientemente econômica para manter e estender a vida do equipamento. Esta técnica tem como resultado, a redução do tempo de reparo, foco no diagnóstico, redução das substituições, redução drástica das falhas e redução das perdas no resultado da manutenção [33].

#### **3.1 Análise e Monitoramento da Vibração.**

Com este método é possível detectar qualquer defeito ao longo da vida do equipamento e também, monitorar o processo desenvolvimento da falha. Portanto, a prática tem mostrado que em equipamentos mecânicos e eletromecânicos, com diagnóstico eficiente, usam-se principalmente, os sinais de vibração para o monitoramento. Entre eles, as forças de excitação, nas quais é excitado somente o local onde aparece o defeito transparente de vibração. A vibração contém o máximo de informação, para diagnosticar e o diagnóstico pode conduzir como um registro, para dismantelar o processo de interrupção de operação da máquina [Moblely e Barkov,1999; Marra,1998 ].

A análise de um sistema e níveis de vibração do equipamento é uma técnica bastante usada. Monitoramento da vibração ajuda determinar a condição,em que se encontra o equipamento na rotação específica e sua estabilidade estrutural. Também, o monitoramento da vibração, identifica e localiza as fontes de ruído.

A máquina e a vibração do sistema é um movimento periódico de um corpo sobre a posição de equilíbrio. Este movimento que diferencia de uma máquina para outra, tem uma força com determinada amplitude e determinada frequência, resultando em vibração, com amplitude específica e frequência.

Esta tecnologia, quando propriamente usada, determina a condição em que se encontra o equipamento em regime operacional, principalmente, em máquinas rotativas. Como resultado

desta condição, pode-se avaliar e antecipar a falha. Neste processo as máquinas críticas do sistema são analisadas e monitoradas.

### 3.2 Aplicação e Técnicas

Todos os equipamentos rotativos têm condições plenas, para aplicar a técnica de análise de vibração. Exemplos são: ventiladores, mancais, motores, bombas, sopradores, compressores, caixa de engrenagens e eixos. Estes equipamentos são avaliados em função dos aspectos individuais construtivos, sua função no processo e na dinâmica operacional.

Segundo Mobley, as condições dinâmicas das máquinas se alteram durante o processo. Desta forma os componentes, ou conjuntos, começam a desgastar, surgem os desalinhamentos de eixos, desbalanceamentos dos rotores, partes do conjunto afrouxam, aumentando as folgas e desgastes dos mancais e as bases se tornam cada vez mais flexíveis. Deste modo, alteram os parâmetros dos componentes, aumenta a vibração. Este nível de vibração atinge as estruturas e conseqüentemente mudam os esforços nos mancais. O potencial de falha está presente e direciona o processo de falha .

#### 3.2.1 Condições Monitoradas

A forma e as condições que levam os equipamentos a proporcionar danos ao ambiente, paradas, perdas de produção, ou perdas do ativo, são relacionadas às condições de monitoração. Os potenciais de falhas surgem em condições individuais ou em conjunto, caracterizadas por: desbalanceamento, desalinhamento, folgas, ressonância na estrutura, afrouxamento nos acoplamentos, folgas excessivas nas correias, desalinhamento de polias [GM,1993].

#### 3.2.2 Intervalo de Detecção

A análise de vibração é realizada nas condições em que se encontra a função do equipamento ou próprio equipamento.

O intervalo de análise está relacionado ao estado atual, na experiência do mantenedor, na qualidade dos dados coletados, na interpretação do espectro e, principalmente, no conhecimento geral do equipamento relacionado às ações de intervenção, no momento adequado. Este intervalo pode ser especificado em função da criticidade do equipamento no processo, nas condições operacionais, no intervalo de tempo determinado, com isto, pode-se iniciar com um período mais baixo possível, alterando em função do comportamento do equipamento e principalmente na qualidade dos sinais de vibração coletados [IS011342,1998].

### 3.2.3 Vibração Global.

A medida global de vibração é indicada através da banda larga e provém da maior fonte de vibração do ponto pelo qual está sendo analisado. Mas esta medida não fornece a situação completa da condição em que se encontra. Esta energia de vibração medida pode ser expressa em instrumentos capazes de medir a vibração em pico, pico a pico, média e *rms*, em grandes faixas de frequência. A figura 3.1 apresenta o espectro em função da amplitude de vibração e o tempo com as unidades de medida [Gerges,1992 ; DSP,1999].

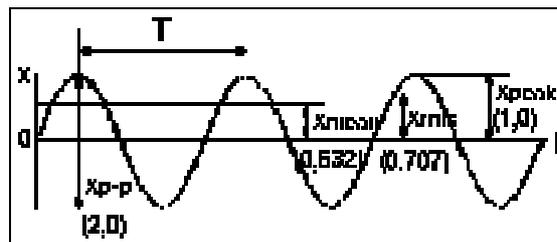


FIGURA 3.1: VALOR PICO, PICO - PICO, MÉDIA E *RMS*.

Os medidores têm capacidade de medir o valor em verdadeiro *rms* em amplitudes de velocidade, deslocamento e aceleração. Estas amplitudes medidas são comparadas com os padrões sugeridos pelas normas tipo ISO, onde se estabelece o limite de amplitude máximo para máquinas rotativas.

O nível global tem a capacidade de detectar pontos de mau funcionamento, principalmente, em mancais. O valor de amplitude de vibração encontrado pelo medidor deve ao mesmo tempo medir em função do tempo e da frequência, para refletir a real condição da análise. O fator de crista pode determinar a condição real de funcionamento do mancal entre uma medida e outra.

### 3.2.4 Equipamento de Medição

Para fazer análise e monitoramento da vibração é necessário um coletor de dados, transdutor de vibração - sensor de preferência com base de apoio plana e curvada para mancais, fixação magnética, protegido com material de aço inox ASTM 316 ou 410, ou pode ser um acelerômetro piezoelétrico. Quando o acesso for difícil com uma base, deve ser usadas uma haste com ponta.

Um computador pessoal com o software para análise das tendências pode mostrar os pontos de vibração, para assistir ao diagnóstico. São necessárias uma placa de aquisição com

entradas analógicas e saídas digitais AC/DC e cabos para as interligações. Estes cabos devem ser imunes à perturbações externas, protegidos e devem ser evitadas as grandes distâncias. A figura 3.2 apresenta a configuração da placa AC/DC no processamento do sinal.

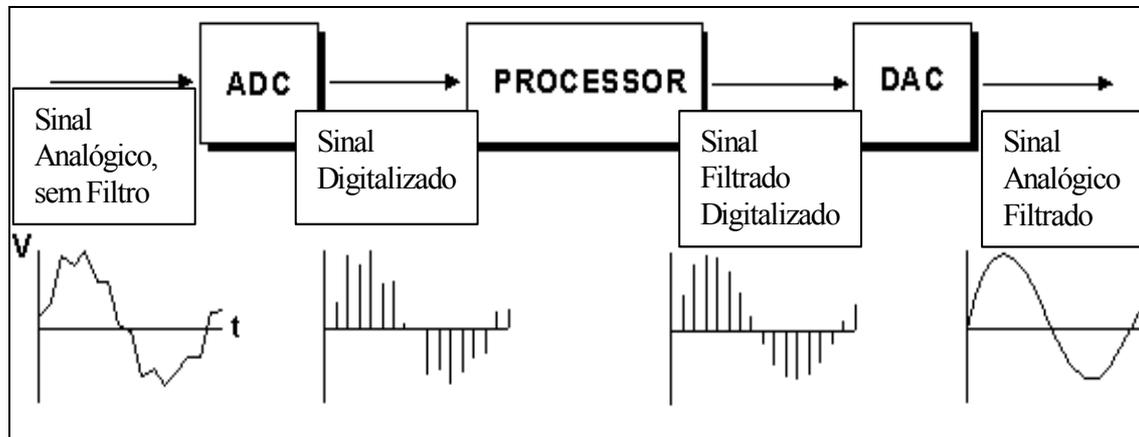


FIGURA 3.2: FUNÇÃO DA PLACA AC/DC.

Fonte : DPS, 1999.

O conhecimento do equipamento de análise deve ser prioritário para operador, para que tem a habilidade de conduzir a coleta de dados e entender a teoria da vibração, também, conhecer o equipamento que está sendo monitorado e principalmente conhecer modos de falhas.

O equipamento de medição deve ter boa linearidade. Esta linearidade é para identificar as pequenas frequências das fortes componentes. A escala de frequência do medidor deve abranger de 2Hz a 20KHz. As linhas do espectro deste medidor podem atingir a faixa entre 100 e 600 linhas, ficando com o mínimo necessário para equipamentos rotativos em torno de 400 linhas. Isto depende muito da capacidade do medidor.

Na análise da FFT (*Fast Fourier Transform*) o equipamento deve apresentar as seguintes características:

- Ter boa resolução;
- Oferecer no mínimo 400 linhas de resolução em 5Hz;
- Atender a Banda 1 para resolver os problemas entre 0.3X e 0.8X da velocidade rotacional (RPM);
- Possuir uma escala dinâmica de, no mínimo, 0.6 de amplitude;
- Capacidade de aplicar a janela *Hanning*;
- Capacidade linear de não sobrepor a média;
- Possuir filtro.

A precisão do sistema de medida entre analisador, cabos, placas de aquisição e transdutor todos montados, seguem a escala de freqüência, conforme figura 3.3 [Nepomuceno,1985; Teknikao,2000].

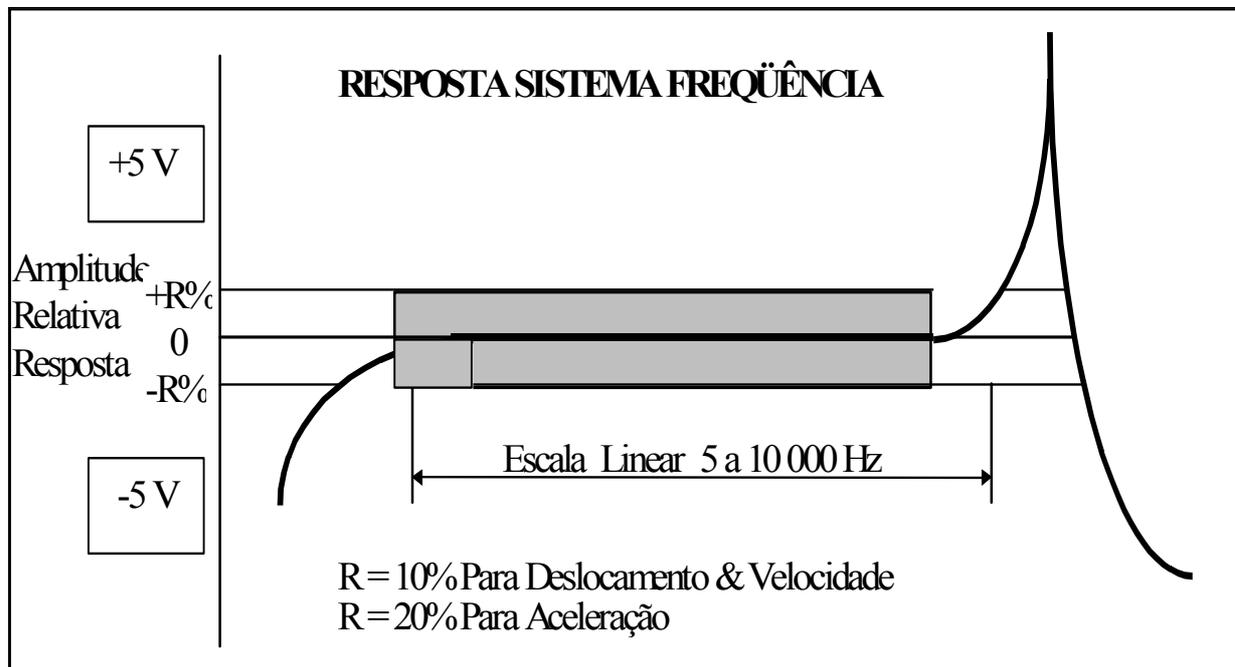


FIGURA 3.3: RESPOSTA DO SISTEMA DE MEDIÇÃO.

Um instrumento de análise de vibração deve oferecer as seguintes características:

- Medir o nível de vibração global em uma freqüência de escala requerida pela máquina, controle padrão de vibração e unidade padrão;
- Análise de espectro da vibração, capacidade para dividir a vibração dentro de componentes de diferentes freqüências, definido pelas forças de oscilações;
- Analisar a vibração na forma do sinal, analisar sinal no tempo (modo de operação) e
- Capacidade de analisar espectro em alta freqüência.

### 3.2.5 Análise do Espectro

A análise do espectro na freqüência de domínio é o melhor método de análise, para realizar o diagnóstico das máquinas rotativas. O espectro é usado, para identificar em que rotações, ocorrem falhas no equipamento e estas são falhas devido à degradação mecânica. A análise no tempo é outro tipo de análise que pode ser usada no sistema de monitoramento. Contudo, não é regularmente empregada como análise do espectro. A análise no tempo de domínio ajuda analisar a forma de onda e tem um melhor diagnóstico dos problemas das máquinas. A figura 3.4

abaixo mostra um exemplo de amplitude de vibração de um motor elétrico de 3000 RPM, desbalanceado na frequência de rotação da máquina, amplitude em mm/s [Duncan,1996].

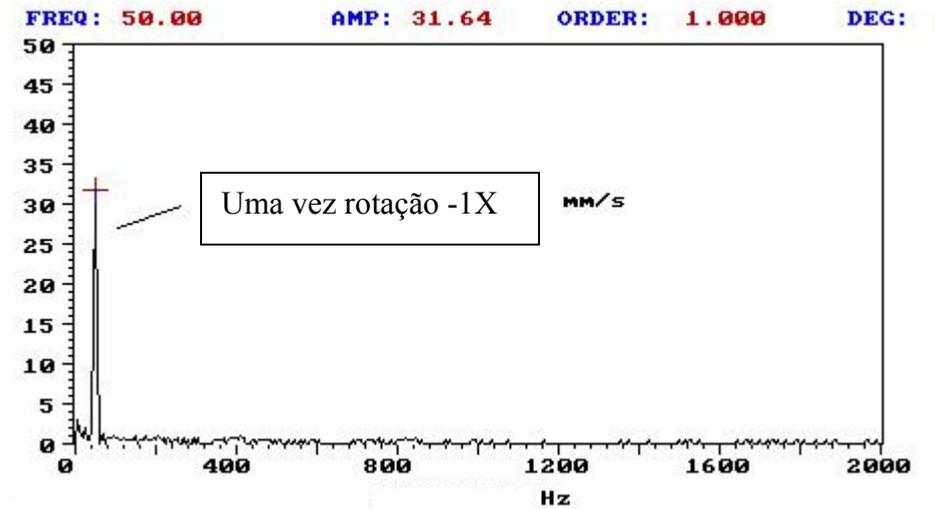


FIGURA 3.4: ESPECTRO MANCAIS MOTORES ELÉTRICOS ANTES DA AÇÃO.

Os problemas podem ser detectados, no início de vida do componente, através da análise da frequência. O detalhamento do espectro pode ser obtido com banda reduzida. Com esta redução torna-se mais fácil a interpretação e a identificação das componentes de frequência. Isto depende do tamanho do filtro. Quanto mais estreito for o filtro, mais fácil será para identificar e separar as frequências e determinar com precisão a detecção de falha. Assim, tanto o nível, através das amplitudes, quanto a frequência, podem diagnosticar a falha. A figura 3.5 mostra amplitude na frequência de domínio, após ações com balanceamento.

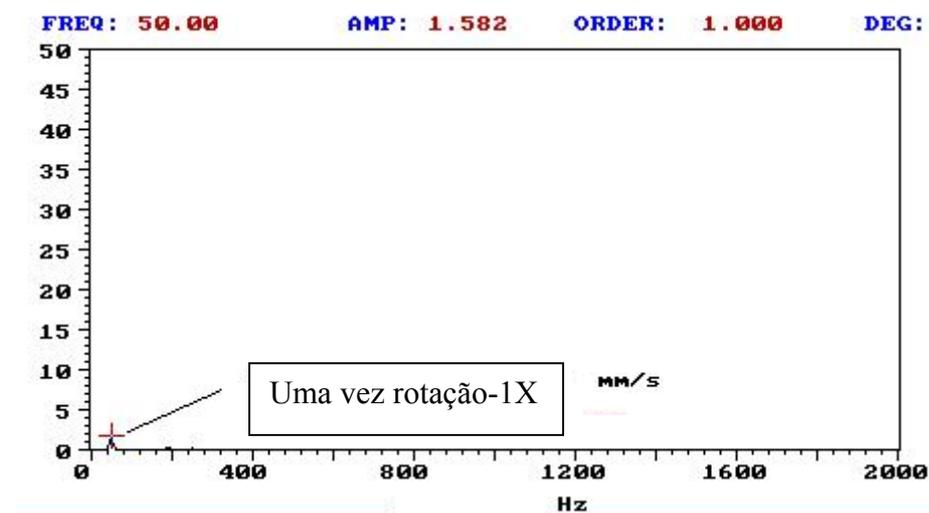


FIGURA 3.5: ESPECTRO NOS MANCAIS MOTOR ELÉTRICO APÓS AÇÃO.

A monitoração da tendência, para um certo nível de amostra, em um determinado período, pode indicar alterações das componentes de frequência. Estas alterações podem ser

monitoradas por gráfico de tendência e ser extrapolada para um determinado período, tendo como base o limite máximo permitido. Com isto, chega-se aos limites convenientes, para que a manutenção possa intervir, antes que se inicie o processo de falha. Se o equipamento é novo, pode determinar os níveis, através de tabela, ou medir e fazer o padrão de amplitude, através da linha base (*baseline*) [Marra,1998].

### 3.3 Fontes de Vibração em Máquinas Rotativas

As forças dinâmicas, que atuam nas máquinas rotativas, são de origem da própria vibração e do ruído, como também de outros defeitos. Estes defeitos trocam as características das forças e conseqüentemente geram a vibração. Estas forças são de natureza mecânica, elétrica e magnética e de fluxo dinâmico.

As mecânicas principais têm origem no desbalanceamento (forças centrífugas), cinemática (rugosidade das superfícies, mancais), atrito (rolamento e escorregamento), ou no choque (falta de fricção).

Forças elétricas e magnéticas surgem da variação do magnetismo, do condutor e qualidade do material (forças magnéticas), interação do magnetismo com a corrente elétrica (forças eletrodinâmicas).

Por conseguinte, as de natureza dinâmica são forças que pressionam as pás e o eixo, que se movimentam em um fluxo (forças de deslocamento), fluxo nos contornos dos compartimentos, partes fixas (forças de fricção) e fluxo gerando turbulência (provoca variação de pressão-pulsção)[Barkov,1999].

### 3.4 As Forças que Atuam em Máquinas Rotativas

As forças dinâmicas nas máquinas excitam diretamente a vibração. A vibração depende da natureza das forças que a excitam, pode ser determinística (periódica), ou aleatória. Exemplo de força determinística é uma oscilação harmônica. É caracterizado por uma amplitude (pico, pico a pico, média e pela raiz média quadrática *-rms*) detectado pelo sinal e pela frequência ( $f=1/T$ ) na fase inicial. Um sinal aleatório pode ter um valor em uma certa escala caracterizado não pela amplitude, frequência e fase e sim pelo valor de pico, valor *rms*, valor médio e valor de pico a pico detectado. Os componentes periódicos são representados pelo espectro e os componentes aleatórios são representados pelo espectro contínuo.

Os espectros são detectados pela baixa frequência, médias frequência e pela alta frequência. Na baixa frequência, detectada pela terceira e quinta harmônica da velocidade

rotacional, nesta frequência a máquina é oscilante, resultado das grandes forças. Na média frequência, a vibração é excitada principalmente pelas forças de oscilações por pontos próximos. Como consequência, há uma distorção sobre alguns defeitos encontrados, das fontes das forças de oscilações, produzidas pela pequena variação da velocidade rotacional. Na alta frequência a vibração forma uma onda natural. O espectro apresenta um número de linhas reduzidas poucas informações, mas pequenas forças excitam a vibração.

### 3.4.1 Rotores e Acoplamentos

A principal força aplicada num rotor é a força centrífuga. E tem frequência na mesma rotação de giro da máquina RPM/60. Quando aparece falha do rotor, tipo desalinhamento, mostra no espectro frequências múltiplas da rotação da máquina X RPM/60.

A segunda força é a paramétrica. Ela aparece, quando o elemento tem uma falha, tipo fissura, quando a rigidez depende do ângulo de rotação e troca duas vezes por revolução. Neste caso, no espectro aparece frequência com 2X RPM/60.

A terceira força é o choque, batidas. Ela aparece quando há um defeito na junção do acoplamento. A junção do acoplamento resulta em várias vezes, durante uma revolução e o eixo acoplado golpeia os mancais. Como resultado, alta frequência de vibração aparece nos mancais NX RPM/60. A figura 3.6 mostra como ocorre na prática. Em a) - mostra espectro defeito e b) possível quebra das barras do enrolamento do motor [Barkov e Barkova,1999].

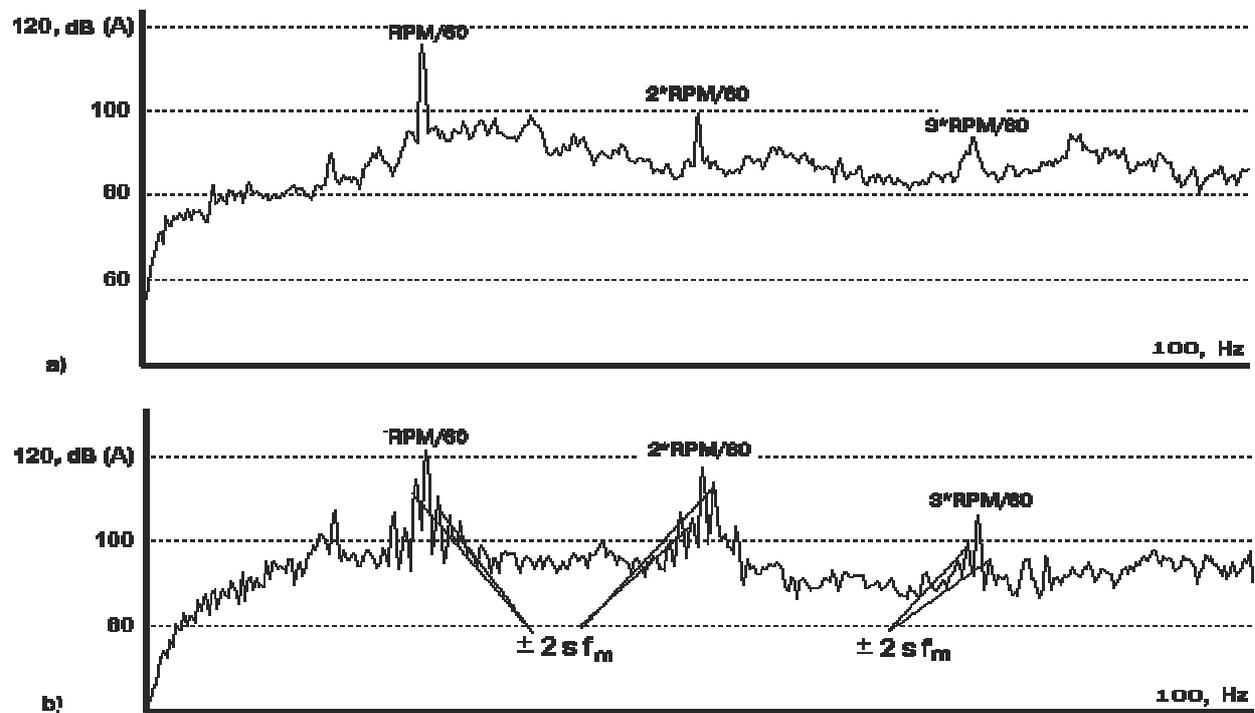


FIGURA 3.6 : ESPECTRO DE VIBRAÇÃO MOTOR DE INDUÇÃO.

O diagnóstico aponta três tipos de defeitos em rotores e seu acoplamento; um rotor desbalanceado, assimetria da rigidez do eixo e pelo arcamento e flexão do eixo ou por defeito do acoplamento. O desbalanceamento do rotor é detectado pelo aumento da vibração na frequência de rotação da máquina, assimetria pelo crescimento da vibração em duas vezes a rotação da máquina, a flexão por múltiplos da frequência de rotação, geralmente de 5 e 7 vezes da rotação nominal.

### 3.4.2 Mancais e seus Elementos

Os mancais, como os elementos girantes e os rolamentos são afetados pelas forças de fricção e forças cinemáticas. Também podem ser atingidos por forças de pequenos choques, provocados por defeitos nos elementos dos mancais. Estes defeitos podem ser detectados, através da frequência. Os elementos envolvidos nesta frequência para cada tipo de defeito podem ser caracterizados, pela: velocidade rotacional dos elementos girantes (esferas), número de esferas, diâmetro do local das esferas (gaiolas) e pelo diâmetro do elemento girante (esfera). Estas dimensões juntas resultam em quatro tipos de defeitos nos mancais: defeito na pista externa do elemento girante, defeito na pista interna do elemento girante, defeito do elemento girante e a frequência fundamental de arraste das esferas trenagem. O anexo 7 apresenta as fórmulas para cálculo da frequência em cada situação.

As forças de fricção surgem nos mancais, devidos a excitarem a alta frequência da vibração. De maneira que esta vibração pode ser provocada pela descontinuidade da lubrificação, ou falta de lubrificação, também pela qualidade do lubrificante. A figura 3.7 e 3.8 apresenta um espectro provocado pelo defeito de lubrificação e ação após lubrificado.

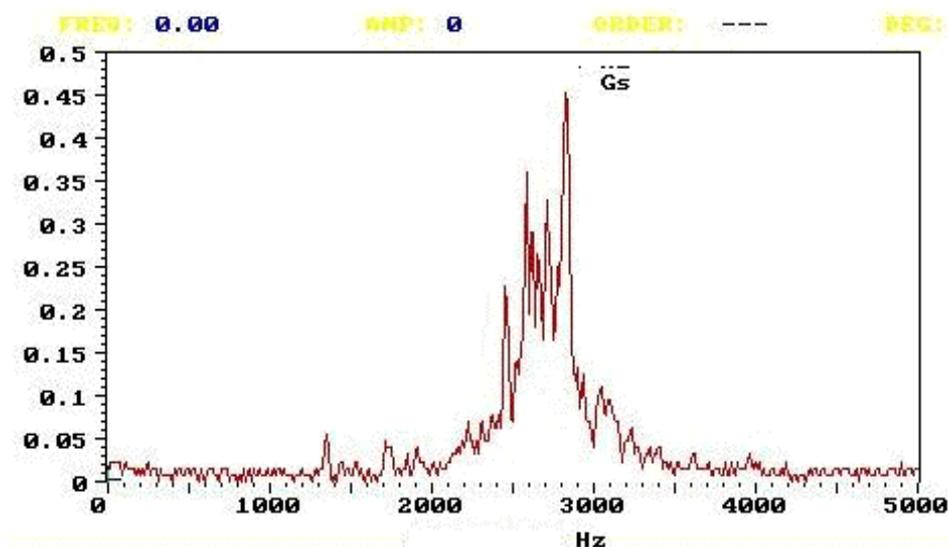


FIGURA 3.7: ESPECTRO FALHA DE LUBRIFICAÇÃO, ANTES DA AÇÃO.

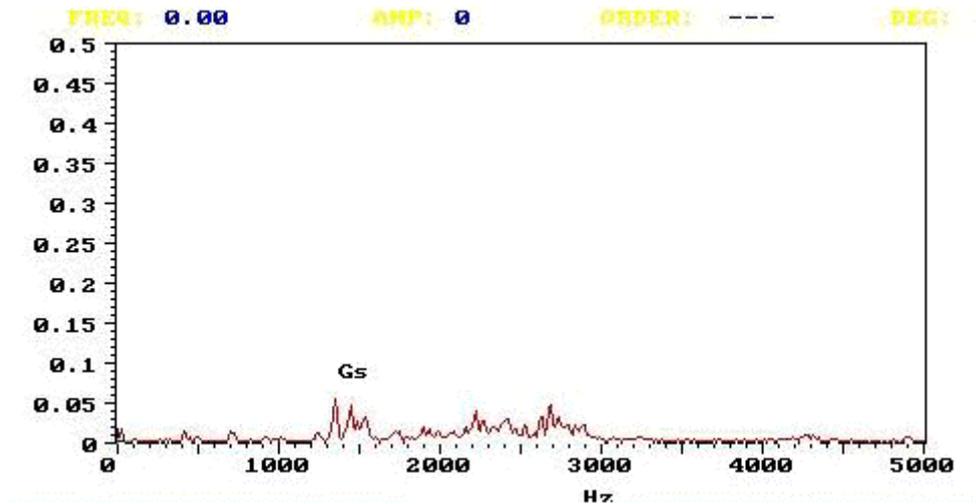


FIGURA 3.8 : ESPECTRO DO MANCAL, APÓS A LUBRIFICAÇÃO.  
Fonte: SKF, 1999.

### 3.4.3 Mancais Planos

Os mancais planos são atingidos por forças cinéticas e forças de fricção, ato originado pela resultante da interação não linear das cargas estáticas com as forças de fricção. Estas forças de oscilação acompanham nos mancais.

O rotor oscila nos mancais de muitas maneiras, na forma da oscilação de um pêndulo em relação à posição de equilíbrio, nos pontos mais baixos dos mancais. O rotor troca a posição de equilíbrio pela, forças de fricção e retorna pela força da gravidade. A razão deste desequilíbrio é a dependência não linear das forças de fricção e da espessura do filme lubrificação que cresce com o desvio da posição do rotor da posição de equilíbrio.

Como regra, a frequência de oscilação troca de RPM, uma vez a rotação do conjunto, para  $1/2RPM$ , com aumento do desgaste para  $1/3RPM$ . A razão desta oscilação pode ser pelo desgaste do mancal, pela falta de lubrificação e pela oscilação do contato na superfície do ponto de fixação[Stevens,1999].

## 3.5 Desbalanceamento e Desalinhamento

O desbalanceamento em máquinas rotativas causa alta vibração, na rotação de giro da máquina, ou seja, na frequência de rotação  $1X RPM$ . Várias são as causas de desbalanceamento nas máquinas rotativas, que contribuem para altas amplitudes, afetando os elementos, alterando forças mecânicas, degradando os componentes e iniciado um processo de desgaste até levar a falha. Estas causas agem individualmente, ou em conjunto. Entre as causas, uma, ou várias, são de origem, problemas no desenho, projeto, fabricação, montagem, testes, instalação

comissionamento, operação e manutenção. O comissionamento é um processo de teste e aceitação de um sistema, linha, construção e outros componente no projeto. A metodologia, para identificar a massa de desequilíbrio e compensar esta massa no elemento tem um custo baixo, relativamente entre 2% a 3% do custo de manutenção do equipamento.

Abaixo apresenta o efeito do desbalanceamento no processo, de uma máquina com, 3600RPM, 20 gramas (0,02Kg), raio do desbalanceamento 30cm (0,3m), com aplicação da equação da força centrífuga (2) [SKF, 1999].

Então, 20gramas em um raio de desbalanceamento de 30cm e 3600RPM provoca uma força centrífuga de 85Kgf. Supondo que os mancais suportam 400kgs. A vida dos mancais reduz próximo aos 50% conforme a equação (4) abaixo.

$$VidaAtual = Vidaprojeto \times \left( \frac{400}{400 + 85} \right)^3$$

$$= 0,56 \text{ Vida do Projeto.}$$

O desbalanceamento ocorre por uma massa, provocado por uma força radial. Há dois tipos de desbalanceamento, o estático e o dinâmico. O estático pode ser detectado no local entre um plano horizontal. O desbalanceamento dinâmico ocorre em mais de um plano. Somente pode ser detectado em rotação, medindo o desbalanceamento. Este valor tem uma amplitude e um ângulo de fase que pode ser corrigido. Após a correção, a resultante das forças centrífuga deve chegar próximo de zero .

O desbalanceamento em ventiladores segue a mesma logística, porém, pode desenvolver outros tipos de desbalanceamento, dependendo do processo em que estão inseridos. A vibração nos ventiladores tem muitas causas e uma pode ser o desbalanceamento. Outras causas, que podem estar incluídas, são a fixação, o eixo flexionado, o eixo torcido, pás do ventilador trincada, e desgastadas, acoplamento desalinhado, defeito nos mancais, problema de rigidez pelo mau contato da superfície de apoio, estrutura do conjunto, desalinhamento das correias, correias frouxas, problema de contato e escorregamento das mesmas[Kuli, 1997].

O conjunto ventilador pode ser afetado pelas vibrações geradas pela sua própria estrutura. Quando o ventilador é montado em estrutura metálica diretamente, existe a possibilidade de uma frequência de vibração correspondente da excitação do ventilador e a frequência natural da estrutura, onde está fixado. Sempre o conjunto ventilador deve estar apoiado em uma plataforma

metálica e este apoiado sobre base de concreto, separado por isolador de, no mínimo, 25mm de altura.

O desbalanceamento deve ser resultado da constituição de seus elementos. As pás do ventilador podem provocar desbalanceamento, devido ao desgaste das mesmas com o tempo, sujidade do processo, efeito do balanço térmico entre a entrada e a saída do fluxo e fixação das pás no rotor. Outro fator importante é sua base de fixação, apoio. O conjunto sempre deve estar apoiado numa estrutura rígida, isolado por amortecedores.

A fonte de vibração gerada pelas pás do ventilador é resultante da freqüência de rotação 1xRPM do ventilador, como apresenta a figura 3.9. A freqüência das pás  $f_p$ , ou múltiplas, é provocada pelo número de pás de que o ventilador é constituído (2 $f_p$ , 3 $f_p$ ), sendo que as freqüências das pás é relacionada com a rotação do conjunto, número de pás e pela freqüência (60Hz), como segue:

$$f_p = [N^\circ \text{ pás} \times RPM / 60]$$

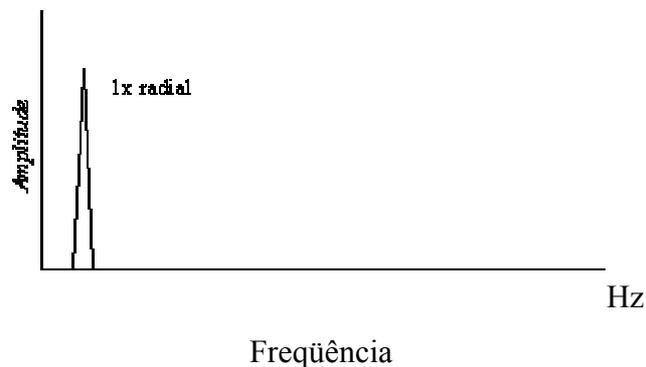


FIGURA 3.9: ESPECTRO DESBALANCEAMENTO.  
Fonte: Duncan, 1996.

O desalinhamento é outra condição, que gera a vibração, além de apresentar na freqüência de rotação da máquina também pode gerar em freqüências múltiplas 2x, 3x a rotação do equipamento. A figura 3.10 apresenta esta situação. Enquanto o desbalanceamento se apresenta na direção radial a nível máximo, o desalinhamento se apresenta máximo na posição axial e a 180° de ângulo de fase em relação ao acoplamento. Ele atua em duas maneiras, angular e radial, sendo que a radial pode ser horizontal, ou vertical, sempre paralela ao centro de giro e a angular, ocorre na horizontal e vertical. O anexo 9 apresenta estas posições. Muitas são as causas que levam um elemento, ou máquina, estar desalinhado, entre elas podem ser citadas, bases das máquinas, motores, acoplamento, mancais, alinhamento das correias e polias.

Os equipamentos que têm estes tipos de desalinhamento, que geralmente são afetados, como bombas, ventiladores e caixa de engrenagens sofrem com algumas semanas de operação com movimentos devido à sua acomodação. Uma espécie de jogo axial, ou jogo final, que não deve ser maior que 3,175mm, segundo norma da General Motors em suas bases. Deve-se retornar alinhar, devido a este movimento. Também esta norma estabelece que em operação, após acomodação, não deve exceder 0,0580mm. A tolerância devido ao alinhamento nos acoplamentos e eixos, segundo a General Motors é conforme a tabela 1 abaixo:

TABELA 3.1: TOLERÂNCIAS EM ALINHAMENTO.

<b>Acoplamento</b>	<b>Rotação RPM</b>	<b>Horizontal, Paralelo e Vertical.</b>	<b>Angular cada 250mm</b>
Curtos	<1000	1,27mm	0,3810mm
Curtos	1800	0,762mm	0,1270mm
Curtos	3600	0,5080mm	0,0762mm
Espaçador	<1000	0.0508mm	A cada 25mm
Espaçador	1800	0.0381mm	A cada 25mm
Espaçador	3600	0.0127mm	A cada 25mm

Comparado com máquinas rotativas, o tempo estimado, para fazer um alinhamento leva entre 3 a 6 horas. Com este tempo, somente no início da operação, os equipamentos rotativos são alinhados, devido a estarem em período de garantia. Somente, ocorre novo alinhamento, quando a troca de posição em relação ao *lay out*. O desalinhamento em eixo, mancais, bases e acoplamento continuam sendo um problema, que cada vez mais preocupa técnicos, que se dedicam à atividade. A figura 3.10 apresenta desalinhamento paralelo, sempre 2X RPM como nível máximo.



FIGURA 3.10 : ESPECTRO DE DESALINHAMENTO PARALELO.

Fonte: Stevens, 1999.

## **4. MONITORAMENTO DA VIBRAÇÃO**

Todos os equipamentos superiores a 5Hp devem ser monitorados, principalmente, equipamentos que comprometam o processo pela sua criticidade. Os critérios são usados para comparar e estabelecer limites máximos. Quando for superior, determina e caracteriza um processo de defeito, ou problema que deve ser analisado. Os níveis indicam uma situação de existência de anomalia, mas não determina qual o diagnóstico e ação a seguir. Este diagnóstico, através do espectro, amplitude e frequência direciona a análise e localiza o problema, podendo assim resultar na melhor ação.

### **4.1 Critérios da Vibração Medição em Nível Global.**

O nível global de vibração para qualquer ponto na máquina deve acompanhar a frequência em relação a sua velocidade rotacional, que pode ser identificada para aquisição do nível de vibração e o espectro de frequência.

- Para máquinas em operação com velocidade abaixo de 1800 RPM, o nível global deve ser requisitado de 5 a 2500Hz.
- Para máquinas em operação acima de 1800 RPM, o nível global deve ser de 5 a 5000Hz.
- Para todas as máquinas em operação o espectro em relação a frequência para registro, deve ser de 5 a 500Hz, quando os problemas forem de desbalanceamento, desalinhamento e na frequência elétrica. Podendo em casos extremos registrar em outras frequências de 5 a 2500Hz, problemas de defeito em rolamento, ressonância em estruturas e problemas de rigidez [ISO2953,1999].

Estes critérios são baseado na frequência mínima de 0,3X rotação do ventilador, 60 000 CPM em velocidade, 1000Hz e 120 000 CPM em aceleração, 2000Hz, onde os problemas de vibração são analisados.

### **4.2 Critérios de Vibração para Motores Elétricos**

Os motores de corrente alternada CA estão classificados de acordo com o seu tamanho e potência. Este trabalho tem como parâmetros de comparação os padrões das normas ISO, conforme a tabela 4.1, 4.2 e 4.3. Os parâmetros de vibração estão classificados em classe e estado.

TABELA 4.1: CLASSE ACEITÁVEL DE VIBRAÇÃO.

Classe	Estado
A	Bom
B	Satisfatório
C	Não Satisfaz
D	Não Aceitável

A norma ISO10816 estabelece os padrões equivalentes a ISO3945, permanece o nível de frequência estabelecido em *rms* e amplitude de vibração. As classificações das máquinas em níveis pela potência do motor e amplitude, não excedendo de 45 mm/s para ISO10816-1. Esta tabela foram comparados os valores globais medido para cada máquina no objeto de estudo.

TABELA 4.2: SEVERIDADE DA VIBRAÇÃO ISO 3945 E ISO 10816-1.

Severidade da Vibração Radial	Classe das Máquinas			
Velocidade em RMS 10-1000 Hz, mm/s.	Class I	Class II	Class III	Class IV
0.28	A	A	A	A
0.45				
0.71				
1.12	B	B	B	B
1.80				
2.80	C	C	C	C
4.50				
7.10				
11.20	D	D	D	D
18				
28				
45/71				

TABELA 4.3: CLASSIFICAÇÃO DAS MÁQUINAS.

<b>Classes Máquinas ISO 3945</b>	
Class I	Até 20 HP (pequenas)
Class II	(20-100 HP) Médias
Class III	(600-12,000 RPM) 400 HP Grandes, rígidas.
Class IV	(600-12,000 RPM) 400 HP Grandes flexível

#### 4.2.1 Critérios de Balanceamento para Motores Elétricos

Todos os motores acima de 5HP devem ser balanceados em operação com velocidade final de vibração, conforme ISO1940 a tabela 4.4 apresenta os limites.

TABELA 4.4: LIMITES BALANCEAMENTO MOTORES.

Velocidade do Motor (RPM)	Vibração Máxima (mm/s, RMS).
900	0,360
1200	0,467
1800	0,718
3600	0,718

#### 4.2.2 Critério de Vibração no Espectro

Com relação ao espectro, os motores seguem a análise, conforme a tabela abaixo. Análise do espectro deve ser realizada na banda 1 (0.4 a 0.5), na velocidade de rotação do motor (1X), duas vezes a velocidade rotacional (2X). Outra rotação menos expressiva 2X a frequência elétrica (120Hz). A tabela 4.5 mostra no espectro as frequências dos componentes do motor e sua amplitude[NEMA MG-1,1998].

TABELA 4.5: CRITÉRIO DE VIBRAÇÃO PARA MOTOR ELÉTRICO.

Fonte: NEMA,1998.

<b>Frequência (X RPM) Componente Motor</b>	<b>Amplitude Máxima (mm/s RMS)</b>
0.4 - 0.5	Não detectado
1X	Especificação de Balanceamento do Motor
2X	0,360
Harmônicos (NX)	Não detectado
Mancais de Rolo (Cilíndrico)	Não detectado
Bandas Secundárias	Não detectado
Armadura do Rotor/Fendas do Estator	Não detectado
Frequência Elétrica (60 Hz)	Não detectado
2X Frequência Elétrica (120 Hz)	0,360

#### 4.2.3 Vibração Máxima em Motores Elétricos em Função da Banda.

A vibração em motores elétricos de corrente alternada são freqüentemente encontradas e realçadas nas três bandas iniciais. Nas bandas as frequências indicam o início do processo de vibração, devendo mostrar a real condição do motor.

Geralmente ocorrem por problemas da própria construção interna e de parâmetros elétricos. Também podem ser atingidos pelas forças de excitação dos elementos onde faz parte os conjuntos. A tabela 4.6 estabelece os limites de vibração em função da banda por tipos de motores.

TABELA 4.6: VIBRAÇÃO MÁXIMA PERMITIDA PARA MOTORES ELÉTRICOS.

LIMITES DE AMPLITUDE DE VELOCIDADE NA BANDA				
BANDA	ESCALA DE FREQUÊNCIA (CPM)	NORMAL (MM/S - RMS)	ESPECIAL (MM/S - RMS)	PRECISÃO (MM/S - RMS)
1	0.3 x RPM 0.8 x RPM	0.72	0.72	0.36
2	0.8 x RPM 1.2 x RPM	1.34	0.72	0.36
3	1.2 x RPM 3.5 x RPM	0.72	0.72	0.18
4	3.5 x RPM 8.5 x RPM	0.54	0.54	0.18
5	8.5 x RPM 60,000 CPM	0.54	0.54	0.09
6	60,000 CPM 120,000 CPM	0.54	0.54	0.09
LIMITES DE AMPLITUDE DA ACELERAÇÃO NA BANDA				
Banda	ESCALA DE FREQUÊNCIA (CPM)	NORMAL (G'S RMS)	ESPECIAL (G'S RMS)	PRECISÃO (G'S RMS)
1	0.3 x RPM - 120k	0.35 - 3.43m/s <sup>2</sup>	0.35 - 3.43m/s <sup>2</sup>	0.17 - 1.17m/s <sup>2</sup>

#### 4.2.4 Critérios no Espectro para Motores Elétricos.

Os motores devem ser analisados nos seguintes espectros de vibração.

- Desbalanceamento (1X RPM);
- Desalinhamento (2X RPM);
- Problema de Fixação, Ressonância e Defeitos em mancais planos (NX RPM);
- Na frequência de rotação (60 ou 120 Hz para CA) Problemas Rotor e Estator;
- Defeitos em mancais entre 0.4X RPM a 0.5X RPM da velocidade operacional.

A norma ISO 1940 e NEMA MG-1 complementam estes parâmetros. O anexo 6 e 10 apresenta alguns espectros típicos de motores de indução.

#### 4.3 Acionamento Ventilador por Correias.

Os limites de vibração para ventiladores são analisados pela tabela 4.7. Estes valores unitários prevalecem para todos os tipos de ventiladores. Esta tabela representa o nível global de vibração em *rms*.

Para balanceamento deve ser usado mecanismo de fixação tipo solda e parafusos. Os parafusos devem ser usados com porcas e arruelas. No caso dos ventiladores centrífugos pode ser

usado solda, ou grampo metálico (chapa de aço carbono). O grampo é mais aconselhável, devido a ser rápida sua fixação. Também, facilita sua fixação pelo formato das pás e pelo movimento rotacional, onde cria um assento positivo do grampo contra as pás dos ventiladores.

O acesso ao ventilador, para balancear, deve ser previsto no projeto, desenho e construção. Quando novo, é recomendado que o componente rotor, eixos e luvas sejam balanceados individualmente, e após a montagem com todos os elementos juntos.

Para sistemas ressonantes em ventiladores, a frequência natural do sistema montado da unidade de ventilação não seja excitada na velocidade de rotação. Para que isto, não ocorra a frequência natural do sistema deve ser afastada 25% da velocidade nominal do ventilador. O sistema é dito ressonante na condição da amplitude de vibração e na troca de fase causada pela resposta de um correspondente sensível para uma frequência de força específica. A ressonância é tipicamente identificada por um aumento substancial da amplitude e relativa troca de fase, conforme apresentado pelo anexo 8 [Goldmann,1999].

A escala de frequência que deve ser seguida a vibração para um ventilador é conforme a tabela 9. A frequência mínima relatada deve ser 0,3 X a velocidade corrente. A vibração deve ser medida na frequência mínima de 1000 Hz em velocidade e 2000 Hz para aceleração[ISO11342,1998 e ISO1940-1,1986].

TABELA 4.7: LIMITES DE VIBRAÇÃO VENTILADOR ACIONAMENTO POR CORREIAS.

<b>Frequência da Banda</b>	<b>Amplitude Máxima Vibração (mm/s RMS)</b>
Nível Global (10-1000 Hz)	2,7
1X RPM	1,8
2X RPM	0,72
Harmônicos	<b>0,54</b>
Frequência da Correia	Não detectado
Defeito em Mancais	Não detectado

#### 4.3.1 Vibração Máxima Permitida em Função da Banda.

TABELA 4.8: NÍVEIS MÁXIMOS DE VIBRAÇÃO PERMITIDOS PARA VENTILADORES EM FUNÇÃO DA BANDA.

BANDA	ESCALA DE FREQUÊNCIA	VELOCIDADE LIMITE DA BANDA (mm/s, RMS)
1	0.3 x RPM min 0.8 x RPM Ventilador	0.718 Acoplamento Direto 1.34 Acionamento Correia
2	0.8 x RPM Ventilador 1.2 x RPM Vent/motor	1.34
3	1.2 x RPM Vent/motor 3.5 x RPM Vent/motor	0.718
4	3.5 x RPM Vent/motor para Fmax = 60,000 CPM	0.540
		Aceleração Global, Limite de Amplitude na Banda. (G's ou 4,9m/s <sup>2</sup> )
1	0.3 x RPM min Para Fmax = 120,000 CPM	0.5

Os limites aceitáveis de amplitude global em função da banda em forma grafica são apresentadas pelas figuras 4.1 e 4.2. Amplitude em velocidade (mm/s), permitindo níveis de 1,9 para banda 1 e 2, níveis de 1,0 para banda 3 e níveis de 0,07 para banda menos expressiva.

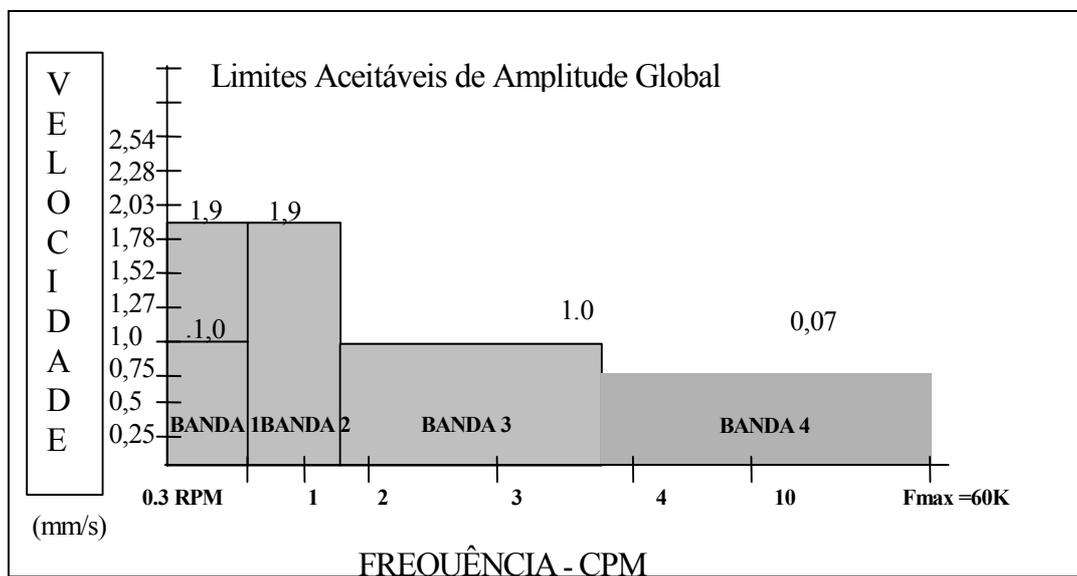


FIGURA 4.1: LIMITES ACEITÁVEIS DE AMPLITUDE VELOCIDADE PARA VENTILADOR.

Para amplitude em aceleração, predomina 4,9 m/s<sup>2</sup> o nível para banda 1. O nível de aceleração global é a mesma para uma frequência máxima de 2000Hz.

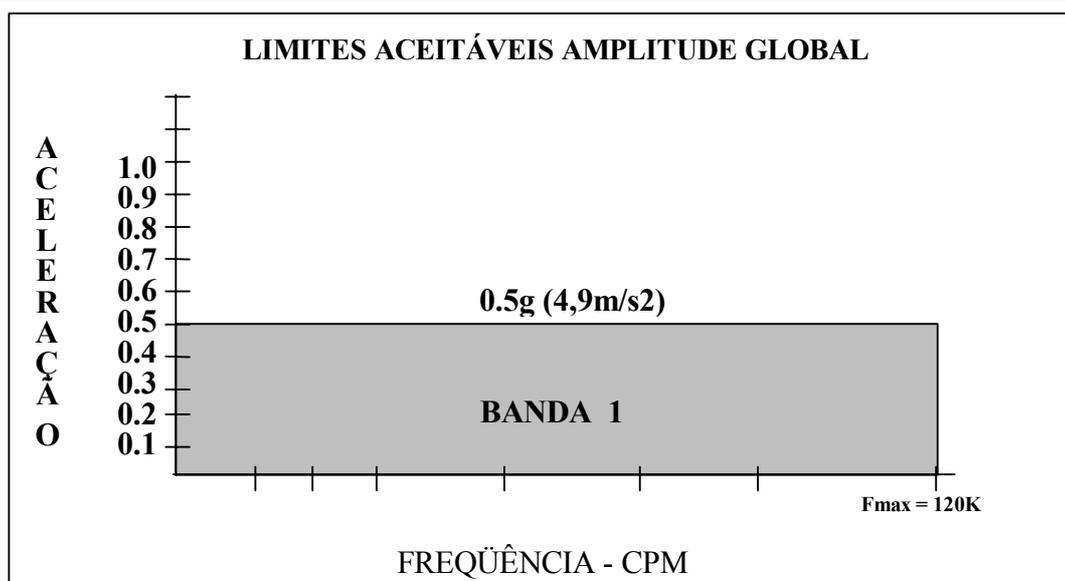


FIGURA 4.2 : LIMITES ACEITÁVEIS DE AMPLITUDE ACELERAÇÃO PARA VENTILADOR.

#### 4.4 Local de Monitoramento da Vibração.

Todos os conjuntos, ou equipamentos rotativos, devem ter o ponto específico de análise. Este ponto é conhecido e pode ser identificado com disco fixo com diâmetro de no mínimo 25mm, para facilitar o contato pode ser de material magnético. Este ponto deve ser na estrutura, na posição rígida do elemento em análise. Sempre devem ser evitados, os locais não rígidos, parafusos, ou chapas de proteção flexíveis.

Nos ventiladores podem ser instalados nas posições e direções radial, axial e vertical. Nestas direções os mancais devem ser monitorados. O contato do sensor com disco e posição no mancal deve ser perpendicular à linha de centro de acionamento. Sempre formando um ângulo de 90° entre as posições de referências.

O local de identificação do monitoramento deve ter uma seqüência numérica ou alfabética, sempre na direção da potência de fluxo (trabalho). O ponto 1, ou A, sempre no mancal de apoio da máquina principal do sistema. O ponto final localizado no último mancal que sustenta, próximo ao último elemento do conjunto (D). A figura 4.3 abaixo apresenta este fluxo.

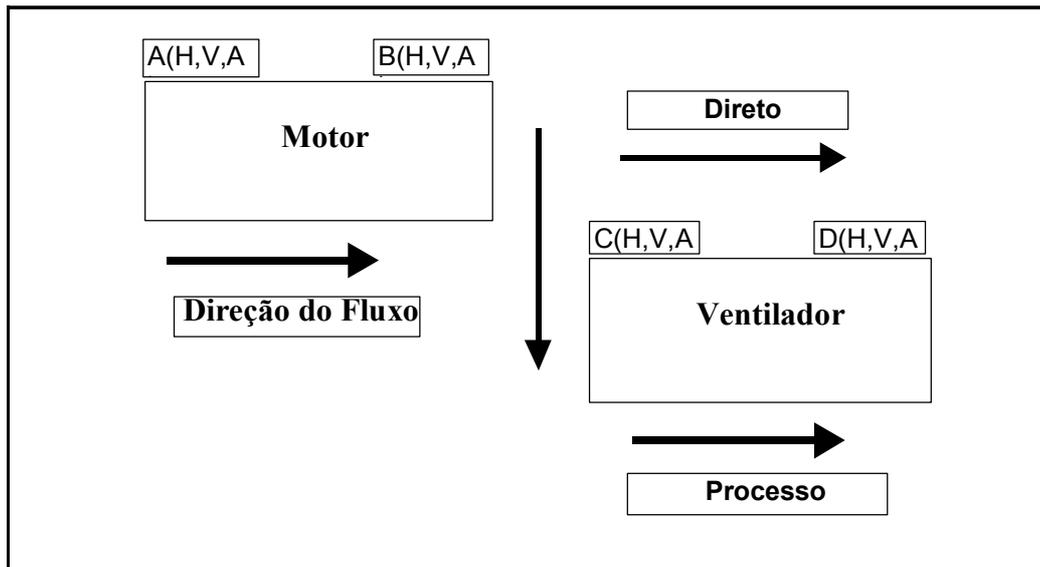


FIGURA 4.3 : DIREÇÃO DO FLUXO E SEQÜÊNCIA DAS POSIÇÕES.  
Fonte: ISO10816-1,1995.

#### 4.5 Transdutor

Os transdutores de vibração são acelerômetros usados, para coletar dados de uma máquina, para obter grau de conformidade com relação a um padrão. Um dispositivo que converte energia de uma forma para outra. O termo é geralmente aplicado para dispositivo que leva fenômeno físico (pressão, temperatura, umidade, fluxo, força) e converte para um sinal elétrico. Este sinal elétrico indicado é proporcional à força de saída do local de medição, convertendo em sinal de vibração, por exemplo.

O acelerômetro deve ser selecionado, em função da freqüência mínima e freqüência máxima de uma escala de freqüência específica, ou seja, que pode ser usado. Sua massa deve ter influência mínima na freqüência de resposta do sistema. A massa típica de um acelerômetro montado não deve exceder os 10% da massa dinâmica da estrutura na qual o acelerômetro está montado.

Um transdutor, tem um sinal de saída que geralmente é elétrico e este sinal é diretamente proporcional à força de aceleração. A saída é usualmente produzida pela força aplicada para um cristal piezoelétrico, o qual gera uma corrente proporcional em sinal de vibração. Esta corrente é então amplificada e disponibilizada em forma de onda no tempo, ou processada por uma FFT, para produzir a freqüência. A integração simples do sinal de aceleração produz a velocidade e duas vezes a integração do sinal simples produz o deslocamento [Goldmann,1999].

#### 4.6 Medida de Vibração na Direção dos Eixos

4.6.1 Direção Horizontal (H), posição paralela ao eixo de rotação da máquina, ou paralela à base de fixação. Também conhecida como direção radial. Nesta direção a vibração indica possíveis problemas de desbalanceamento

4.6.2 Direção Vertical (V), posição perpendicular ao eixo de rotação.

4.6.3 Direção Axial (A), posição paralela ao eixo de rotação da máquina, medida longitudinal.

A figura 4.4 apresenta a posição em relação aos eixos .

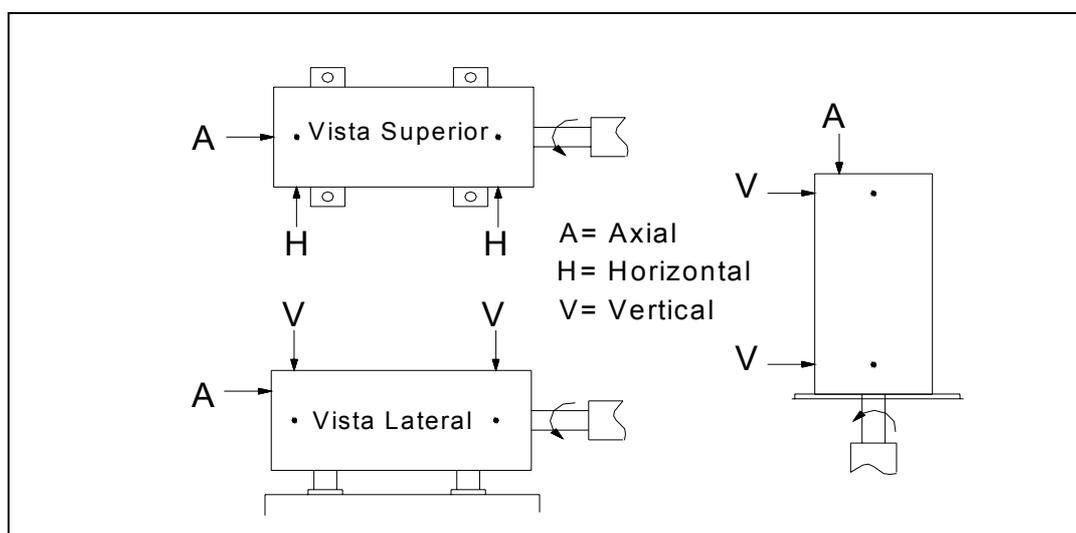


FIGURA 4.4 : MEDIDA DE VIBRAÇÃO NA DIREÇÃO DOS EIXOS.

Fonte: ISO10816-1,1995.

#### 4.6.1 Unidades de Medidas de Vibração.

A tabela 4.9 apresenta as unidades geralmente usadas nos processos de medição de vibração. Predominantemente, para frequência, é usada Hertz – Hz, (ciclos/s), Velocidade em mm/s, Deslocamento mm ou  $\mu\text{m}$  e Aceleração em  $\text{m/s}^2$ , ou em G's (quanto da aceleração da gravidade).

TABELA 4.9: UNIDADES DE MEDIDA DE VIBRAÇÃO.

Fonte: API670,1993.

Frequência	Hertz-Hz (ciclo/s) ou Ciclo/Minuto (CPM)	
Velocidade Rotacional	Revoluções por Minuto (RPM)	
AMPLITUDE	MÉTRICO	* RMS
• Deslocamento	mm ou $\mu\text{m}$	"
• Velocidade	mm/s	"
• Aceleração	$\text{m/s}^2$	"
• Decibéis	dB	"
* Raiz Quadrática Média (RMS)	G's ou ( $9,8 \text{ m/s}^2$ )	"

Outros valores podem ser medidos, como o Pico. Neste trabalho não será usada esta unidade. O "Pico" e "Pico-a-Pico" medindo amplitude de vibração seria um cálculo não do pico e sim do verdadeiro pico. O cálculo do pico deriva do *rms*. Somente é válido para uma pura onda senoidal.

$$\text{Pico (P)} = 1.414 \times \text{RMS.}$$

$$\text{Pico a Pico (P-a-P)} = 2 \times (\text{P}) = 2 \times 1.414 \times \text{RMS.}$$

Na relação linear a unidade de amplitude em decibéis pode ser representada em função da frequência em um ponto. A escala logarítmica representa amplitude em decibéis que pode ser expressa em aceleração, velocidade e deslocamento. Segundo a IEC, as unidades coincidem em frequência de até 160Hz, ou aproximadamente 10 000 RPM.

- $1\text{m/s}^2 = 120 \text{ dB}$  de vibração em aceleração.
- $1\text{mm/s} = 120 \text{ dB}$  de vibração em velocidade.
- $1\mu\text{m} = 120 \text{ dB}$  de vibração em deslocamento.

#### 4.7 Limites das Bandas e Amplitude Global.

A vibração pode ser analisada em termos de nível de banda. A função principal é dividir a frequência em bandas e comparar amplitude desta banda com padrão estabelecido. A frequência mínima e máxima de cada banda define em unidades de frequência da velocidade rotacional da máquina, ou componente em análise. As bandas são definidas em Banda 1, com frequência de  $(0,3 \text{ a } 0,8)\text{X}$  da rotação do componente, Banda 2  $(0,8 \text{ a } 1,2)\text{X}$  e Banda 3  $(1,2 \text{ a } 3,5)\text{X}$  da rotação do equipamento. A figura 4.5 apresenta estas bandas. Em casos específico, como motores ou componentes de precisão, podem ser definidas outras bandas.

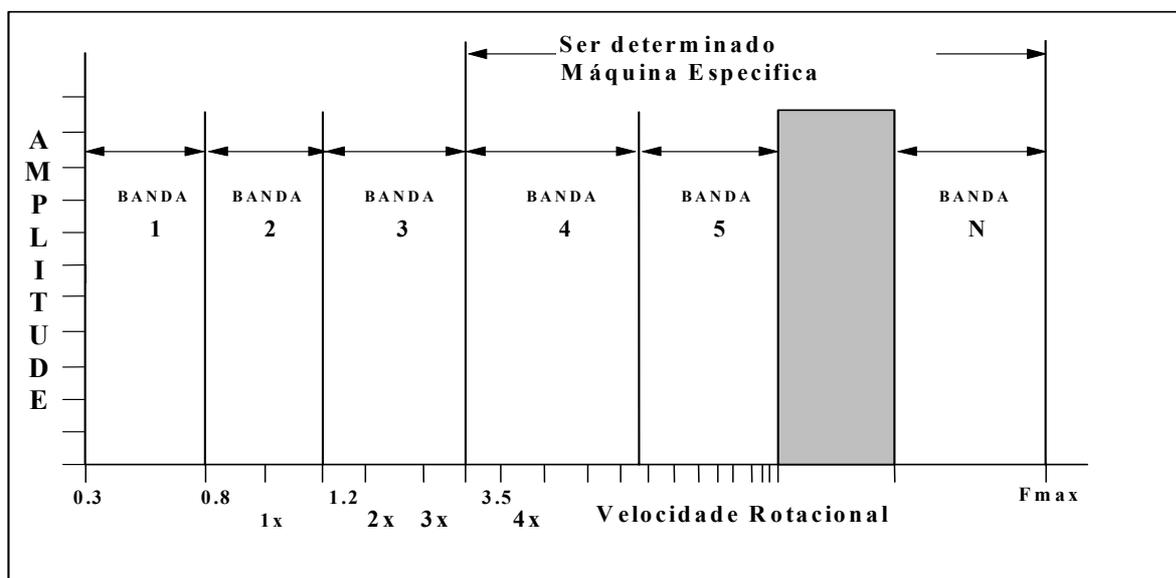


FIGURA 4.5 : FREQUÊNCIA DAS BANDAS.

O limite aceitável de amplitude em uma Banda é definido pela equação (1) . Esta equação mede, no mínimo, 5 linhas de resolução. A resolução ocorre com a frequência mínima e máxima.

Aplicação desta equação está na apresentação da tabela 15 e anexo 4.

#### 4.8 Lista de Equações

##### Equação do nível global de vibração na banda:

A = vibração global na banda.

A1 = primeira linha de resolução na banda.

I = última linha de resolução na banda.

N = número de linhas na banda.

1.5 = Fator de Janela para Janela Hanning.

$$A = \sqrt{\frac{\sum_{I}^N A^2}{1.5}}$$

(1)

##### Equação do cálculo da força centrífuga:

m = Massa desbalanceamento (kg).

r = Raio do desbalanceamento (m).

f = Velocidade rotacional (Hz)

g = Aceleração da gravidade 9,8m/s<sup>2</sup>

U = Desbalanceamento kg x m ou g x mm.

F = Força centrífuga (Kgf).

$$F = mA = mrW^2 = \frac{mr(2\pi f)^2}{g}$$

(2)

**Equação do Desbalanceamento:**

$$U = m \times r$$

(3)

**Equação do cálculo de vida para rolamento de esfera:**

VA = Vida atual;

VP = Vida de projeto, fornecido pelo fabricante;

CM = Carga do mancal, fornecido pelos fabricantes de rolamentos;

$$VA = VP \times \left( \frac{CM}{CM + F} \right)^3$$

(4)

**Equação correção de massa em desbalanceamento:**

MC = Massa de correção.

MT = Massa de teste.

Vo = Velocidade antes da correção.

Vt = Velocidade com a massa de teste.

$$MC = MT \frac{Vo}{Vt}$$

(5)

## 5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A metodologia para a realização do trabalho tem enfoque de usar a confiabilidade - RCM e fazer levantamento do nível de vibração em máquinas rotativas do processo fabril nas linhas de pintura. Para estas medições propõe-se comparar com os critérios padrões do equipamento. Todos os critérios de vibração têm como guia a norma ISO e o valor de amplitude global em m/s, m/s<sup>2</sup> ou  $\mu\text{m}$  em RMS.

### 5.1 Estudo de Caso.

Também são analisados o nível de vibração, que se encontram, através do resultado das medições, o espectro da vibração e detectar em que rotação a vibração está ocorrendo. Na análise da FFT será usados a janela *Hanning* e o tempo de amostra de, no máximo, 1 segundo. Serão verificadas as ações a serem tomadas em função deste nível de vibração (diagnóstico) e retornar a medir, para certificar o nível de vibração especificado (monitorar). A partir daí, monitorar a tendência deste nível, através de uma frequência de inspeção específica, em função do comportamento do equipamento no processo.

Os pontos que serão analisados estão nas direções triaxiais, axial, horizontal/radial e vertical. Na direção horizontal e vertical sempre perpendicular ao plano de medição e na axial paralelo ao plano de medição.

O tipo de acionamento destas máquinas é direto por acoplamento e indireto acionamento por correias. Para acoplamento direto, serão medidos na posição dos mancais do motor elétrico, frente e traseira do motor, sendo três pontos de medição para cada mancal. Para acionamento por correias, serão medidos, além dos dois mancais do motor elétrico, os mancais de apoio e sustentação do eixo ventilador, sendo, portanto, três pontos para cada mancal, totalizando a possibilidade de 11 pontos de medição para cada conjunto motor e eixo do ventilador.

No processo de medição, serão levantados o nível global de vibração em *rms* (*root mean square*) e as amplitudes de aceleração em m/s<sup>2</sup> ou G's (quanto da aceleração da gravidade), velocidade em m/s e o deslocamento em micros por metro em função da frequência.

Todas as medições serão registradas em uma planilha individual, onde serão destacados as características principais do motor e ventilador. Destacando a posição no mancal, a direção de vibração e seu respectivo espectro. Um croqui representa o conjunto motor e ventilador com as respectivas posições e as direções das vibrações. A medida de vibração é o principal parâmetro

utilizado em manutenção pela condição. Aqui o processo vai se estender como os tipos de falhas se apresentam nestes equipamentos e seus componentes, usando a metodologia do RCM. Comprovar análise de vibração como uma técnica de confiabilidade para manutenção do ativo. Mostrar através de gráficos e tabelas os resultados das medições, estabelecer indicadores e a frequência de análise. Propor a implantação desta técnica em equipamentos rotativos.

Um analisador de vibração será usado para medição com escala de aceleração até 200 m/s<sup>2</sup>, velocidade até 200 m/s, deslocamento até 10mm, sensor de 100 Hz até 20000 Hz. Também, acompanha um computador portátil, para visualizar os espectros, fornecido pelo *soft pico for windows*, uma placa de aquisição AC/DC tipo ADC100 para aquisição dos dados e um acelerômetro de  $\pm 5V$ [Tecnikao,2000]. Contador de rotação ou giro do motor, multiteste, para aferir nível de tensão, indicador de temperatura, para relatar a temperatura dos mancais e dois mantenedores, para auxiliar no processo e aprendizado. Abaixo, a figura 5.1 mostra o sensor, o ponto de medida, analisador, placa AC/DC, computador com *soft* e interligação com cabos e conexão.

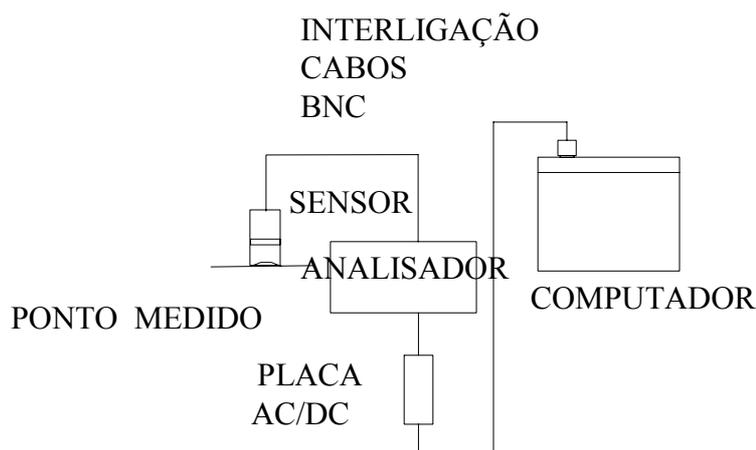


FIGURA 5.1: ESQUEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS.

## 5.2 Tecnologia de Manutenção no Processo.

A pintura trabalha com vários equipamentos e agregados, formando um sistema contínuo. Os equipamentos que fazem parte deste sistema não podem falhar a qualquer momento. Há um sincronismo um com o outro, formado pelo tempo de processo, determinado para qualquer conjunto, ou peça, em função do seu tamanho. O sistema de transporte, que deslocam os conjuntos para sistema de pintura, determina a velocidade do processo. Este transporte é conduzido por um sistema de correntes, carros, suportes para fixação dos conjuntos a serem pintados. Os conjuntos trafegam pela carga, tratamento de superfície, secadores, resfriadores, cabines de pintura, secadores de cura e descarga.

### 5.2.1 Tecnologia do Processo Atual.

Qualquer processo, ou técnica, pode ser monitorado, através dos resultados dos indicadores de performance. Estes indicadores podem ser comparados com outros que determinam a melhor marca, chamado de *Benchmark*. A tabela abaixo caracteriza alguns indicadores do processo de manutenção, envolvendo equipamentos de pintura e utilidades.

A inspeção termográfica no processo é executada anualmente, sempre no período de maior ocupação dos equipamentos. Este indicador é formado da percentagem encontrada em termografia, relacionada com o número de falhas encontradas, sobre o número de dispositivos pesquisados. Esta técnica permite reduzir o tempo de serviço de 3 a 4 dias para algumas horas, custos e planejamento da manutenção. Anexo 14 apresenta imagem térmica de um motor elétrico

A análise de lubrificantes é executada em óleos hidráulicos e de caixas, sendo analisado a tendência parâmetros de: viscosidade, água, metais, insolúveis, oxidação, componentes para processo de investigação, como a ferrografia. A troca somente ocorre, quando não há recuperação da viscosidade, limites extremos de insolúveis e a não recuperação através da filtragem e centrifugação. Esta técnica permite alongar os volumes superiores há 140 meses.

O monitoramento elétrico predomina por várias atividades conjuntas, sendo destacada: proteção dos sistemas, através da seletividade, aferição de parâmetros elétricos e aterramento elétrico. Estas técnicas evitam paradas momentâneas e auxiliam no processo de manutenção. A tabela 11 apresenta, onde a tecnologia está sendo aplicada:

TABELA 5.1: TECNOLOGIA NO PROCESSO. FONTE JDB.

<b>TECNOLOGIA</b>	<b>EQUIPAMENTO</b>	<b>INDICADOR</b>	<b>BENCHMARK</b>
Termografia 100% dos Equipamentos	Componentes, Proteções, Instrumentação, Transformador Elétrico, Motores, Barramento, Aquecedores.	Relatório de Não- Conformidade. Sistema de pintura participa com 5% do total de problemas.  <b>&lt;1.2%</b>	<b>&lt;3%</b>
Análise de Lubrificante	Máquinas e Equipamentos de todo o processo fabril instalado. Volume > 20Lt.	Análise de Tendência. (anexo 15) Contagem de Partículas. <b>&lt;0.5%</b>	<b>&lt;2%</b>
Monitoramento Elétrico	Teste de isolamento, Aterramento elétrico, Teste da proteção e Seletividade. Subestações e Pintura.	<b>2.3%</b>	<b>&lt;5%</b>
Análise De Vibração	<b>Rotativos</b>	<b>?</b>	<b>?</b>

### 5.2.2 Administração do Processo Atual Pintura

O processo atual tem como documento básico para todas as atividades, tanto para ações preventivas e corretivas a ordem de serviço (OS) via eletrônica. O uso deste documento é a prova da realização da tarefa programada, podendo ser de reparo não-programado, até execução de um plano preventivo. O volume dos serviços programados, via ordem eletronicamente, ultrapassa de 500 programas por ano. Esta programação solicitada, através da OS, em programas preventivos e preditivos.

O indicador de manutenção preventiva tem base nos trabalhos programados em manutenção preventiva (horas trabalhadas), sobre um total de horas preventiva mais corretiva. O indicador de corretiva tem o mesmo enfoque, horas trabalhadas em corretiva sobre horas trabalhadas em corretivas mais preventivas. Todos os meses há um número de trabalhos abertos no sistema, que fica disponível em um período de um mês chamado de *Logbook*. O *Logbook* são serviços pendentes, em atrasos cobrados pelo programa eletrônico de manutenção. Substitui o *Backlog* de todos os serviços abertos e ainda pendentes, para serem realizados.

As horas extras são horas programadas que o processo de manutenção exige fazer em regime extraordinário. Estas horas têm base no número de horas trabalhadas em regime extraordinário sobre o total de horas trabalhadas.

A manutenção preditiva, ou pela condição, está baseada, nos equipamentos atingidos por monitoramento. Este monitoramento tem como o número de equipamentos (itens) em programas preditivos sobre um total previsto (candidados) de equipamentos em técnicas de monitoramento.

TABELA 5.2: INDICADOR E *BENCHMARK*. FONTE JDB.

<b>ATIVIDADE</b>	<b>AÇÃO</b>	<b>INDICADOR</b>	<b>BENCHMARK</b>
Ordem de Serviço	Programada	500-600	> Possível.
Manutenção Preventiva	Planejada	74,6%	>70%
Manutenção Corretiva	Emergência	25,4%	<30%
Hora Extra	Programada	3,8%	< 5%
Manutenção Preditiva	Condição	70%	100%
Taxa Falha e Entre Falhas	2f/12anos	12 Anos (12H)	20Anos (8H)

As perdas no sistema são de três conjuntos de Motor Ventilador Insuflamento por Acionamento Direto. Um conjunto de treze (13) equipamentos com potencial de falha. A figura 5.2 abaixo mostra a perda de ativos pelo não-monitoramento das condições. Este quadro potencializa as perdas, afetando os parâmetros de processo. Mesmo assim, pelas categorias das ocorrências, este nível de falhas é baixo ou ocasional 1/2200 a 1/8000.

Evento da Falha	Modo de Falha	Frequência	Impacto	Perdas
Falhas Ventiladores, Insuflamento	Falha no Rotor, pás trincadas.	15Falhas/12 Anos	\$2.000/falha	Aproximado \$30.000/12anos



FIGURA 5.2: FALHAS EM VENTILADORES. FONTE, JDB.

### 5.3 Medida de Vibração.

A vibração deve ser medida com mais severidade possível. Ela deve indicar com precisão os dados da fonte que está sendo aferida. A qualidade dos dados segue em função das características disponíveis dos analisadores de vibração.

#### 5.3.1 Medida com Acelerômetro.

A medida com acelerômetro para aquisição dos dados, recebe sinal do sensor e tem escala de  $\pm 5V$  em corrente contínua (CC). Com este sensor, os registros dos dados coletados têm as seguintes características:

- Escala de medida do espectro, Linear;
- Amplitude em Volts (V);
- Janela *Hanning* (ver função janela);
- FFT número de linhas mínimo de 512 e máximo de 1024 resoluções;
- Unidade de Medida usada, *rms*;
- Tempo de amostra do espectro 1 segundo (1s);
- Escala dinâmica com escala de  $\pm 50mV$ ;
- Número máximo de amostra por traço 8000;
- Leitura máxima por amostra 12.

O acelerômetro possui uma amplificação interna, que compensa a resistência do cabo espiral, podendo medir distância de até 20m. O sensor de cristal está inserido no interior de uma peça de aço Inox ASTM 316, medindo 35mm x 45mm e possui base magnética para superfície plana e arredondada para uso em mancais. Sua resposta em frequência é linear na faixa de 5.0Hz a 10.000Hz, com ressonância em aproximadamente 20.000Hz.

### 5.3.2 Função Janela.

As janelas Hanning, Hamming e Blackman tem forma fixa são plotadas em um diagrama oposto. Conforme a figura 5.3 é comum que todos os dados da função janela, são simétricos na linha de centro, onde ( $n=0$ ) e tem um valor máximo de 1 e mínimo em direção a zero em ambos os lados.

O quadro abaixo define o valor da função de amostra  $W_n$  de cada função janela, para valor de  $n$  entre  $-m$  e  $+m$ , dando  $2m + 1$  no total dos pontos da amostra.

<b>Tipo de Janela</b>	<b><math>W_n</math></b>
Hanning	$0.5 + 0.5 \cos[n \pi / (m + 1) ]$
Hamming	$0.54 + 0.46 \cos (n \pi / m)$
Blackman	$0.42 + 0.5 \cos (n \pi / m) + 0.08 \cos (2 n \pi / m)$

Existem vários tipos de janelas e algumas que podem ser citadas: retangular, triangular, gaussiana, parzen, kaiser, blackmann, hamming e hanning. Neste trabalho foi priorizado uso da janela hanning, que reduz a perda na determinação do espectro da frequência do sinal da amostra e do filtro digital. Em resumo, a janela hanning tem uma redução mínima de amplitude,

comparada com as outras funções janelas de forma fixa e transmite a melhor energia de vibração através da amostra.

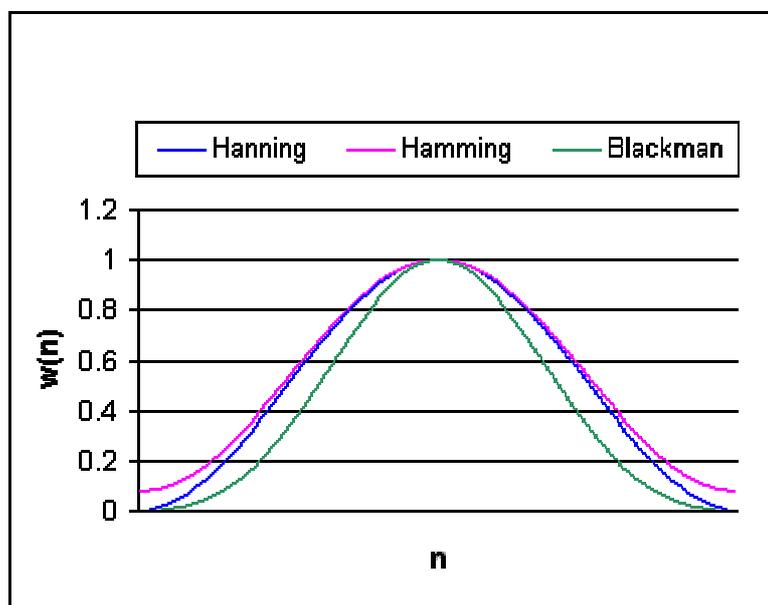


FIGURA 5.3 : FUNÇÃO JANELA.  
Fonte: Processando Sinal Digital, 1996.

### 5.3.3 Registro do Nível Global de Vibração

Os valores gerais registrados devem ser maiores que 2mm/s de amplitude para a vibração, de 0,5G's, ou 4,9 m/s<sup>2</sup> de amplitude de aceleração e deslocamento superior a 50  $\mu$ m de amplitude máxima. Parâmetro usado é a norma ISO e a unidade em *rms*. Estes valores também indicam a necessidade do registro do espectro. Os registros de nível global são transcritos para uma planilha com as seguintes características:

A identificação:

- Código do equipamento e descritivo;
- Local e Processo;
- Regime de operação e início no sistema;
- Data da análise;
- Croqui demonstrativo dos pontos de medição e orientação dos eixos de medidas.

Dados físicos:

- Capacidade;
- Medida do eixo ventilador;
- Quantidade de pás do ventilador;

- Temperaturas dos mancais e ambiente (medir, quando mancal for o problema);
- Freqüência de análise.

Características Elétricas:

- Potência;
- Rotação na Placa e rotação em operação;
- Número de Pólos;
- Tensão em volts nas fases;
- Corrente de cada fase;
- Aterramento elétrico.

Parâmetros de medição da vibração:

- Pontos de medição, local onde o sensor é apoiado para medida de vibração (A,B,C e D) e segundo levantamento de dados (A1, B1, C1 e D1) sucessivamente;
- Orientação nos eixos: A (Axial), H (Horizontal ou Radial) e V (Vertical);
- O padrão de medida usado *rms* ;
- Amplitude: aceleração(m/s<sup>2</sup>), velocidade(m/s) e deslocamento (mm ou  $\mu$ m);
- Freqüência do mostrador KCPM, mil ciclos por minuto;
- Escala com seleção de 2K, onde 2000 representa 1 em valor de amplitude, 200 representa 10 em amplitude e 20 representa 100 em amplitude;
- Filtro é passa baixa, utilizado quando distorcer o espectro e nível de amplitude. Neste trabalho foi usado o filtro em todas as medições.

#### 5.3.4 Registro do Espectro

O espectro é registrado, a partir do nível de amplitude superior ao limite máximo permitido de vibração. Sempre na freqüência de 500Hz. O motivo do limite da freqüência em 500Hz é pelo tipo de problema apresentado, através do espectro que ocorre muito abaixo desta freqüência. A freqüência do espectro deve atender três vezes a freqüência da vibração do componente.

A identificação segue com código do equipamento e a FFT. A FFT segue três letras exemplo **AHV**, sendo A (B,C, D) ponto medido no equipamento, H(V, A) orientação no ponto e V(A, D) amplitude em rms .

A FFT permite analisar em que freqüência está ocorrendo a vibração e assim identificar o tipo de problema que ocorre.

O programa usado nesta medição é o *Pico for Windows* [Tecknikao,2000].

### 5.3.5 Analisador de Vibração

O coletor de dados, NK 100 Tecnikao, analisador e medidor de vibrações e balanceador dinâmico.

Características do analisador no fundo de escala:

- Aceleração 200, ou 20 m/s<sup>2</sup>, saída analógica (10,0 mV e 100,0 mV), 1 m/s<sup>2</sup>;
- Velocidade 200, ou 20 mm/s, saída analógica (10,0 mV e 100,0 mV), 1 mm/s;
- Deslocamento 2000, ou 200 mm, saída analógica (1,0 mV e 10,0 mV), 1 mm;
- Freqüência 100 a 200.000 CPM;
- Filtro 100 RPM a 200 000 RPM.

Faz parte do sistema de coleta uma placa de aquisição de dados AC/DC, acelerômetro (cabo máximo 20m), analisador, PC programa *Pico for Windows* e cabos de ligação.

Característica da Placa ADC-100:

- Resolução de 12 bits;
- Dois canais BNC, A e B;
- Escala de tensão  $\pm 50\text{mV}$  em 9 escalas;
- Taxa de amostra 100 000/s;
- Acuracidade  $\pm 1\%$ ;
- Escala do espectro 0 para 50Khz, 70 dB dinâmico;
- Software, Pico Scope: DOS, Windows(3.x,95/98, e WNT/2000).

### 5.3.6 Listas dos Equipamentos em Análises.

Os conjuntos em análise, que envolve em todos os ventiladores do processo de pintura estão locados no sistema em função da aplicação. O principal motivo da escolha dos ventiladores é pelo conceito do equipamento no processo e pela amostra. Os conjuntos de insuflamento em torno de 10 estão instalados, em uma plataforma metálica, fixado, ao corpo da cabina suspenso, altura de 5,5m. A medição da vibração deve ser realizada individualmente, ou seja, com apenas o conjunto em análise funcionando, evitando oscilações dos outros equipamentos, transmitidas, através da estrutura da cabina. Mesmo enfoque para os exaustores, 14 conjuntos, fixo tipo flange, fixados a 2,8 metros da estrutura da cabina. Os reciculadores verticais direto em torno de 4 conjuntos estão instalados a 7,5 m de altura, fixados juntos à estrutura da cabina de evaporação.

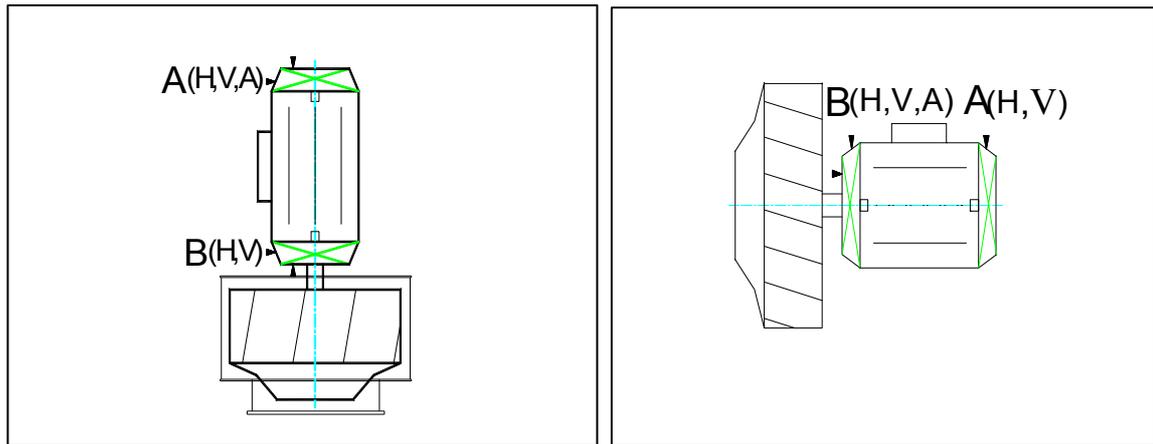
Os outros conjuntos de exaustores, circuladores e ventiladores estão instalados em posições individuais, ou afastados do corpo da cabina, secadores e resfriadores. O anexo 12, apresenta exemplo desta situação. A maioria dos conjuntos trabalha em ambientes, que são úmidos com potencial de íons levemente básico (pH). Alguns trabalham em temperaturas elevadas superiores a 100°C. A tabela 13 mostra os conjuntos ventiladores. Anexo 18, apresenta a lista dos equipamentos em análise com os parâmetros de cada equipamento.

TABELA 5.3: CONJUNTOS MOTORES E VENTILADORES. JDB

<b>Função do Conjunto</b>	<b>Tipo de Acionamento</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Diâmetro Eixo Motor mm</b>	<b>Diâmetro Eixo Ventilador</b>	<b>Potência do Motor em (cv)</b>	<b>Pontos de Medição</b>
Exaustão	Indireto Simples	4	48-60	48-80	10 a 60	11
Exaustão	Indireto Duplo	1	42	60	20	11
Exaustão	Direto Horizontal	14	42	42	20	5
Recirculador	Direto Vertical	4	42	42	20	5
Recirculador	Direto Horizontal	4	75	75	20	5
Insuflamento	Direto Horizontal	10	48	48	30	5
Insuflamento	Indireto Duplo	4	55	60	48	11
Insuflamento	Indireto Simples	2	42	60	25	11
	<b>TOTAL</b>	<b>43</b>				<b>281</b>

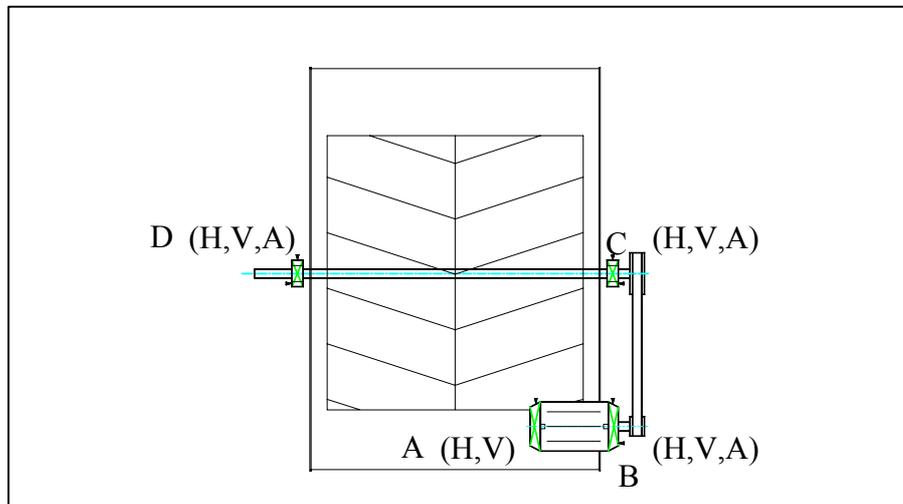
### 5.3.7 Croqui dos Ventiladores e Posição de Medida.

## TIPOS DE VENTILADORES POR ACIONAMENTO E POSIÇÃO

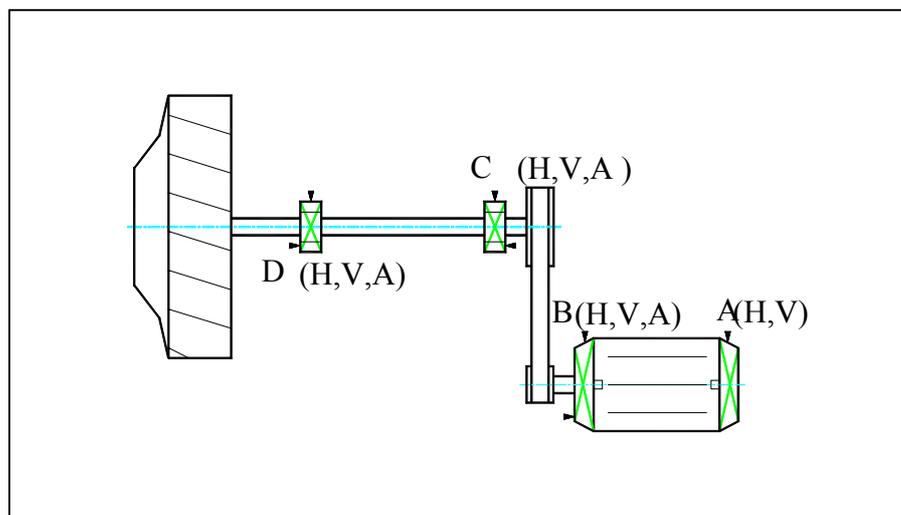


Ventilador Direto e Vertical (2 -5)

Ventilador Direto Horizontal (2-5)



Ventilador Indireto Duplo (4 -11).



Ventilador Indireto Simples (4-11).

FIGURA 5.4 : TIPOS DE VENTILADORES POR ACIONAMENTO E POSIÇÃO. FONTE, JDB.

5.3.8 Planilha de Monitoramento.

TABELA 5.4: ANÁLISE DE VIBRAÇÃO. FONTE, JDB.

Equipamento	Ventilador			
Código	PSVE 02			
Local	Pintura Fab.III			
Processo	Cabina spray booth			
Regime de operação	09:00h/dia			
Operador (sistema)	Sistema			
Início de operação	07:30			
Data da análise	29/9/2001			
Capacidade(m3/h)	80000			
Ø do eixo ventilador(mm)	80			
Nº de pás do ventilador	8			
Temperatura mancal(°C)	A	B	C	D
	34	44	44	39
Temperatura ambiente(°C)	18			
Frequência análise	4 meses			
Potência( Kw)	45			
Rotação m. placa(RPM)	1770			
Rotação medida(RPM)				
Rotação ventilador(RPM)				
Nº polos	4			
Tesão /380Volts,±5%	R-S	S-I	T-R	
	378	380	378	
Corrente(A)	71	78	73	
Aterramento(<5 Ohms)	3,5			

Posição:	Padrão			Unidade			KCPM			Esacala			FILTRO	Visor
	I.S.O	RMS	PICO	m/s2	mm/s	mm	2	20	200	2K	200	20		
A	H	X		4,6	1,9	14	X				X		0,5 V	
	V	X		0,9	0,4	4	X				X		1 V	
	A	X		0,9	0,8	5	X				X		1 V	
B	H	X		1,0	0,7	3	X				X		1 V	
	V	X		0,6	0,4	5	X				X		1 V	
	A	X		0,7	0,9	10	X				X		1 V	
C	H	X		1,9	0,5	4	X				X		1 V	
	V	X		3,2	0,4	9	X				X		1 V	
	A	X		0,7	0,4	12	X				X		1 V	
D	H	X		2,3	0,6	10	X				X		1 V	
	V	X		2,4	0,2	21	X				X		1 V	
	A	X		0,4	0,3	10	X				X		1 V	

5.3.9 Apresentação da Análise do Espectro.

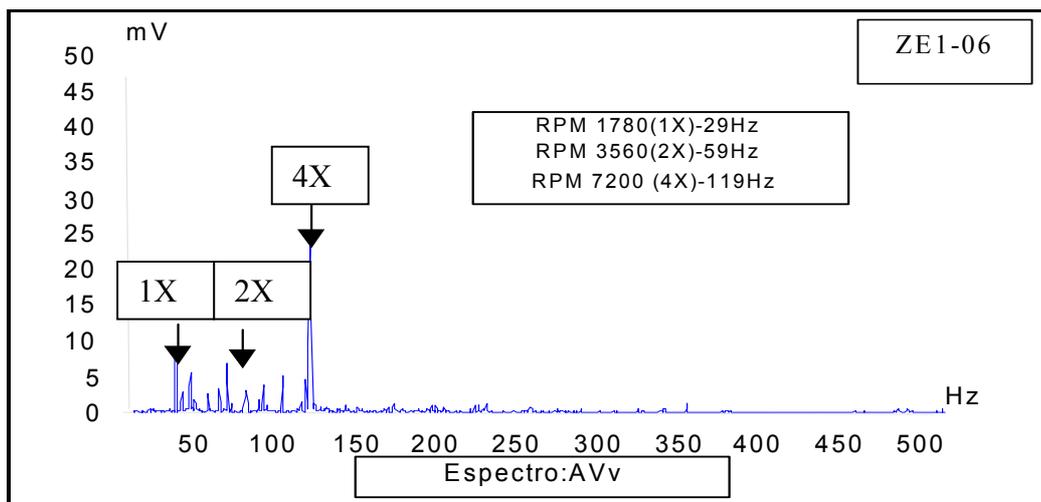


FIGURA 5.5 : ESPECTRO PONTO "A", POSIÇÃO VERTICAL "V " AMPLITUDE VELOCIDADE "v ".

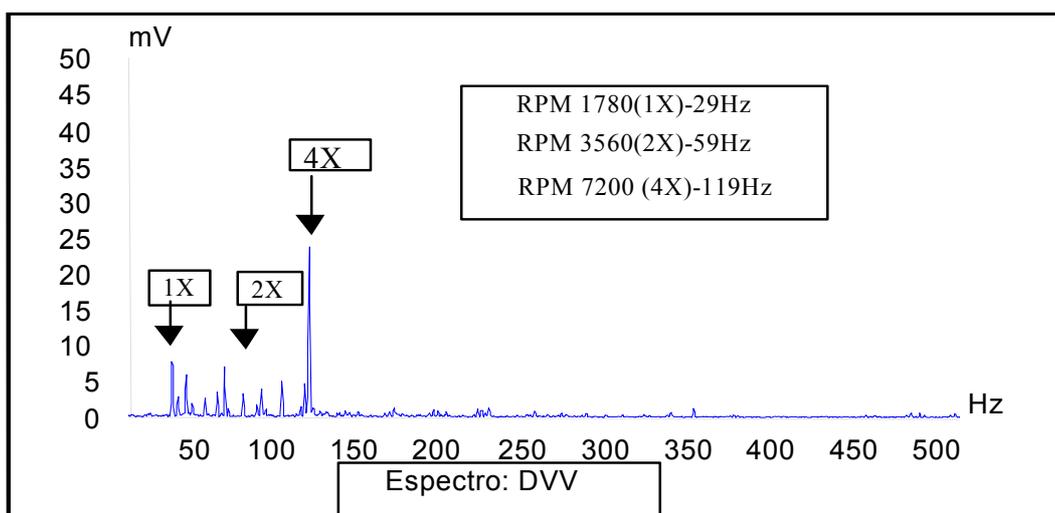


FIGURA 5.6 : ESPECTRO PONTO "D", POSIÇÃO VERTICAL "V" AMPLITUDE VELOCIDADE "V".

A figura 5.5 e 5.6 apresenta amostra deste trabalho.

- Na frequência de rotação 1X do ventilador, a amplitude de vibração é baixa, menos que 10mV. Nesta rotação se detecta vibração de característica de desbalanceamento e possivelmente de desalinhamento. Nas duas direções, vertical e horizontal, os níveis de vibração são equivalentes. A princípio, nestes níveis não há problema. O monitoramento deve permanecer.
- Em duas vezes a rotação 2X, caracteriza problema de desalinhamento, os níveis de amplitude são baixos.
- Amplitude se destaca em NX a frequência de rotação 4X, predominando problema de ressonância, possivelmente o nível de vibração está comprometendo a estrutura.

#### 5.4 Frequência que Ocorre Dentro da Banda.

A banda tem a função de dividir a frequência para o diagnóstico. Nem sempre, o que indica vibração em nível global, é problema. O espectro pode comprovar, através do diagnóstico, as amplitudes, em frequências determinadas de banda. A tabela 5.5 apresenta a máquina ZE-01, na banda 1 não tem defeito. A banda 2, nível de rotação 1X predomina vibrações acima do permitido. Nesta banda para o ponto A e B indica desbalanceamento do motor. Para banda três predomina harmônicos, amplitudes altas nos mancais do eixo de sustentação do ventilador.

O anexo 3 apresenta os níveis de vibração em função da banda de todos os equipamentos que apresentam problemas. Cada equipamento foi representado pelo ponto de maior amplitude. Anexo 4 apresenta um equipamento com todos os níveis de vibração nas frequências das bandas 1, 2 e 3.

TABELA 5.5: ANÁLISE DAS BANDAS DA ZE01. FONTE, JDB.

<b>Limites</b>	<b>Banda1 (0,3 a 0,8)X</b> <b>0,72</b>		<b>Banda2 (0,8 a 1,2)X</b> <b>1,34</b>		<b>Banda3 (1,2 a 3,5)X</b> <b>0,72</b>
<b>Vibração máxima (mm/s)</b>					
ZE-01 AHV	0,70		<b>3,36</b> 1X		<b>0,80</b> 2X
ZE-01 AVV	0,31		<b>2,74</b> 1X		0,42
ZE-01 BHV	0,23		<b>3,12</b> 1X		0,54
ZE-01 BVV	0,28		<b>2,4</b> 1X		0,41
ZE-01 CHV	0,28		<b>2,39</b> 1X		<b>0,85</b> 2X
ZE-01 CVV	0,05		0,85		0,66
ZE-01 DHV	0,36		0,94		<b>1,07</b> 2X
ZE-01 DVV	0,048		<b>1,4</b> 1X		0,71
<b>Vibração máxima (m/s<sup>2</sup>)</b>					
<b>Banda 1 0,5 G's, 4,9m/s<sup>2</sup></b>					
ZE-01 AHA	0,60				
ZE-01 BVA	0,40				
ZE-01 DVA	0,85				

## 6. ANÁLISES DOS RESULTADOS

Para fazer levantamentos dos níveis de vibração, é necessário preparar os pontos a serem medidos, principalmente, o acesso para fixação do sensor. Neste trabalho, alguns equipamentos têm sido preparados, para avaliar sua real condição referente aos níveis de amplitude de vibração. Entre os equipamentos, alguns motores são de alumínio, que, não oferecem uma boa base de contato. Entretanto, para facilitar este procedimento, foi utilizado, uma base de metal com espessura de 3 mm, fixada através de cola na direção de medição, conforme figura (a). A figura 6.1 apresenta este processo.

Deve ser observado o sentido de rotação do conjunto motor e ventilador para fixação deste apoio, figura (a). Outros motores as tampas de proteção do ventilador, foram perfuradas para apoio e acesso do sensor, como estabelece a figura (b).

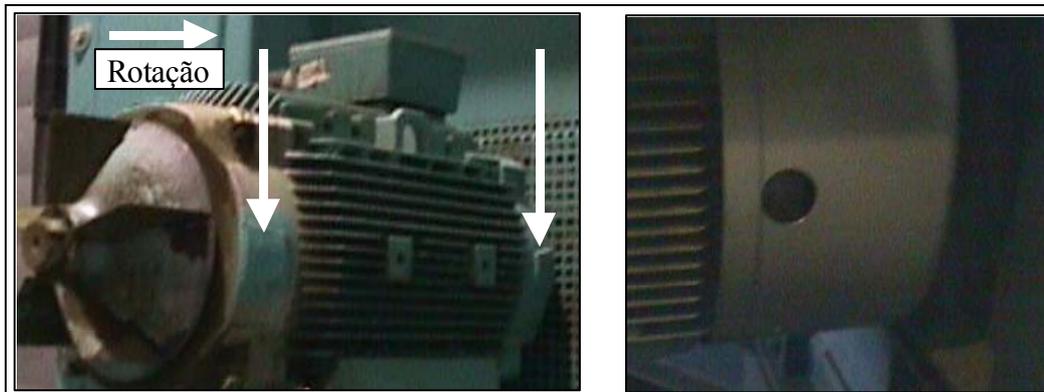


FIGURA 6.1 : (A) PREPARAÇÃO DO LOCAL, APOIO COM SUPORTE E (B) PREPARAÇÃO PARA ACESSO.

Após a instalação e preparação do local, a base de apoio colada sobre a direção da posição de medida foi testada com sensor de base magnética. Assim, o sistema oferece uma boa rigidez e pode ser monitorado o nível de vibração. A figura 6.2 (c) na direção vertical e (d) na direção horizontal.

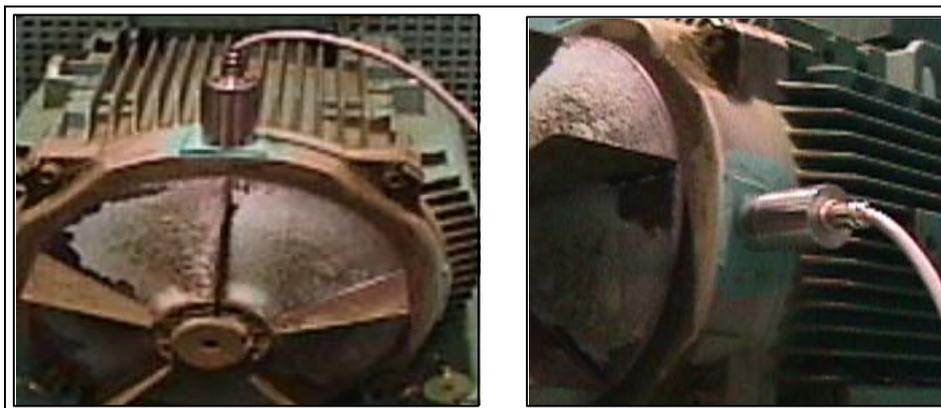


FIGURA 6.2 : (C) APOIO POSIÇÃO VERTICAL E (D) APOIO POSIÇÃO HORIZONTAL.

Para conduzir o levantamento dos níveis de vibração e programação das ações, foram utilizados alguns instrumentos e material de apoio, como segue:

- Balança eletrônica com casa decimal. Função medir a quantidade de massa para balanceamento;
- Chapas cortadas e dobradas em forma de U. Função massa de balanceamento;
- Máquina fotográfica digital. Função fotografar objeto apresentando a situação encontrada;
- Régua metálica. Função medir o paralelismo entre polias;
- Lâmpada direcional. Função auxiliar no paralelismo;
- Nível eletrônico. Função nivelar(aferir) bases dos motores;
- Contador de giro portátil. Função medir a frequência de rotação.

### 6.1 Níveis de Vibração.

Os níveis globais de vibração medida, indica uma tendência de efeito, podendo confirmar somente, quando diagnosticar, através do espectro. Para representar a magnitude de vibração, foi considerado somente os equipamentos com níveis de vibração acima do estabelecido. Na amplitude de velocidade, máxima 2mm/s, aceleração máxima 4,9 m/s<sup>2</sup>, ou 0,5g e deslocamento em 50 µm.

#### 6.1.1 Níveis de Vibração Amplitude Velocidade.

A velocidade é o principal parâmetro de medição para problemas de baixa frequência. Predominantemente nestas amostras, os níveis de vibração prevaleceram na frequência de rotação (1X). A figura 6.3 apresenta graficamente amplitude em (mm/s) e a magnitude da

vibração antes e depois das ações, medida nas posições A e B para ventiladores, direto com dois mancais de apoio.

As vibrações medidas nas direções horizontal e vertical são altas, isto prioriza defeitos provocados por desbalanceamento. O valor máximo apresentado na horizontal em média foi de 8,42 mm/s e vertical 8,14 mm/s para a posição (A). Para posição (B) na horizontal 3,07 mm/s e vertical 5,14 mm/s. Após as ações na posição (A1) na horizontal, 1,85mm/s e vertical, 1,96 mm/s. Na posição (B1), após ações de balanceamento, os níveis de vibração reduziram para em média, 1,07 mm/s, na horizontal e 1,76 mm/s, na vertical. Na direção axial, os níveis de vibração antes e após ações pouco se alteraram, ficando entre 0,28 mm/s e 0,03 mm/s nas duas posições.

O nível médio global de vibração passou de 4,19 mm/s para 1,49mm/s, após as ações. No total, 23 equipamentos apresentaram este tipo de defeito. O equipamento que apresentou maior nível de vibração foi PMVE-05, 34,5 mm/s na direção horizontal e o PPVE-04, nas direções vertical e axial com 27,6mm/s de velocidade. O Anexo 16 apresenta tendência do nível de vibração da PMVI-05, após quatro meses.

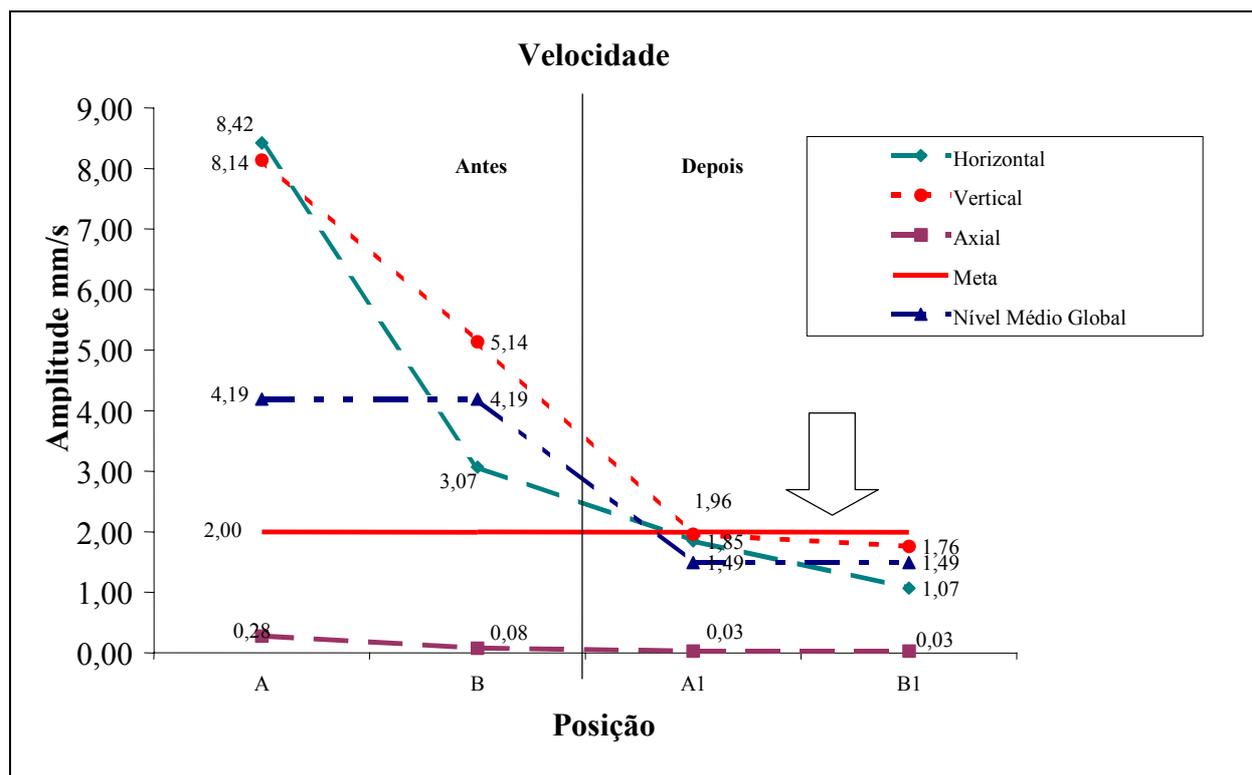


FIGURA 6.3 : GRÁFICOS NÍVEIS DE VIBRAÇÃO AMPLITUDE VELOCIDADE.

### 6.1.2 Níveis de Vibração Amplitude Aceleração.

A aceleração se apresenta em alta frequência (NX) é a principal amplitude, para verificar problemas em mancais e rolamentos. Ela representa a taxa no tempo da troca da velocidade ( $m/s^2$ ).

A figura 6.4 apresenta os níveis médios global de amplitude de aceleração em *rms*. Na posição (A), o nível de vibração na horizontal foi de  $10,16 m/s^2$ , vertical de  $11,40 m/s^2$  e axial  $4,48 m/s^2$ . Para posição os níveis de vibração foram de  $8,80 m/s^2$ , na horizontal,  $8,13 m/s^2$ , na vertical e  $9,03 m/s^2$ , na axial. Após as ações, o nível de vibração foi reduzido, apresentando para a posição (A1) na direção horizontal  $3,25 m/s^2$  de aceleração, vertical  $3,64 m/s^2$  e axial  $0,53 m/s^2$ . Para o ponto (B1), na direção horizontal  $4,13 m/s^2$ , vertical  $3,30 m/s^2$  e axial  $1,08 m/s^2$ .

O nível médio global também foi reduzido, passando de um valor de aceleração de  $8,67 m/s^2$ , antes das ações, para um valor de  $2,92 m/s^2$  após as ações. Na amostra, nove (9) equipamentos apresentaram acelerações acima da meta ( $4,9m/s^2$ ).

O equipamento ZE-01 apresentou os maiores níveis de vibração, sendo  $57,0 m/s^2$  na direção horizontal e  $47,9 m/s^2$  na direção vertical. O nível de vibração suportável para um mancal entrar em falha é de 7 a 9 G's (  $70$  a  $90 m/s^2$  ). Nestas medições, ficou evidente que níveis de vibração no espectro, a partir de  $35 m/s^2$ , devem ter um acompanhamento com maior frequência.

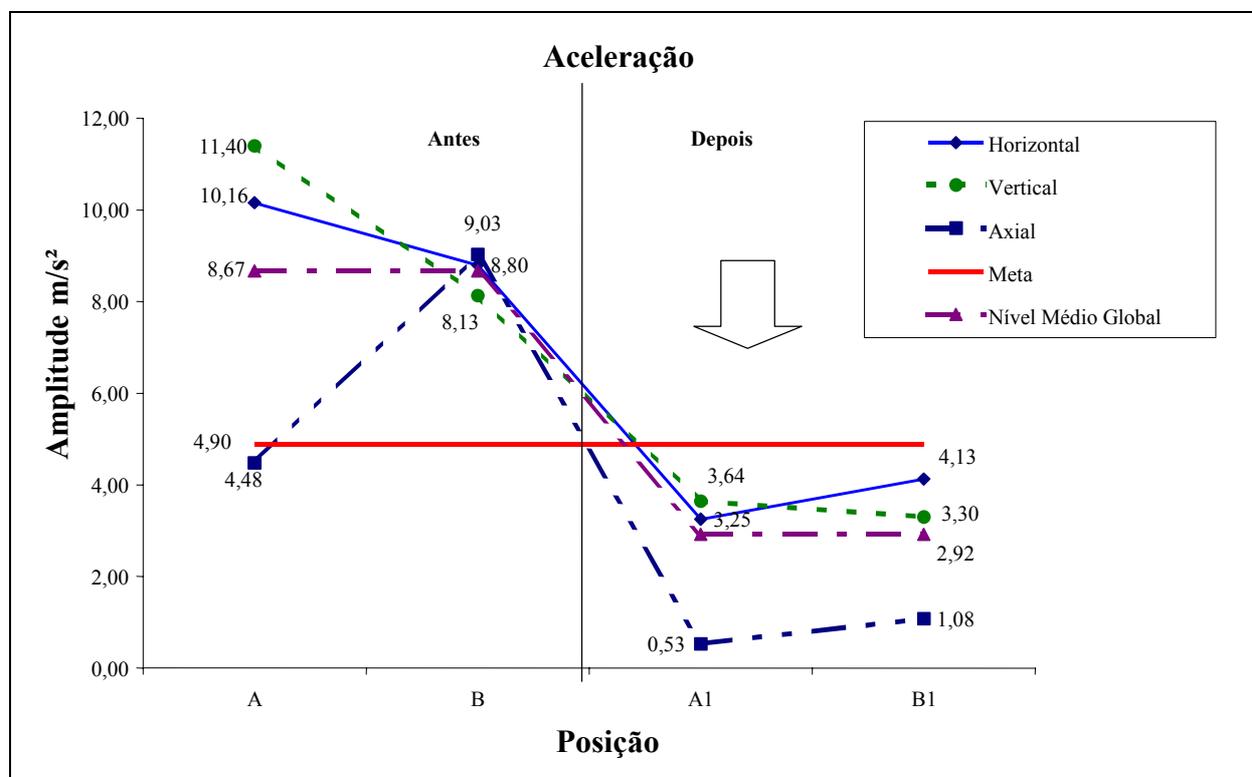


FIGURA 6.4 : GRÁFICO NÍVEL DE VIBRAÇÃO AMPLITUDE ACELERAÇÃO.

### 6.1.3 Níveis de Vibração Amplitude Deslocamento.

O deslocamento apresenta-se em baixa frequência e mostra quanto a vibração gerada no ponto de medição se move, ou seja, quanto ela viaja do ponto medido de referência. Também, proporciona quanto o nível de vibração está afetando outros componentes do sistema.

Foram registrados amplitudes altas nas direções horizontal 87,09  $\mu\text{m}$ , vertical 85,38  $\mu\text{m}$  e axial 79,67  $\mu\text{m}$ , em média, para equipamentos com efeitos na posição (A). Na posição (B) horizontal 50,83  $\mu\text{m}$ , vertical 59,83  $\mu\text{m}$  e axial 35,67  $\mu\text{m}$ . Enquanto que, após as ações, os níveis de vibração médio, reduziram-se de amplitude. Para o ponto (A1), horizontal 19,89  $\mu\text{m}$ , vertical 32,00  $\mu\text{m}$  e axial 16,00  $\mu\text{m}$ . Na posição (B1), os níveis de amplitude apresentam-se baixo também, na horizontal 19,73  $\mu\text{m}$ , vertical 19,25  $\mu\text{m}$  e axial 12,00  $\mu\text{m}$ .

O nível médio global, antes das ações, foi de 66,29  $\mu\text{m}$  e, após, de 19,89  $\mu\text{m}$ , conforme apresenta a figura 6.5. Os equipamentos, que apresentaram os maiores níveis de vibração, foram PPVE-05 na direção horizontal, com 179  $\mu\text{m}$  de deslocamento e PPVE-04 na direção vertical, com 120  $\mu\text{m}$  e 85  $\mu\text{m}$  na direção axial. Um total de doze equipamentos apresentaram este nível de vibração. O anexo 11, apresenta os graficos com os níveis de vibração dos equipamentos com acionamento indireto.

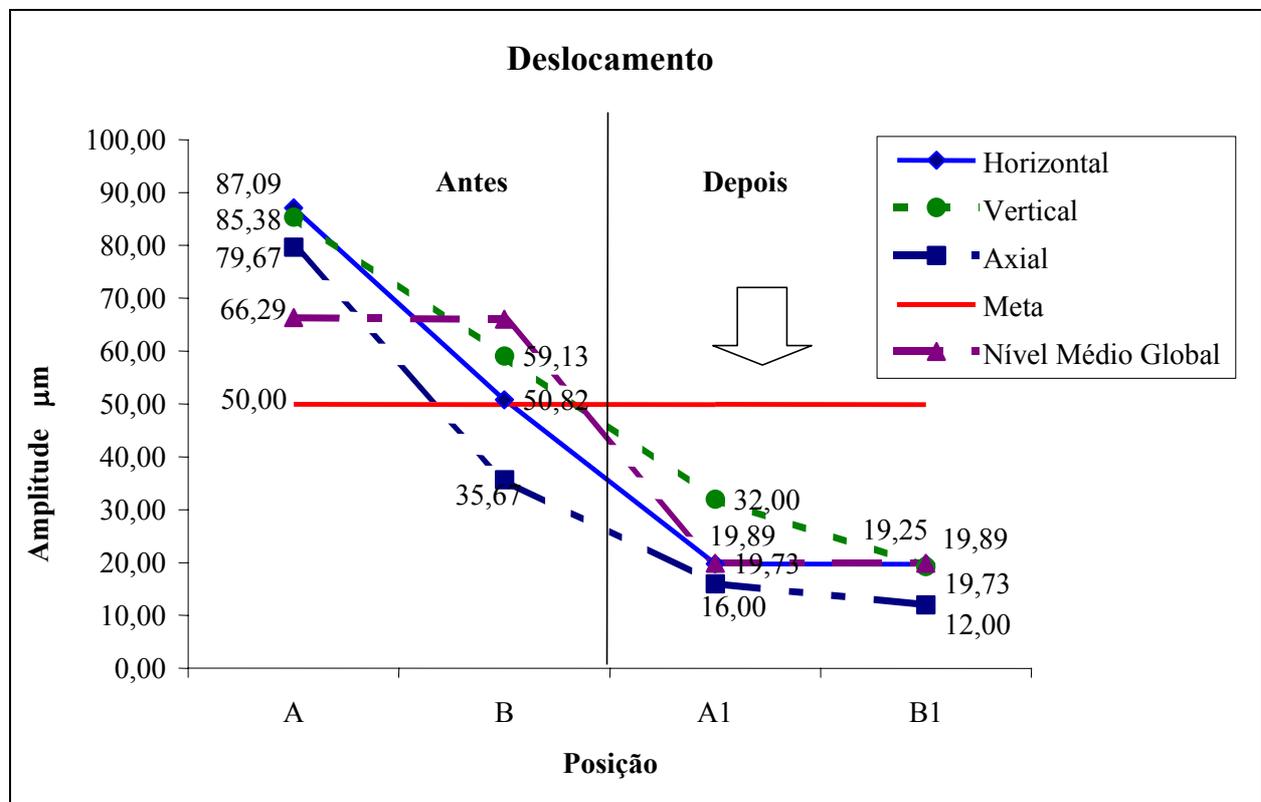


FIGURA 6.5: GRÁFICO DE NÍVEIS DE VIBRAÇÃO AMPLITUDE DESLOCAMENTO.

## 6.2 Análise dos Defeitos Encontrados.

Análise dos equipamentos PSCI-01 e 03 têm como função insuflar ar no processo de pintura, com acionamento indireto executado por três (3) correias e rotor duplo, com oito pás cada. Aspiração axial, potência de cada conjunto de 48cv, motor 1765 RPM e ventilador 1140 RPM.

Os defeitos, que podem ser encontrados na frequência de rotação do motor (F) e ventilador são:

- Para motor:

$$F = \frac{1765RPM}{60Hz} = 29,4Hz$$

- Para ventilador:

$$F = \frac{1140 RPM}{60 Hz} = 19,0Hz$$

Os níveis globais de vibração apresentado, na tabela 6.1 apresenta na direção horizontal amplitude em velocidade (mm/s). Na posição (A) valor de 4,0 mm/s, em (B) valor de 6,7 mm/s, em (C) valor de 0,8 mm/s e em (D) valor de 4,8 mm/s para PSCI-03. Após ação de alinhamento das polias do motor e ventilador, a magnitude de vibração na posição (D1) passou para 1,7mm/s, permanecendo os valores na posição (A1) e (B1).

TABELA 6.1: NÍVEIS GLOBAIS DE VIBRAÇÃO EM AMPLITUDE DE VELOCIDADE.

Equip.	Posição								Média, Antes e Depois		Direção
	A	B	C	D	A1	B1	C1	D1	M(A/B)	M1(A1/B1)	Amplitude
PSCI 03	4,0	6,7	0,8	4,8	4,1	6,7	0,7	1,7	4,1	2,9	H/V
PSCI 01	1,3	4,1	1,6	1,3	1,2	4,1	1,5	1,3	2,1	1,7	H/V

Estes valores de A1 e B1 da PSCI-03 e PSCI-01 na posição B1 permaneceram em função do defeito ter origem elétrica. A figura 6.6 apresenta o desalinhamento horizontal paralelo entre as duas polias, provocadas por alta vibração no plano vertical. E a figura 6.7 apresenta espectro desalinhamento horizontal.

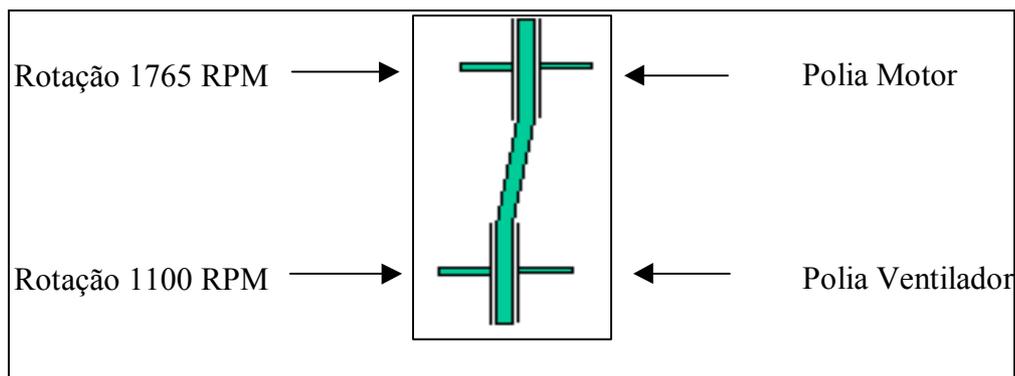


FIGURA 6.6 : DESALINHAMENTO HORIZONTAL PARALELO PSCI 03, POSIÇÃO D.

Nos dois equipamentos acima permaneceram os níveis globais de vibração na posição A1 e B1, após as ações. Estas amplitudes de vibração também permaneceram no espectro. Isto dirige para um defeito elétrico no motor, entre rotor e estator, folga excessiva, formando um *air gap*. Nesta folga, o ar conduzido pelo rotor provoca vibração na frequência de rotação do motor. Pode ser confundido com desbalanceamento do estator. Os níveis de vibração não se alteraram quando estiver em carga. Sem carga, não apresenta estes níveis de vibração.

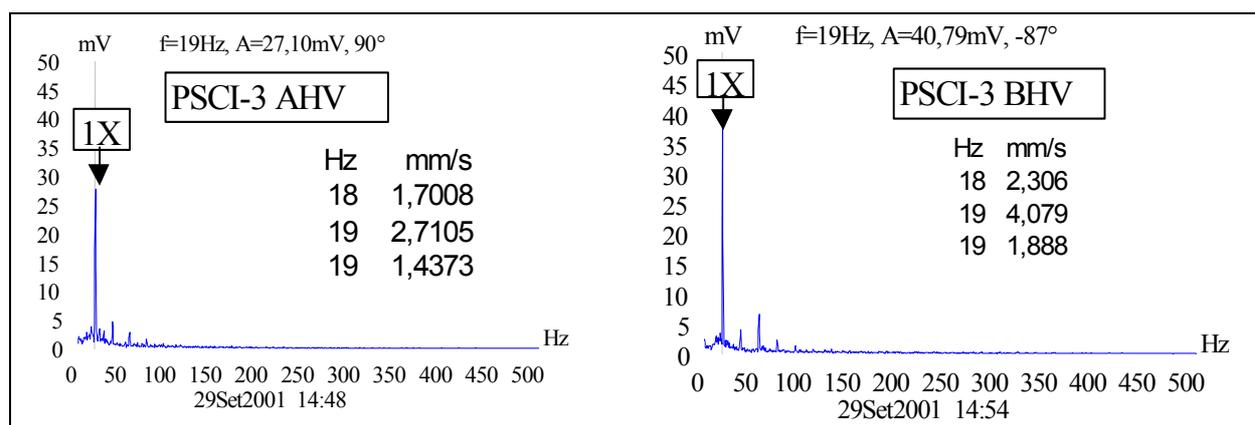


FIGURA 6.7 : ESPECTRO DEFEITO ELÉTRICO MOTOR.

Ação para este caso seria trocar o estator, ou motor. Os dois economicamente não são viáveis. Este defeito reduz a vida do enrolamento do estator, diminuindo a vida do motor.

A figura 6.7 apresenta o nível de amplitude no espectro, antes e após as ações. Os valores no espectro estão em milivolt (mV). No aparelho de medição de vibração foi usada a escala 200 que equivale a cada 10 mV, 1mm/s em amplitude de velocidade. Para este espectro, amplitude 31,4 mV, ou 3,14 mm/s, na frequência de rotação do ventilador, ou seja, 19 Hz e, após ações amplitude de 14,14 mV, ou 1,41 mm/s, na mesma frequência de rotação.

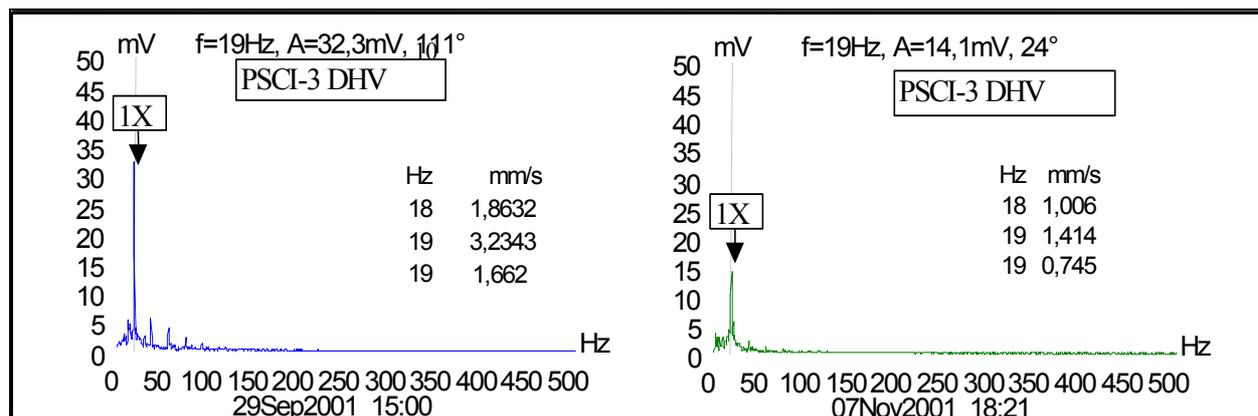


FIGURA 6.8 : ESPECTRO DESALINHAMENTO PARALELO.

Análise dos equipamentos PMVI's foram encontrados níveis globais de amplitude de aceleração acima da meta ( $4,9\text{m/s}^2$ ). Estes equipamentos têm a função de insuflar ar para o processo de aplicação de tinta. O acionamento é direto horizontal, com potência de 30 cv, rotação 1774 RPM e rotor com 12 pás. Defeitos pode surgir na rotação do motor em 29 a 30Hz e múltiplos da quantidade de pás 355 Hz.

TABELA 6.2: NÍVEIS GLOBAIS DE VIBRAÇÃO AMPLITUDE ACELERAÇÃO.

Equip.	Posição				Média, Antes e Depois		Direção / Amplitude	Defeito
	A	B	A1	B1	M(A/B)	M1(A1/B1)		
PMVI 01	10,1	13,4	3,2	3,4	11,8	3,3	H/A	Mancais
	21,1	10,2	5,6	3,4	15,7	4,5	V/A	
	-	4,4		1,2	2,2	0,6	A/A	
PMVI 02	7,1	5,5	3,1	2,9	6,3	3,0	H/A	Mancais
	7,8	2,0	2,8	2,5	4,9	2,7	V/A	
PMVI 03	8,3	5,1	3,2	2,9	6,7	3,1	H/A	Mancais
	12,5	9,4	3,5	2,6	11,0	3,1	V/A	
	-	5,5		1,9	2,8	1,0	A/A	

A tabela 6.2 apresenta os níveis de aceleração em  $\text{m/s}^2$ . Este nível de vibração provoca defeito nos mancais. Os níveis globais indicam começo de um defeito que pode se transformar em falha. Estas amplitudes altas ainda podem ser monitoradas, antes de tomar uma ação. Para exemplificar melhor este tipo de defeito, foi analisado em uma ação conjunta, conforme o espectro da figura 6.8. No total cinco, equipamentos apresentaram este tipo de defeito.

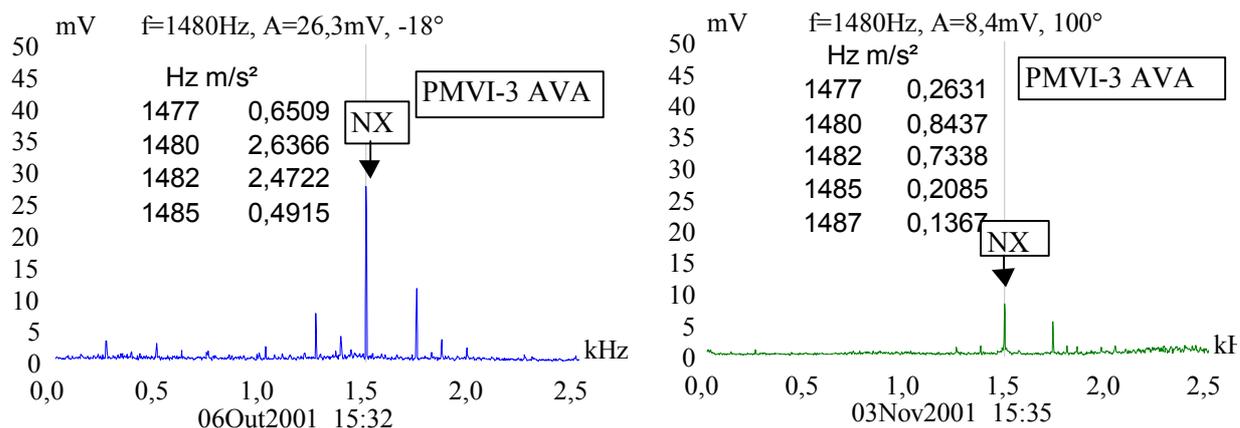


FIGURA 6.9 : ESPECTRO DEFEITO EM MANCAL.

A figura 6.9 acima (espectro) apresenta a magnitude da vibração em alta frequência (NX), antes e após ação. Amplitude (mV), em que foi usado escala 200, cada 10 mV resulta em 1 m/s<sup>2</sup> de aceleração. Conforme a figura, a vibração no espectro foi detectada em 1480 Hz, ou seja, em 50X a rotação do equipamento, na amplitude de 2,63 m/s<sup>2</sup> de aceleração. Este valor é abaixo da meta de 4,9m/s<sup>2</sup> para nível global. No entanto, este nível deve ser monitorado. Após ação, que foi a substituição do rolamento, os níveis reduziram-se. Registrando no espectro valor 0,84m/s<sup>2</sup> na mesma frequência.

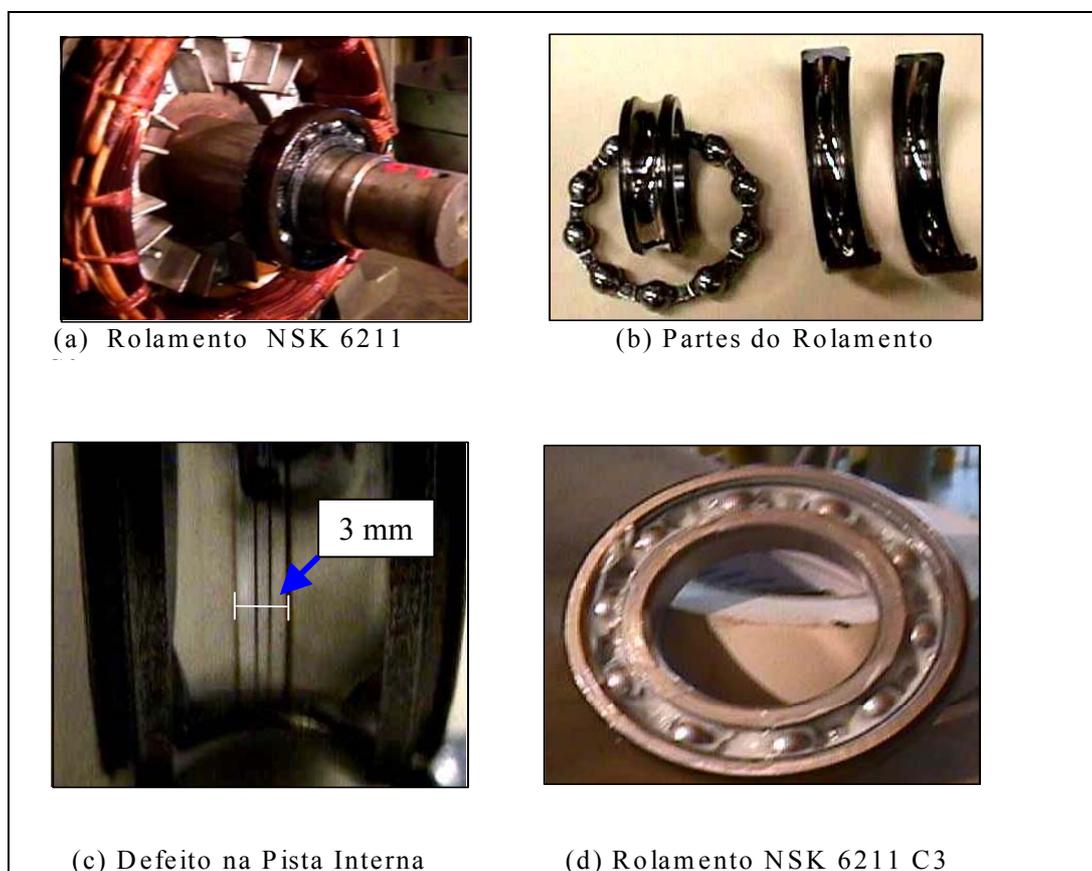


FIGURA 6.10 : DEFEITO PROVOCADO NOS ROLAMENTOS.

A figura 6.10 (a) apresenta o rolamento 6211 na posição de instalação no motor. Para melhor diagnosticar o defeito no rolamento, foi aberto, conforme figura (b) em partes, preservando cada elemento. A figura (c) apresenta o defeito na pista interna, ranhuras no diâmetro interno na largura de 3mm. Foi verificada a frequência de 163Hz, que poderia dar este defeito. Aqui caracterizou-se por problema no lubrificante, provavelmente uma partícula metálica. O rolamento 6211 tem expectativa de vida de 40. 000 horas em condições normais.

Análise do equipamento Ze-01, onde tem a função de fazer a exaustão de gases do processo. Este equipamento tem acionamento indireto simples, com duas correias para acionamento. Motor com 10 cv de capacidade a 1760 RPM e rotor do ventilador com 1290 RPM, podendo apresentar defeito nas frequências de 30 Hz e 21,5 Hz.

TABELA 6.3: NÍVEL GLOBAL VIBRAÇÃO AMPLITUDE VELOCIDADE E ACELERAÇÃO ZE-01.

Equip.	Posição								Média, Antes e Depois		Direção /
	A	B	C	D	A1	B1	C1	D1	M(A/D)	M1(A1/D1)	Amplitude
ZE-01	4,7	2,5	4,2	6,7	5,2	4,8	3,5	2,3	4,53	3,95	H/V
	4,3	2,5	4,2	6,7	3,3	3,5	1,8	2,2	4,43	2,70	V/V
		2,5	4,2	6,7		2,0	2,2	1,8	3,35	1,50	A/V
	4,2	3,2	25,8	57,0	1,8	2,0	11,1	19,2	22,55	8,53	H/A
	3,9	3,3	20,9	47,9	2,2	3,2	8,0	14,9	19,00	7,08	V/A
		3,3	20,9	47,9		7,5	5,4	9,5	18,03	5,60	A/A

A tabela 6.3 apresenta níveis globais de vibração acima da meta. Na amplitude de velocidade, os valores maiores ficaram para a posição (D), do ventilador 6,7 mm/s e aceleração na posição (C) com 25,8 m/s<sup>2</sup> na direção horizontal e 57,0 m/s<sup>2</sup> na posição (D) na direção Horizontal.

Após as ações de balanceamento das polias, substituição dos mancais, os níveis globais de vibração reduziram-se, principalmente, amplitude de velocidade, na posição (D1) passou para 2,3 mm/s. Amplitude de aceleração reduziu para a posição (D1) para o valor de 19,2 m/s<sup>2</sup> na horizontal. A figura 6.11 abaixo apresenta os elementos, como os mancais desmontados, figura (a), polia do ventilador balanceado, figura (b), e os novos mancais montados, figura (c). O novo espectro está no anexo 2 página 94.



FIGURA 6.11 : DEFEITO PROVOCADO NOS MANCAIS PELO DESBALANCEAMENTO.

Após estas ações de substituir os mancais e balancear as polias, o nível de vibração destacou-se em frequência de rotação do ventilador, como apresenta o espectro, no anexo 2 página 95. Este tipo de rotor protegido, para não ser atacado pelo ambiente (gases ácidos) não pode receber massa para balanceamento, ou retirar massa devido às duas ações provocar fissuras na parte da isolação. A decisão é substituir por um novo rotor, que o processo de balanceamento é executado, juntamente com a injeção de material isolante, separando a parte metálica do rotor com ambiente do processo.

TABELA 6.4: NÍVEIS GLOBAIS DE VIBRAÇÃO APÓS SUBSTITUIÇÃO DO CONJUNTO VENTILADOR.

Equip.	Posição								Média, Antes e Depois		Direção / Amplitude
	A	B	C	D	A1	B1	C1	D1	M(A/D)	M1(A1/D1)	
ZE-01	0,5	0,8	0,5	0,4	0,5	0,5	0,5	0,4	0,55	0,48	H/V
	0,4	0,7	0,6	0,3	0,5	0,6	0,6	0,4	0,5	0,53	V/V
		1,3	0,4	0,5		0,5	0,4	0,4	0,55	0,33	A/V
	0,8	0,4	1,3	1,2	0,1	0,5	2,2	1,9	0,93	1,18	H/A
	0,9	0,5	1,4	1,6	0,4	0,5	1,9	1,2	1,1	1,0	V/A
		0,3	0,4	0,4		0,5	1,1	0,9	0,28	0,63	A/A

A tabela 6.4 apresenta novos níveis globais de vibração, após a substituição do conjunto, conforme figura 6.12. Os níveis atendem a meta estabelecida de amplitude de velocidade 2mm/s e aceleração 3,9m/s<sup>2</sup>. Com este nível de vibração foi considerado solucionado o tipo de defeito.

A figura 6.12 (a) apresenta o novo conjunto e (b) o mancal de apoio com troca de mancal com rolamento de esfera para rolamento de rolos.

Este equipamento foi um caso de análise e monitoramento em período de garantia. O fornecedor participou de toda a substituições, desde os mancais, até a substituição do conjunto ventilador. Dispensando investimento de igual valor, quando da aquisição cerca de *US\$ 5.000, 00*.



(a) Substituição do Conjunto



(b) Novo Mancal SNH 511

FIGURA 6.12 : SUBSTITUIÇÃO DO CONJUNTO VENTILADOR.

### 6.3 Balanceamento na Prática.

O desbalanceamento é um dos principais defeitos encontrados em análises de vibração. A maioria dos defeitos encontrados foi de equipamentos com problema de balanceamento, ou seja, problemas detectados na frequência de rotação (1X). Neste trabalho, 23 equipamentos apresentaram este tipo de defeito. Anexo 1 apresenta os equipamentos com a massa em gramas do balanceamento.

Na prática, o desbalanceamento é medido no nível global de vibração, na amplitude de velocidade e o espectro em relação à magnitude e à frequência. Foi medido ao mesmo tempo o valor global e gravado o espectro com ângulo de fase. Este determina em que posição, no rotor, ou ventilador, está ocorrendo o desbalanceamento. Com o ângulo de fase do aparelho pode ser posicionado, na prática, o local da massa de desbalanceamento. Para facilitar esta localização, a figura 6.13 (a) apresenta o ventilador do motor com 13 divisões em torno dos 360° graus. Cada divisão representa 27,7° graus. Para posicionar o ângulo de fase, foi sinalizado o ponto de partida no rotor, ou seja, na divisão de número 13 ou 360°/0°. O ângulo de fase de balanceamento, na prática, é no sentido contrário de giro do rotor. O sensor fica na direção do mancal do motor, figura (b), ou mancal do ventilador, figura (c). A tabela 20 apresenta o procedimento na prática.

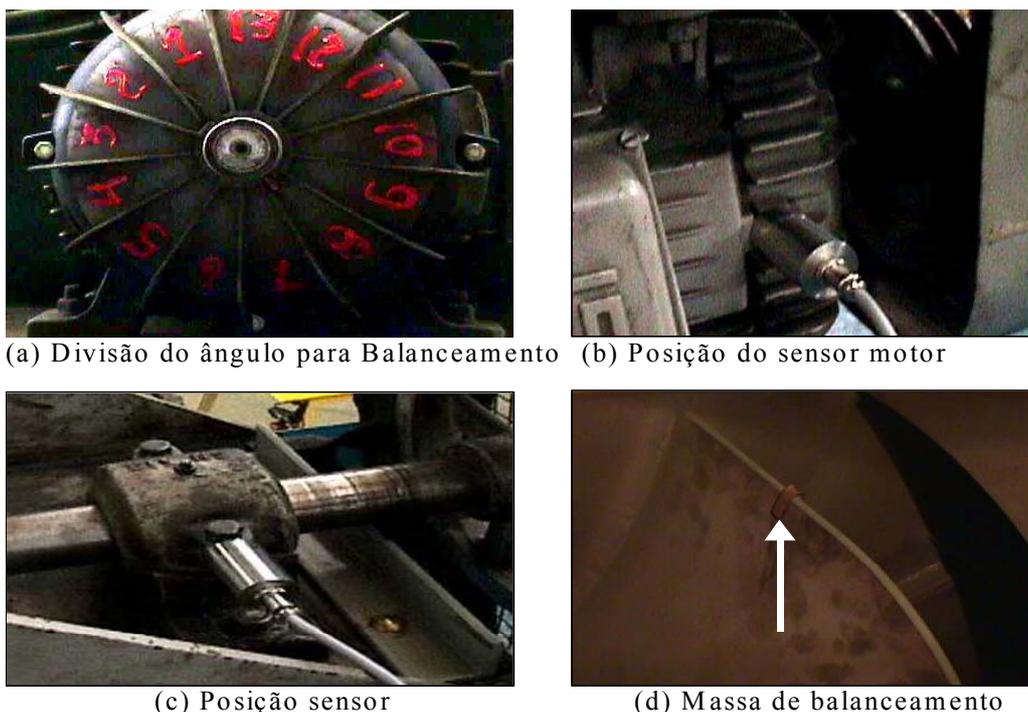


FIGURA 6.13 : BALANCEAMENTO NA PRÁTICA.

A figura 6.14 abaixo apresenta espectro, antes e depois do balanceamento do equipamento STRA-2, onde os níveis medidos estão em mV (milivolt). Cada 10mV resulta em 1mm/s de amplitude em velocidade. A freqüência é a real do sistema, que está sendo analisado. O desbalanceamento foi detectado na freqüência de rotação, ou seja, 20Hz a 1200 RPM. No espectro magnitude de 1,83 mm/s e após colocar a massa de balanceamento de 5,21 gramas, conforme figura (d), foi obtido no espectro magnitude de 0,315 mm/s na mesma freqüência de rotação 20 Hz.

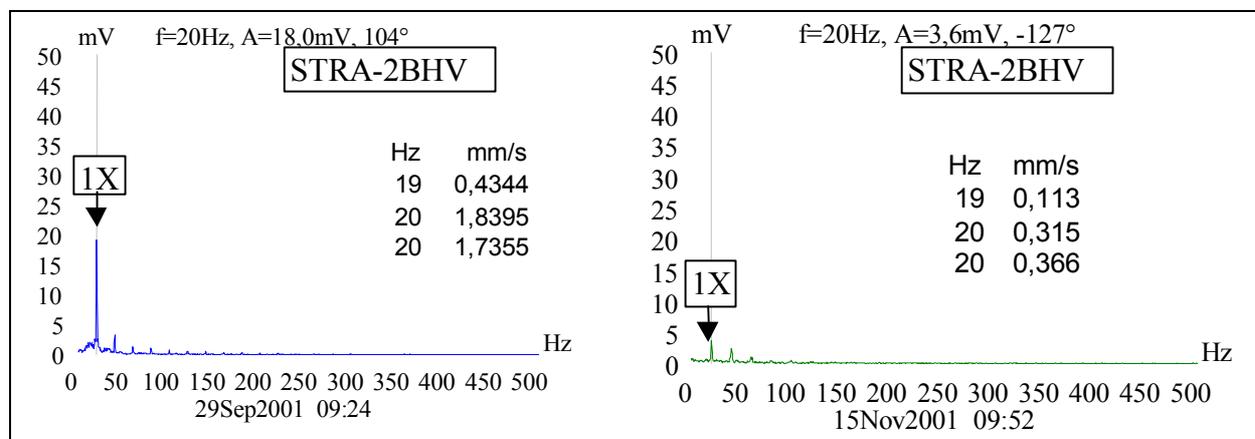


FIGURA 6.14: ESPECTRO DE BALANCEAMENTO.

A tabela 6.5 apresenta como foi realizado este balanceamento. Primeiro deve ser medido o nível global e, ao mesmo tempo, o espectro. Para este caso, amplitude de 3,8 mm/s e ângulo de fase de 360°, ou 0° grau. Após uma massa de teste defasada, no caso 4,53 gramas e ângulo de fase 250° graus, é provocado um outro ponto de vibração (um vetor). A vibração com a massa de teste passa para 3,3 mm/s no ângulo de 317° graus. O sistema então solicitam para correção 5,21 gramas no ângulo de fase 175° graus, onde a massa de balanceamento deve ser fixada. Anexo 1 apresenta todos os níveis de vibração global e os equipamentos, que foram balanceados. No anexo 13 apresenta um equipamento com os níveis de vibração no tempo e na frequência.

TABELA 6.5 : BALANCEAMENTO NA PRÁTICA.

Vibração Medida		Massa teste	
Amplitude	3,8 mm/s	Peso	4,53 g
Fase	360°	No ângulo	250°
STRA-02 BHV			
Vibração com massa de Teste		Correção	
Amplitude	3,3 mm/s	Adicione	5,21 g
Fase	317°	Ângulo	175°

$$MC = 4,53 \frac{3,8}{3,3} = 5,21 \text{ g}$$

(5)

### 6.3.1 Efeito do Desbalanceamento.

O equipamento PMVE-05, na tabela, apresentou um desbalanceamento de 20 gramas em um raio de desbalanceamento de 30 cm na velocidade rotacional de 1800 RPM. Este desbalanceamento provoca uma força centrífuga de 78 kgf. Os mancais, segundo o fabricante, suportam para este equipamento 350 kgs. A vida dos mancais reduz a 55%.

Os fabricantes de rolamentos, exemplo SKF, tem um fator de confiabilidade, que relaciona ao ambiente de trabalho e condições de carga, ficando a vida máxima em 90% da vida esperada. Para este caso acima, reduz a vida atual do rolamento para 50%.

A equação abaixo apresenta a vida atual em função da força centrífuga, gerada pelo desbalanceamento. A tabela 6.6 apresenta os maiores efeitos provocados pelo desbalanceamento, com aplicação das equações (2,3,4 e 5).

TABELA 6.6: EFEITO DO DESBALANCEAMENTO.

<b>Efeito do Desbalanceamento</b>						
<b>Equipamento</b>	<b>Massa(kgs)</b>	<b>Raio(m)</b>	<b>Velocidade</b>	<b>Aceleração</b>	<b>F. Centrífuga</b>	<b>V&gt;Atual</b>
<b>Código</b>	<b>m</b>	<b>r</b>	<b>f (Hz)</b>	<b>g (m/s<sup>2</sup>)</b>	<b>F (Kgf)</b>	<b>V.A</b>
PMVE-02	0,0284	0,30	29,67	9,8	30,18	<b>0,78</b>
SMRA-02	0,0543	0,20	29,67	9,8	38,46	<b>0,65</b>
PPVE-03	0,0300	0,30	29,67	9,8	31,88	<b>0,77</b>
PPVE-04	0,0191	0,35	29,67	9,8	23,68	<b>0,82</b>
PLVE-02	0,0253	0,30	29,67	9,8	26,88	<b>0,80</b>
PLVE-04	0,0330	0,30	29,67	9,8	35,06	<b>0,75</b>
PMVE-05	0,0734	0,30	29,67	9,8	77,99	<b>0,55</b>
PMVE-06	0,0352	0,28	29,67	9,8	34,91	<b>0,75</b>
PLVI-01	0,0300	0,25	30,00	9,8	27,16	<b>0,80</b>
PLVI-01	0,0300	0,25	30,00	9,8	27,16	<b>0,80</b>
ZE-01	0,0350	0,28	25,67	9,8	25,98	<b>0,74</b>
<b>CM(Kgs)</b>	350	450	250	<b>VP</b>	1	

#### 6.4 Resultado Dentro do RCM.

Dentro do RCM, uma das grandes sustentações que determinam o sistema ser de confiabilidade, é dominar o sistema de modos de falhas. Neste propósito foram detectados no sistema analisado, poucos tipos de modos de falhas atuantes. Na sua maioria os mesmos modos de falhas de um sistema para outro.

Os modos de falhas nos equipamentos devem ser todos conhecidos. Em manutenção devem ser monitorados os que apresentam sintomas ao efeito da falha. Isto foi observado nos motores elétricos e ventiladores. Os motores apresentaram focos nas funções dos mancais entre rotor e estator. Os modos de falhas detectados nestas funções foram ranhuras nos rolamentos e excesso de vibração entre rotor e estator. As fontes das falhas, desbalanceamento mecânico e uma folga (*air gap*) entre rotor e estator, problemas dimensionais.

Para os ventiladores, focos nas funções do rotor, mancal e entre eixo ventilador e eixo do motor. Os modos de falhas detectados nestas funções foram vibração excessiva no rotor do ventilador e sobrecargas nos mancais. As fontes de falhas, desbalanceamento mecânico, fadiga e desalinhamento.

Para alguns sistemas, as falhas funcionais foram detectados, modos de falhas presentes, excesso de vibração, na função rotor, fonte, ou causa, desbalanceamento mecânico. Estes sistemas não foram monitorados. O componente rotor cessou sua função principal e entrou em falha, foi desativado do sistema. A figura 6.15 apresenta análises dos componentes.

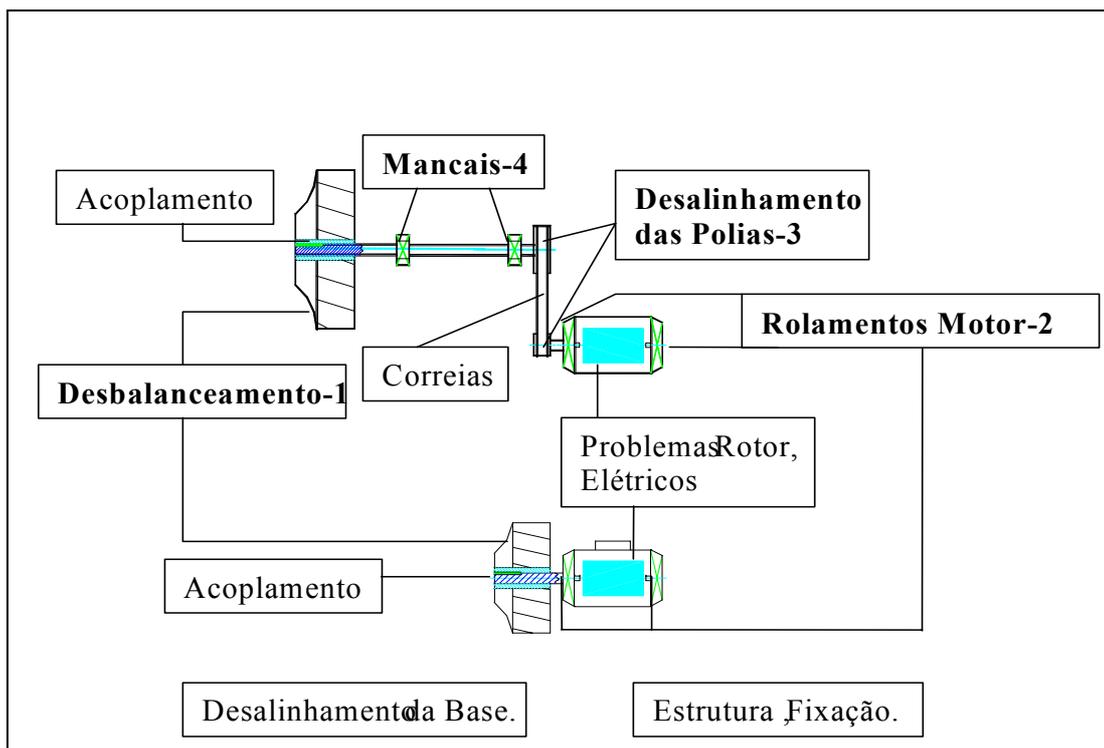


FIGURA 6.15 : ANÁLISES COMPONENTES MOTOR E VENTILADOR.

#### 6.4.1 Curvas de Tendência de Falhas.

As falhas também podem ser apresentadas em função das condições de falhas e o tempo que estão em atividade. As curvas de falhas dos ventiladores, conforme foi relatado, na figura 6.16, foi adaptado para valores de performance mundial. Os ventiladores apresentaram em 4 tipos característicos de curvas de falhas, variando da condição e operação no processo. Para evitar problemas de estrutura (frequência natural) no início da vida dos ventiladores, devem ser desenvolvido conforme anexo 17.

A curva modelo (A) característico de falhas crescentes no início da vida e, após se tornam constantes e aumentam as falhas no final de um período. Após a intervenção, eles se tornam constantes e descrevem um modelo tipo (B), chegando à falha funcional, e a perda do ativo. Nesta adaptação, 28% dos ventiladores analisados apresentaram esta tendência ao modelo de curva, enquanto que a nível mundial está em 3%.

A maioria dos ventiladores analisados apresentou o modelo (B), em que os ventiladores atuam mais neste tipo de curva. Um início de vida de falhas constantes e em um certo período aumenta o nível de falhas. Com as melhorias no sistema retornam a um modelo típico (A) e entram em falha no final da vida útil. Para este modelo a nível mundial atuam em 17%, enquanto na análise ficou em 55% dos ventiladores.

Mais discretos alguns ventiladores apresentaram o modelo (C) e (D). Estes ventiladores estão sendo monitorados, desde o início de vida operacional. Apresenta uma tendência de falhas constantes. Para o modelo (C) 2,5% no sistema analisado e a nível mundial 6%. Entretanto, o modelo (D) apresenta em nível mundial 42% de falhas, enquanto o sistema analisado apresenta 14,5%. Assim, tanto o modelo (C) e o modelo (D) podem migrar para o modelo (B).

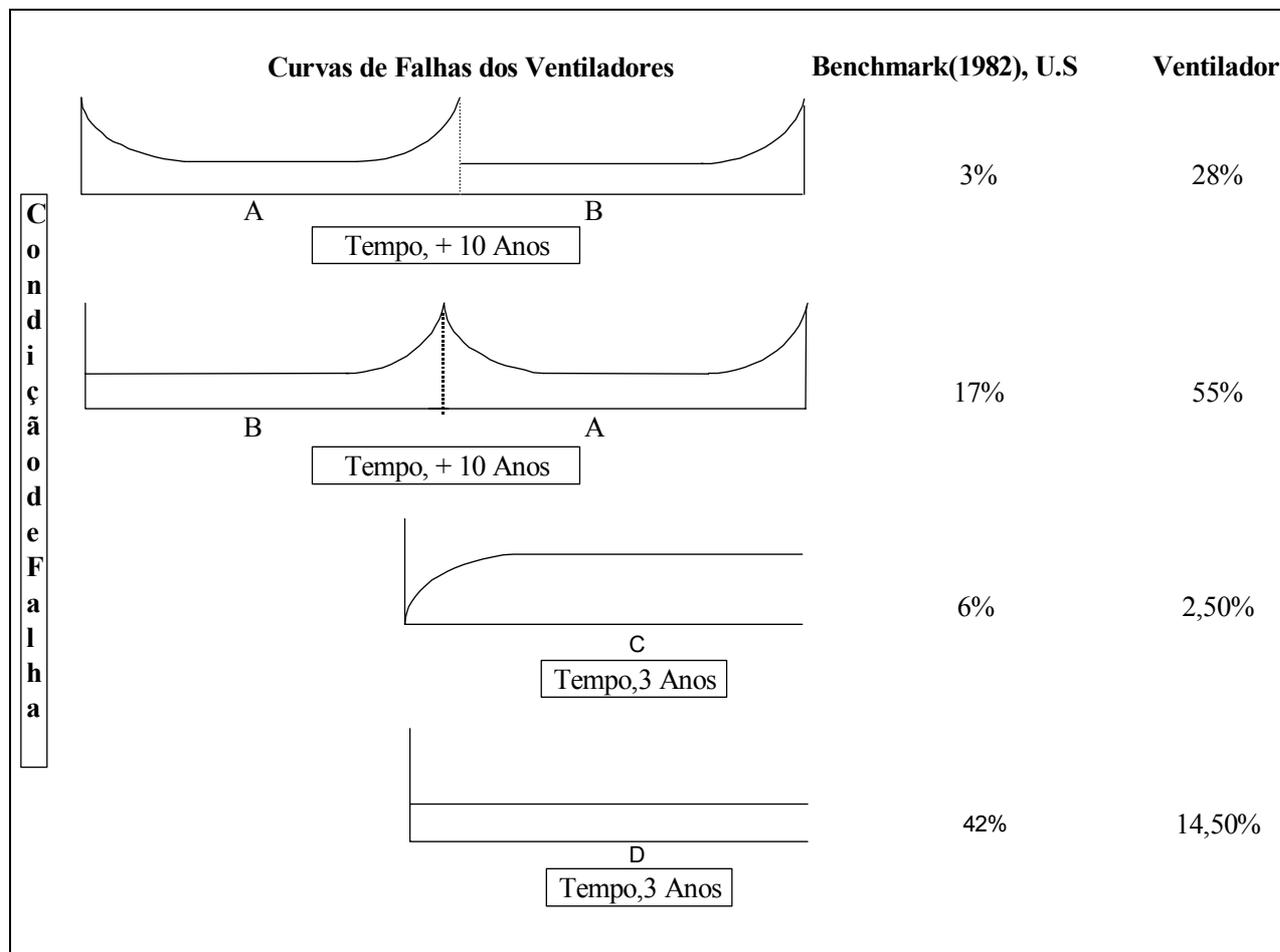


FIGURA 6.16 : CURVAS DE FALHAS DOS VENTILADORES.

### 6.5 Resultados Encontrados.

- 32 ventiladores apresentaram problemas, 76,2% do total pesquisado;
- 2 ventiladores apresentaram defeitos de desalinhamento, 4,75% dos ventiladores;
- 27 ventiladores apresentaram desbalanceamento, 64,3% dos ventiladores em estudo;
- 5 ventiladores com problema de mancais, 12% dos ventiladores em estudo;
- Dois ventiladores, que apresentaram desalinhamento, um estava desbalanceado;
- Dos 5 ventiladores com problema de mancais, dois estavam desbalanceados;

- Três conjuntos de ventiladores foram desativados, falhas avançadas provocadas pelo excesso de vibração;
- Seis ventiladores devem ser substituídos os rotores, órbita fora de controle;
- Sete ventiladores estão com processo de falha avançado.

### 6.6 Definição da Frequência de Análise.

A definição do intervalo para monitoramento da vibração nos equipamentos segue analogia da figura 6.17. Este intervalo é o tempo, para tomar ação, foi determinado em função das condições, após monitoramento e deve ser prático. O intervalo definido para os equipamentos para análise e monitoramento, e o diagnóstico não deve ultrapassar a frequência de dois meses, principalmente, para equipamentos propícios a defeitos. Os equipamentos com níveis de vibração ao nível da *baseline* pode ser superior a 4 meses, dependendo da condição. Isto foi definido entre a detecção da falha, potencial de falha, ponto (P) e o ponto de falha (F).

Os pontos que estão entre o ponto (P) e o ponto (F), ruído, calor e temperatura são cobertos pela análise de vibração, ou seja, o ruído tem origem pela velocidade de vibração. Quando esta velocidade está sendo monitorada dentro dos limites, o ruído medido que é na verdade um pseudo ruído tem valores baixo. O calor tem origem de pequenas forças de choque e da fricção dos elementos rotativos que em movimento gera a vibração. O calor pode ser sentido, já a temperatura pode ser medida, logo, se existe um controle da temperatura nos elementos rotativos, está sendo controlado o calor que por sua vez pode ser monitorado através da análise de vibração.

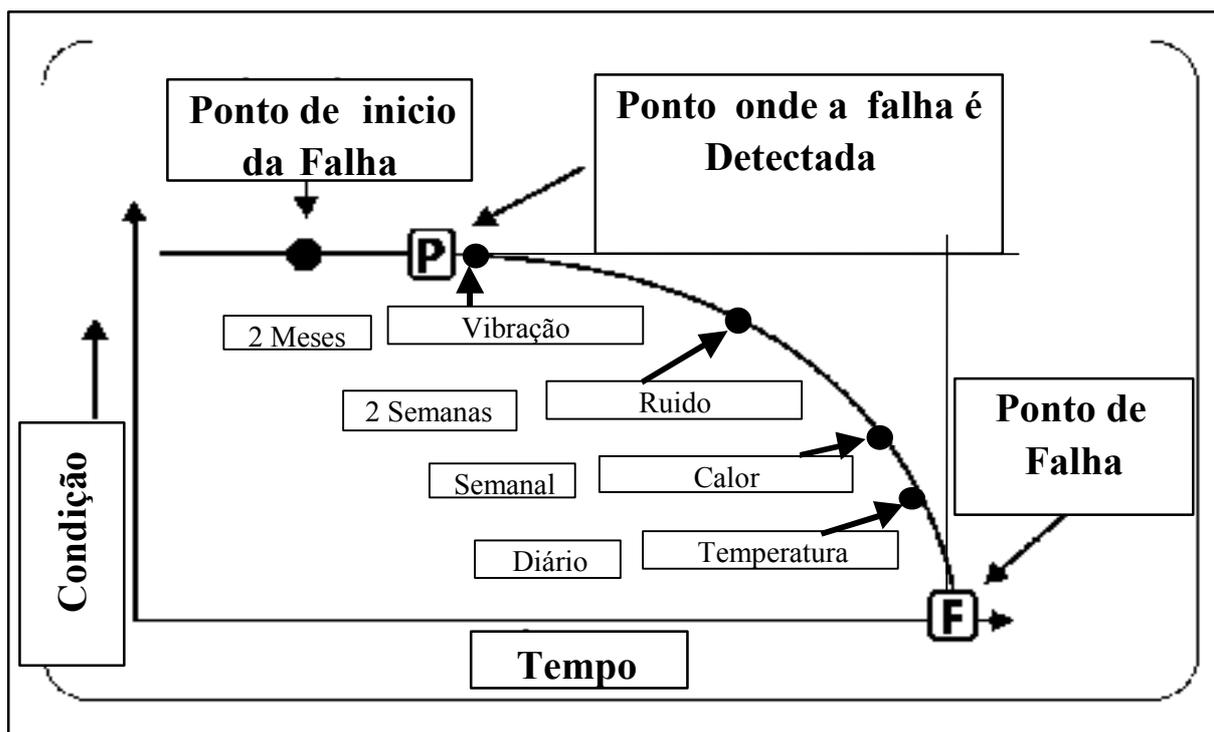


FIGURA 6.17 : FREQUÊNCIA DE ANÁLISE.

O anexo 5 apresenta a lista dos equipamentos com a periodicidade para monitoramento do nível de vibração. Esta periodicidade, varia de mensal a quadrimestral, podendo ser alterada em função das condições que se encontram.

### 6.7 Implantação do Método Baseado nos Resultados.

Na implantação do método envolve alguma demanda de mão-de-obra, para alinhar sistematicamente o processo de medição. Neste foco foi usado o sistema eletrônico para controle da periodicidade de análise. Apresentação desta solicitação no sistema está em modo descritivo como uma tarefa da lista de verificação do equipamento. Exemplo: análise de vibração (planilha). Esta lista descreve todos os equipamentos, que devem ser analisados e que sai de forma impressa, com a periodicidade em função do resultado das condições, do diagnóstico na implementação. A cada dois meses para equipamentos, que foram balanceados com divisão de massa (refinamento) e quatro meses para os demais equipamentos. Os equipamentos foram distribuídos em todo o período para análise, ou seja, todo mês tem algum equipamento sendo analisado.

Outro item desta implementação foi a formação de um grupo de cinco pessoas (facilitadores), treinadas em análise de vibração, para auxiliar e conduzir o processo de medição e diagnóstico. A maior dificuldade deste grupo foi entender os tipos de modos de falhas.

Para as metas e objetivos desta implantação, alguns indicadores-chaves devem ser monitorados. Os indicadores são usados no processo do planejamento, para desenvolver e otimizar os objetivos administrativos. Para os equipamentos em análise, foram indicados os seguintes indicadores de vibração e RCM:

- Número de problemas encontrados relativamente a vibração e corrigidos por mês;
- Número de problemas encontrados, falhas funcionais em função da vibração;
- Níveis de vibração em amplitude, antes e após ações de forma gráfica;
- Percentagem de equipamentos cobertos pela condição de monitoramento;
- Percentagem de equipamentos com potencial de falhas.

### **6.8 Práticas e Lições Aprendidas.**

No método de análise de vibração uma das maiores preocupações é com a informação dos dados. A certeza de que os dados medidos são provenientes da fonte pela qual está sendo coletado devem ser confiáveis. À medida que se desenvolve uma coleta expressiva de espectro da vibração, permite formar um padrão, uma espécie de imagem comparativa com máquinas similares.

A base de fixação dos ventiladores, principalmente, os de acionamento direto, que estão fixados diretamente à estrutura do sistema, não oferece uma boa rigidez, devido vários sistemas estar rodando em uma estrutura solidária. Estes ventiladores somente foram possível levantar dados de vibração individualmente e com os outros ventiladores desligados. Com esta informação, os dados de vibração somente poderiam ser realizados entre os intervalos da produção. Todos os ventiladores foram analisados individualmente e os outros desligados, para manter a qualidade dos dados coletados.

Outro fator revelante é o acesso para análise. Vários pontos estavam obstruídos para uma possível análise de vibração. Dificultando a fixação do sensor no ponto de medição. Exemplo foi para os mancais dos motores elétricos, a tampa de proteção de alguns ventiladores não foi possível sua retirada. O espaço entre o motor e a carcaça do ventilador não estava previsto para isto. Neste caso deve-se retirar o motor, para deslocar a tampa. É importante prever este espaço na aquisição de novos equipamentos.

A preparação do ponto também pode influenciar na coleta dos dados. Para estes foi fixado junto aos planos de medição, horizontal, vertical e axial, sempre na direção de medição, um corte de chapa. Isto foi preparado para os motores com carcaça em alumínio, oferecendo uma boa rigidez e uma área de contato superior à área da base magnética do sensor.

Na maioria dos equipamentos medidos não foi possível adquirir a linha-base do espectro. Somente os que foram encontrados abaixo dos níveis de vibração, dentro dos limites inferiores ao critério estabelecido. Os espectros atuais oferecem uma linha-base, mas não configura a realidade. A linha-base deve ser adquirida na partida do equipamento, durante o comissionamento.

A frequência natural foi analisada em alguns equipamentos, por dúvida em situações específicas do resultado da análise. Um equipamento apresentou sintoma de girar na frequência de rotação do sistema, próximo à frequência de excitação. Principalmente, no balanceamento, qualquer residual de massa pode excitar, quando estiver próxima à frequência natural, o sistema fica ressonante. Assim, é importante, que cada equipamento deve ser medido na sua frequência natural, antes de fazer o levantamento dos níveis de vibração.

Entendimento dos modos de falhas foi definido por sistema padrão conhecido. Somente alguns foram detectados que são atuantes. Estes repetiram na maioria dos equipamentos. Ficou evidente que a função do modo de falha deve ser entendida a fonte da falha. A manutenção deve trabalhar com os modos de falhas atuantes, somente como um processo de investigação.

## 7. CONCLUSÕES

Neste presente trabalho foram levantados valores de vibração, onde, após análise dos resultados e o diagnóstico, através do espectro, ficou evidente que os defeitos encontrados são provenientes do processo onde os equipamentos estão inseridos e também de problemas não resolvidos no comissionamento. Os defeitos encontrados nos mancais, rotores dos ventiladores, entre rotor e estator do motor elétrico e entre polias caracterizaram-se das razões e da origem das causas.

Prevaleceu o desbalanceamento como causa principal dos altos níveis de vibração e dos defeitos encontrados, sendo que:

- O desbalanceamento resulta em 64,5% como causa principal da falha;
- 76% dos equipamentos em falhas
- 4,75% dos ventiladores apresentaram problemas de desalinhamentos;
- 12% dos ventiladores com problemas de mancais;
- 16,7% dos rotores em processo de falhas.

É plenamente possível comprovar o valor da análise e monitoramento da vibração como processo principal de medição pelas condições, que se encontra no equipamento. Comprovou-se que dentro do conceito de manutenção preditiva esta análise tem a função de antecipar a falha e conseqüentemente alongar a vida dos equipamentos.

A meta com o RCM foi praticada, para identificar em cada sistema os módulos de falhas do equipamento, conseqüências e aplicabilidade da técnica de análise de vibração para minimizar o risco e o impacto da falha. Isto tem permitido manter a funcionalidade dos equipamentos no processo de maneira econômica. No total 32 equipamentos com problemas foram analisados.

Durante o processo de análise e monitoramento, foi possível discutir a garantia em curso do equipamento novo com o fornecedor. Os níveis altos de vibração foram decisivo na substituição de 90% do conjunto ventilador. Cerca de R\$12.000,00 foi o valor da operação. A economia geral deste processo de medição chegou a R\$37.500,00 comparado com processo externo. Neste valor não está avaliado, as melhorias nos projetos futuros

Além disto, muitas informações foram obtidas para melhoria dos desenhos, que podem ser usadas em novos projetos como: rigidez das estruturas, área de apoio, contato das bases do

conjunto ventilador e do sistema, rotação máxima para ventiladores – 1250 RPM, evitar os conjuntos com acionamento direto e identificação dos limites de vibração junto no equipamento.

Especificação dos níveis de vibração na aquisição do projeto corrente, que envolve equipamentos rotativos deve fazer parte dos itens de compra. Discutido com o fornecedor em forma detalhada, a disponibilidade do local, identificação e acessibilidade aos pontos de medição. Envolver na medição aspectos, como a norma a ser utilizada, amplitude, os limites dos níveis de vibração e em que unidade deve ser medida.

### **7.1 Recomendações nos Trabalhos Futuros**

- Dentro do aspecto do campo de análise e monitoramento da vibração, existe uma larga escala de equipamentos que devem ser monitorados em função das condições em que se encontram. Dentro deste contexto podem ser envolvidos, além dos ventiladores: compressores de ar comprimido, gerador de frio, bombas, aereadores e caixas de engrenagem, todos distribuídos pelo *lay out*.

- Também analisar os níveis de vibração do equipamento, com carga, sem carga, a frio e a quente. Podendo estender análise, com equipamento acoplado e desacoplado, fazendo correlação com as recomendações acima. No comissionamento aferir os parâmetros de vibração combinado na compra do equipamento. Buscar entendimento nos parâmetros de alinhamento, balanceamento, especificação das tolerâncias e acertar os níveis de aprovação com o fornecedor.

- O equipamento ainda pode ser identificado com placa fixada na posição frontal de acesso, em que especifica os níveis de vibração, que foram customizadas nos testes de montagem, ainda em fabricação. Por fim, documentar em forma de certificação, a liberação do equipamento com os níveis de vibração deixados nos testes no fornecedor.

- Para o caso específico, dos ventiladores pode-se priorizar a forma de apoio. A estrutura deve ter boa rigidez e o conjunto motor e ventilador ter base própria, este separado por amortecedores. Uma outra base entre os amortecedores e a superfície de fixação deve ser prevista. Preferir fixação e apoio do sistema em base de concreto e separado do equipamento, quanto possível. Para os conjuntos em mezanino metálico seguir as mesmas recomendações. Assim, é possível evitar que o sistema gira próxima à frequência natural da estrutura. Um aprofundamento das causas dos módulos de falhas facilitaria o processo de investigação da fonte da falha.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Análise Forma de Onda**,1999. Endereço disponível na internet. Acessado em abril de 2001.  
[http:// www.dsptutor.freeuk.com/analyser/guidance.html#waveforms](http://www.dsptutor.freeuk.com/analyser/guidance.html#waveforms).p.1-11.

**Análise de Espectro**,1999. Endereço disponível na Internet. Acessado em setembro de 2001.  
<http://www.dsptutor.freeuk.com/jsanalyser/FFTSpectrumAnalyser.html>.p.1-6.

API 670. **“Vibration”**, 1993. Axial Position Bearing-temperature Monitoring System.

BARKOV, Alexej V & BARKOV, Natalia A.,1999. **“Monitoramento da Condição das Máquinas e Diagnóstico pela Vibração”**. Instituto de Vibração. USA. Artigo disponível na Internet no seguinte endereço: <http://www.vibrotek.com>. Acessado em agosto de 2001.

BARKOVA, M. & SHABLINSKY, A.,1994. **“Diagnostics of Rotating Machines Prior to Balancing”**. Vibro Acoustical Systems and Technologies, Inc.

BARKOV, A.V. & BARKOVA, M. A., and A. G. SHABLINSKY, 1999. **“Rotor Balancing For Multi-condition Machines”**.

BARKOV, Alexej V. & BARKOVA, Natalia A.,1997. **“Machine Condition Monitoring and Diagnostics by Vibration”**. Institute of the Russian Federation Power Industry and Vibration  
Endereço disponível na internet, Acessado na internet em outubro de 2001.  
<http://web.ukonline.com.uk/d.stewens2/vibcases/chindex.html>

DSP,1999. “**Processando Sinais Digitais**”. Endereço disponível na internet. Acessado em abril de 2001. <http://www.dsptutor.freeuk.com/index.htm>.p.1-27.

DUNCAN, L. Carter, 1996. “**A New Method Of Processing Rolling Element Bearing Signals**”. Endereço disponível na internet. Acessado na internet em abril 2001, <http://www.vibrotek.com/articles/dlcv96/aneu.htm>. p1-6.

DUNN, Sandy, 1997. “**Best Practice Maintenance Strategies for Mobile Equipment**”. A Conference Paper presented to the Maintenance in Mining Conference - Bali, Indonesia. Artigo disponível na internet [http:// www.plant-maintenance.com](http://www.plant-maintenance.com). p.1-42,Acessado em maio de 2001.

Dunn, Sandy, 2000.“**Terminologia de Vibração**”. Endereço disponível no site. <http://www.vibinst.org/>. p.1-13. Acessado em maio de 2001.

GERGES, Samir N.Y.,1992. “**Ruído, Fundamentos e Controle**”. Florianópolis.

GM-General Motors Specification A 1.0, 1993. “**Laser Alignment Specification for New and Rebuilt Machinery and Equipment**”.

GOLDMAN, Steve, 1999. “**Vibration Spectrum Analysis**”. Second Edition, Industrial Press.

IEC “**International Electric Commission**”, 1996. Unidades de Vibração.

ISO 3945, 1995. “**Mechanical Vibration of Large Rotating Machines**”.

ISO 1940, 1986. **“Balance Quality Grades for Rigid Rotors”**.

ISO 11342, 1998. **“Mechanical Vibration-Methods and Criteria for the Mechanical Balancing of Flexible Rotors”**.

ISO 1925, 2001. **“Mechanical Vibration-Balancing-Vocabulary”**.

ISO 2953, 1999. **“Mechanical Vibration Balancing Machines-Description and Evaluation”**.

ISO 10816-1, 1995. **“Mechanical Vibration”**.

ISO 1940-1, 1986. **“Mechanical Vibration”**. Rigid Rotor.

KENNETH, Latino C., 1996. **“Failure Modes & Effects Analysis "A Modified Approach”**. Artigo disponível na internet. URL [http:// www.reliability.com](http://www.reliability.com) , p.1-32. Acessado em abril 2001.

KULI, Thomas J., 2001. **“Entendimento Desbalanceamento e Vibração em Ventiladores”**. Artigo da URL. [http:// proquest.umi.com](http://proquest.umi.com) .2.p.38-42.

LATINO, Robert J., 1994. **“The Failure Dilema, Maintenance Strategies”**. Artigo da internet Resumo 1994-2000. [www.reliability.com](http://www.reliability.com) . p.1-25. Acessado na internet em maio de 2001.

LEVITT, Joel, 1997. **“Managing Preventive Maintenance”**. Artigo disponível na Internet , no endereço, <http://www.maintrainer.com> .p.1-9.

MOUBRAY, John, 1999. **“Manutenção Centrada em Confiabilidade”**. RCM II.

MOUBRAY, John, 1991. **“Reliability Centered Maintenance”**. England, Industrial Press.

MOUBRAY, John, 2000. **“Reliability Centered Maintenance, The Changing World of Maintenance”**. p. 1-11. Artigo disponível na internet, [http:// www.aladon.co.uk/10into.html,2000](http://www.aladon.co.uk/10into.html,2000).

MOUBRAY, John, 1995. **“Maintenance Management A New Paradigm”**. p.1-15, Paper capturado da internet . [http:// www.aladon.co.uk/11pp.html,1995](http://www.aladon.co.uk/11pp.html,1995).

MARRA, José Luiz,1998. **“Medida de Vibração, Uma Ferramenta para Manutenção”**. Escola Politécnica. S. Paulo.

MOBLEY, R. keith, 2000. **“Efetivo uso da Análise de Vibração”**. Artigo da internet.: <http://www.plantservices.com/web>, p.1-4.Acessado em abril 2001.

NAKAJIMA, Seiichi, 1998. **“Total Productive Maintenance- Intrução ao TPM”**. SP.

NASA-National Aeronautics and Space Administration, 1996. **“RCM Guide for Facilities and Collateral Equipment”**.

NEMA MG-1,1998. **“Mechanical Vibration- Measurement”**. Evaluation and Limits.

NEPOMUCENO, L.X., 1985. **“Manutenção Preventiva em Instalações Industriais”**. Editora Edgard Blücher.

Normas. **ISO, 2001. “International Organization for Standardization”**. <http://www.ISO.ch/> ISO. Acessado em maio de 2001.

NOWLAN, F.S. and HEAP, H.F., 1978. **“Reliability Cetered Maintenance”**. San Franciso, Dolby Access Press .

PIOTROWSKI, John, 2000. **“What is Proactive Maintenance?”**. Disponível no endereço. <http://www.maintenanceresoucers.com>. p.1-5. Acessado na internet em maio de 2001.

PIOTROWSKI, John, 1997. **“The Best CBM and Pro-Active Maintenance Programs”**. Artigo internet URL. <http://www.maintenanceresoucers.com>. p.1-13. Acessado na internet em maio de 2001.

**Processando Sinal Digital**, 1996. Endereço disponível na internet <http://www.dsptutor.freeuk.com/index.htm>. p.1-5. Acessado na internet em setembro de 2001 e junho de 2002.

PIOTROWSKI, John,1997 . **“ Condition Based Monitoring”**.

Rockwell Automation,1998. **“Condition Monitoring Withing Enterprise Information Systems, Managing Preventive Maintenance”**. Disponível no site, <http://www.entek.com>. Acessado junho 2001.

SAE, JA 1011,1999. **“Evaluation Criteria for Reliability – Centered Maintenance (RCM) Process”**.

SALLER, Eric, 2000. **“Condições de Monitoramento”**. Artigo em Revista: Tecnologia de Manutenção. Endereço disponível na internet. Acessado na internet em julho de 2001. <http://www.mt-online.com/current/05-01amt2.html>.

SKF Engennering Data & SKF Industries, 1999. **“PA”**. Artigo obtido na internet. Acessado em agosto de 2001. <http://iec.skf.com/>.p.1-11.

SMITH, Anthony M.,1990. **“Maintenance (RCM), Reliability-Centered Maintenance”**. Disponível na internet URL [www.reliability.com](http://www.reliability.com), p.1- 82. Acessado na internet em maio de 2001

SHABLINSKY, Alexander G.,1999. **“Machine Balancing in Field Conditions”**.

STEVENS, David, 1999. **“Vibration Monitoring Case Histories and Bearing Failures (SKF)”**. Institute, USA, Volume 9, Saint Petersburg,. Endereço disponível na internet. Acessado na internet em abril de 2001. <http://www.vibrotek.com/articles/intelect-eng/pic16-e.gif>.p.1-16.

TAYLOR, Frederick Winslow, 1990. **“Princípios da Administração”**. SP.

TECNIKAO, 2000. **“Fabricante de Medidores de Vibração”**. SP.

## **ANEXOS**

**Anexo 1. Nível Global de Vibração.**

[H,V, A / ] - Direção: Horizontal, Vertical e Axial.

[ / V,A,D] - Amplitude: Velocidade, Aceleração e Deslocamento.

Unidades: Velocidade mm/s, Aceleração: m/s<sup>2</sup> e Deslocamento μm.

Posição de medição A, B, C, D e Segunda medição A1, B1, C1 e D1 sucessivamente.

Equip.	Posição				Média, Antes e Depois		Direção / Amplitude	Massa Gramas	Fase Ângulo
	A	B	A1	B1	M(A/B)	M1(A1/B1)			
PMVE 01	4,3	2,5	1,6	0,4	3,4	1,0	H/V	16,21g	173,5°
	7,1	3,7	2,3	0,5	5,4	1,4	V/V		
PMVE 02	23,4	8,2	0,6	0,4	15,8	0,5	H/V	28,4g	325,6°
	21,6	17,8	0,7	0,4	19,7	0,6	V/V		
	-	3,6		0,4	1,8	0,2	A/V		
	119,0	43,0	25,0	10,0	81,0	17,5	H/D		
	112,0	93,0	22,0	9,0	102,5	15,5	V/D		
PMVE 03	3,0	0,4	1,6	1,2	1,7	1,4	H/V	4,5g	70°
	2,8	4,9	2	1,1	3,9	1,6	V/V		
PMVE 04	13,0	5,4	2,0	0,4	9,2	1,2	H/V	7,7g	135°
	9,1	0,6	0,5	0,5	4,9	0,5	V/V	4,4g	109°
	70,0	28,0	11,0	9,0	49,0	10,0	H/D	3,3g	136°
PMVE 05	34,5	21,8	1,9	6,7	28,2	4,3	H/V	32,7g	75°
	20,0	11,5	1,2	8,8	15,8	5,0	V/V	14,4g	337,5°
	-	3,3		5,0	1,7	2,5	A/V	11,8g	90°
	179,0	114,0	30,0	33,0	146,5	31,5	H/D	8,3g	242°
	106,0	60,0	62,0	42,0	83,0	52,0	V/D	6,2g	20°
PMVE 06	3,0	1,0	0,8	1,0	2,0	0,9	H/V	7,3g	218,8°
	3,0	2,9	2,0	1,6	3,0	1,8	V/V		
SMRA 01	4,8	5,0	2,0	2,0	4,9	2,0	H/V	15,0g	240°
	2,1	2,0	2,1	0,3	2,1	1,2	V/V	2,5g	90°
	2,9	-	1,8		1,5	0,9	A/V		
SMRA 02	3,5	0,3	3,0	2,2	1,9	2,6	H/V	15,0g	240°
	5,0	0,2	2,2	1,7	2,6	2,0	V/V	9,3g	170°
	5,1	-	2,2		2,6	1,1	A/V	30,0g	60°
SMRA 03	4,1	1,7	2,3	1,8	2,9	2,1	V/V	9,2g	251°
		1,2		0,4	0,6	0,2	A/V		
SMRA 04	3,0	2,9	1,2	0,5	1,5	0,9	H/V	8,13g	270°
	2,8		2,7		1,4	1,4	A/V		

Continuação do anexo 1.

A/B e A1/B1, são valores médios dos ponto A e B da primeira medição, antes da ação e A1 e B1 da segunda medição, após ação.

Equip.	Posição				Média, Antes e Depois		Direção / Amplitude	Defeito
	A	B	A1	B1	M(A/B)	M1(A1/B1)		
PMVI 01	10,1	13,4	3,2	3,4	11,8	3,3	H/A	Mancais
	21,1	10,2	5,6	3,4	15,7	4,5	V/A	
	-	4,4		1,2	2,2	0,6	A/A	
PMVI 02	7,1	5,5	3,1	2,9	6,3	3,0	H/A	Mancais
	7,8	2,0	2,8	2,5	4,9	2,7	V/A	
PMVI 03	8,3	5,1	3,2	2,9	6,7	3,1	H/A	Mancais
	12,5	9,4	3,5	2,6	11,0	3,1	V/A	
	-	5,5		1,9	2,8	1,0	A/A	

Equip.	Posição				Média, Antes e		Direção / Amplitude	Massa Gramas	Fase Ângulo
	A	B	A1	B1	M(A/B)	M1(A1/B1)			
SPRA 03	3,8	3,4	0,5	0,4	3,6	0,5	H/V	10,7g	106°
	3,3	4,2	1,2	1,2	3,8	1,2	V/V		
STRA 02	3,8	3,5	2,5	2,2	3,7	2,4	H/V	5,2g	175°
	0,4	7,2	0,3	1,3	3,8	0,8	V/V		
	9,0	55,0	7,0	8,0	32,0	7,5	V/D		
PSCI 01	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>A1</b>	<b>B1</b>	<b>C1</b>	<b>D1</b>	
	1,3	4,1	1,6	1,3	1,2	4,1	1,5	1,3	
	<b>M(A/B)</b>		<b>M1(A1/B1)</b>		<b>Direção</b>				
	2,1		1,7		H/V				
PSCI 03	4,0	6,7	0,8	4,8	4,1	6,7	0,7	1,7	
	<b>M(A/B)</b>		<b>M1(A1/B1)</b>		<b>Direção</b>				
	4,1		2,9		H/V				

Continuação do anexo 1.

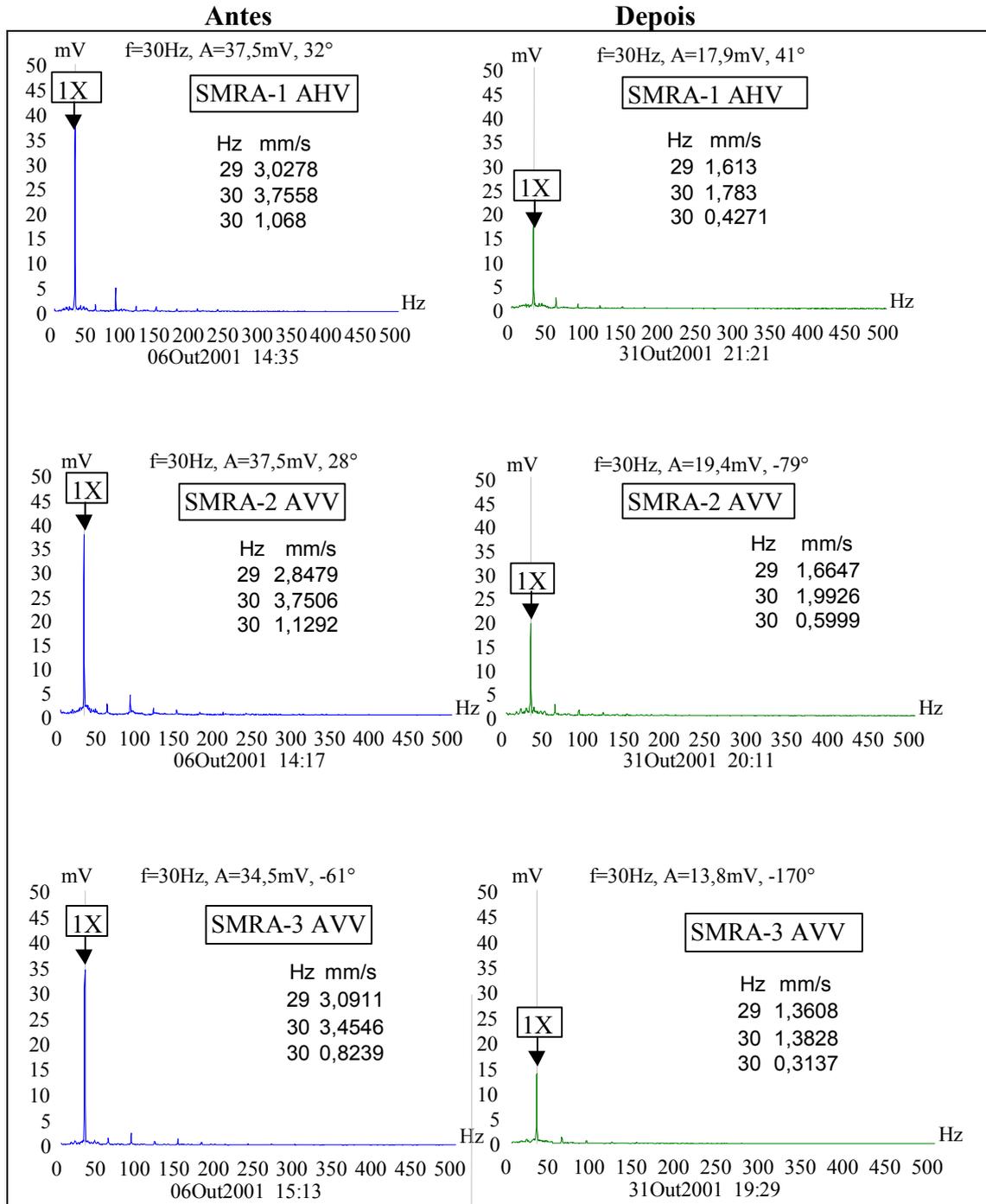
Equip.	Posição				Média, Antes e Depois		Direção / Amplitude	Massa Gramas	Fase Ângulo		
	A	B	A1	B1	M(A/B)	M1(A1/B1)					
PLVI 01	8,6	5,0	1,5	0,9	6,8	1,2	H/V	9,57g	96°		
	10,3	3,5	4,8	2,5	6,9	3,7	V/V				
	-	4,8	0	5,3	2,4	2,7	A/V			7,6g	144,4°
	8,2	11,4	3,0	6,0	9,8	4,5	H/A			5,4g	276,3°
	12,3	6,8	4,4	3,4	9,6	3,9	V/A			4,0g	156,4°
	70,0	71,0	15,0	6,0	70,5	10,5	H/D			3,3g	293,4°
	108,0	43,0	66,0	42,0	75,5	54,0	V/D				
PLVI 02	7,6	4,0	1,0	0,9	5,8	0,95	H/A	Mancal			
PLVI 03	1,6	7,2	0,9	0,9	3,6	0,9	V/V	7,01g	93,7°		
	0	3,0	0	0,4	1,5	0,4	A/V				
PLVE 01	53,0	27,0	20,0	40,0	40,0	30,0	H/D	8g	70°		
	75,0	52,0	45,0	5,0	63,5	25,0	V/D				
PLVE 02	16,8	13,0	1,7	0,7	14,9	1,2	H/V	13,7g	30°		
	6,8	1,2	3,0	0,4	4,0	1,7	V/V				
	7,6	4,0	0,6	1,2	5,8	0,9	H/A			8,5g	354°
	92,0	67,0	36,0	11,0	79,5	23,5	H/D			3,1g	345°
	92,0	67,0	4	9	79,5	6,5	V/D				
PLVE 03	12,4	8,4	1,0	1,5	10,4	1,3	H/V	13g	328°		
	6,8	7,4	0,3	0,3	7,1	0,3	V/V				
	9,1	2,3	1,0	0,9	5,7	1,0	H/A				
	8,2	2,3	0,7	0,3	5,3	0,5	V/A				
	66,0	44,0	28,0	11,0	55,0	19,5	H/D				
PLVE 04	13,5	11,3	0,8	4,1	12,4	2,5	H/V	19,72g	275°		
	5,3	5,8	2,4	3,5	5,6	3,0	V/V	8,6g	239,0		
	-	2,8	1,0	1,2	1,4	1,1	A/V	4,37g	211°		
	70,0	58,0	11,0	25,0	82,0	18,0	H/D	2,2g	225°		

Continuação do anexo 1.

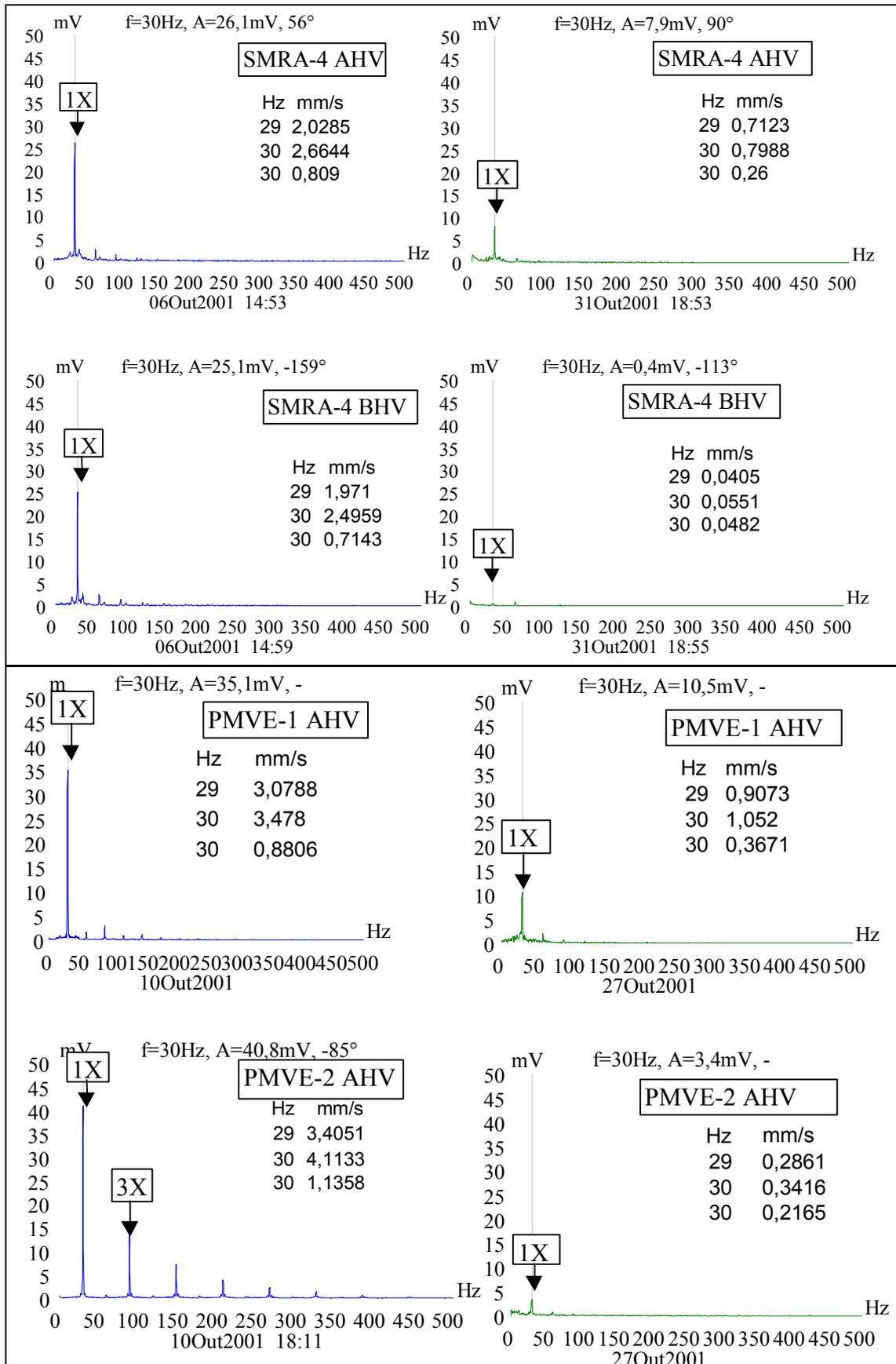
**Observação:** No equipamento PPVE-02 não foi encontrada a solução do balanceamento. O rotor se encontra em um estágio de falha avançado e deve ser substituído. Motivo órbita frontal e lateral fora dos planos de balanceamento.

Equip.	Posição				Média, Antes e Depois		Direção / Amplitude	Massa Gramas	Fase Ângulo
	A	B	A1	B1	M(A/B)	M1(A1/B1)			
PPVE-01	11,5	7,0	0,4	1,6	10,3	1,0	H/V	10,5g	70°
	5,1	1,0	5,2	4,8	8,1	5,0	V/V		
	5,1	1,0	4,8	1,2	6,1	3,0	A/V		
	57,0	35,0	6,0	12,0	55,0	9,0	H/D		
	57,0	35,0	25,0	5,0	61,0	15,0	A/D		
PPVE-02	6,7	4,8			5,8	0,0	H/V		
	3,8	3,9			3,9	0,0	V/V		
	3,8	3,9			3,9	0,0	A/V		
PPVE-03	18,7	4,3	0,8	2,9	11,5	1,9	H/V	30,04g	98°
	7,9	8,0	1,8	2,9	8,0	2,4	V/V		
	7,9	8,0	2,5	0,5	8,0	1,5	A/V		
PPVE-04	15,1	9,0	0,9	1,4	12,1	1,2	H/V	m=11,4g	170°
	27,6	9,5	6,8	3,8	18,6	5,3	V/V	m=4,6g	263°
	27,6	9,5	3,0	2,5	18,6	2,8	A/V		
	85,0	48,0	17,0	9,0	66,5	13,0	H/D	m=3,1g	221°
	120,0	49,0	35,0	13,0	84,5	24,0	V/D		
	85,0	48,0	6,0	5,0	66,5	5,5	A/D		
PPVI-02	3,7	1,0	1,4	1,7	2,4	1,6	V/V	7,5g	63°
	3,7	1,0	0,0	0,4	2,4	0,2	A/V		
	8,2	3,3	3,6	6,8	5,8	5,2	H/A		
	4,8	9,8	1,4	3,8	7,3	2,6	V/A		
	4,8	9,8	0,0	0,9	7,3	0,0	A/A		
PPVI-03	22,7	25,4	3,7	5,8	24,1	4,8	H/A	9,3g	364,5°
	13,1	16,4	1,9	1,1	14,8	1,5	V/A	6,7g	320°
	13,1	16,4	0,0	1,1	14,8	0,6	A/A		
	61,0	54,0	40,0	38,0	96,5	39,0	V/D		

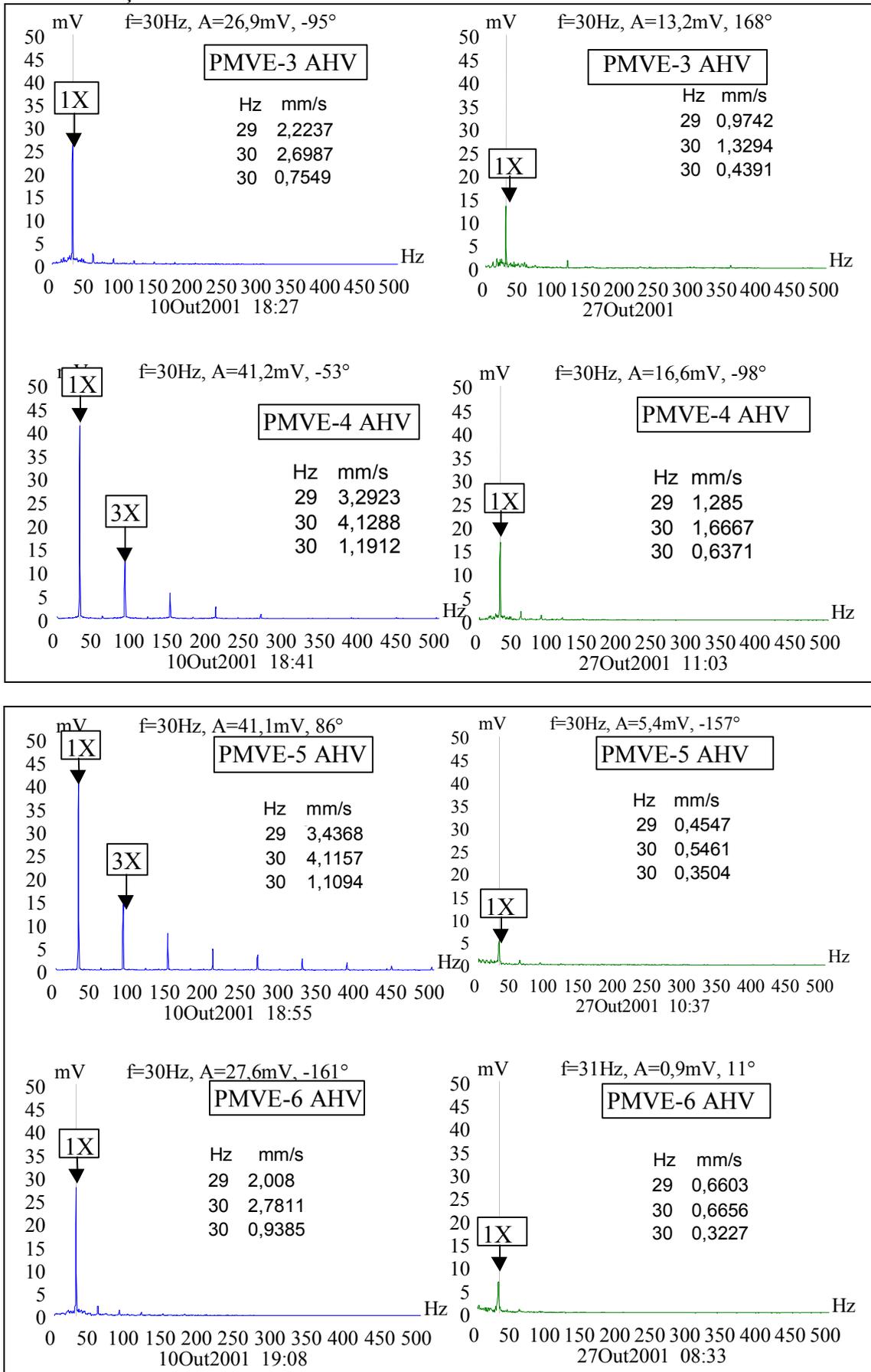
Anexo 2. Espectro da Vibração.



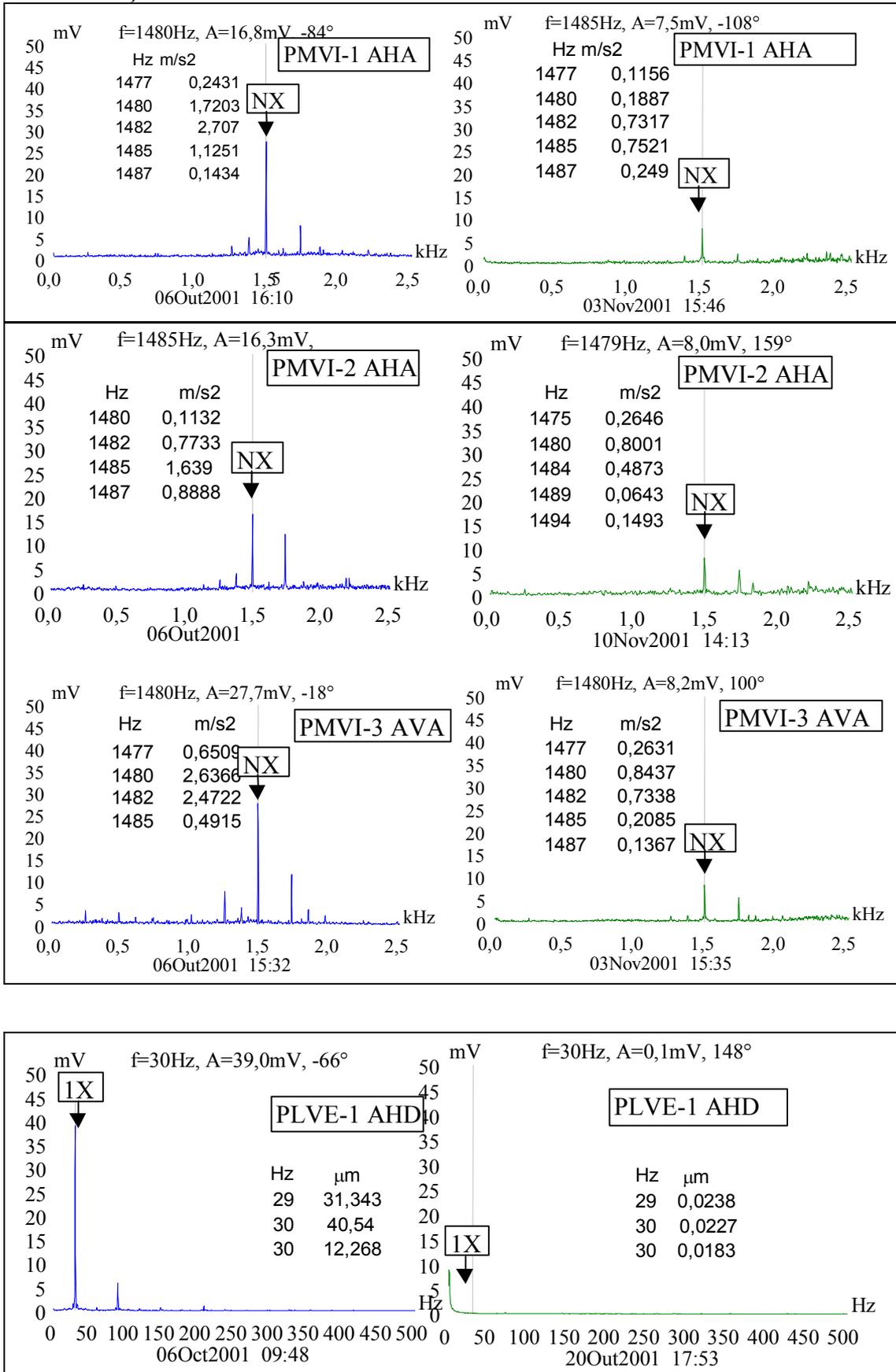
Continuação do anexo 2.



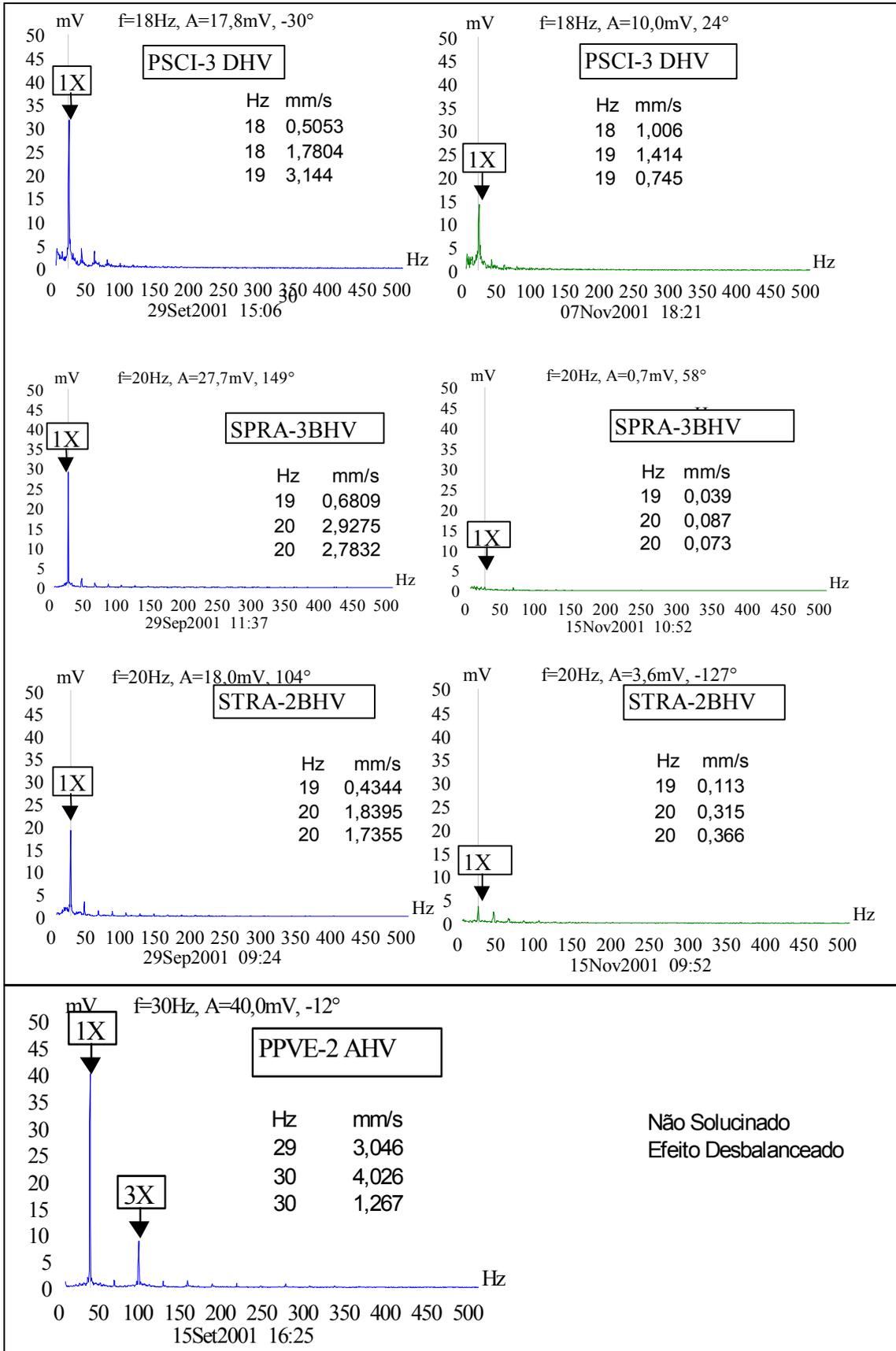
Continuação do anexo 2.



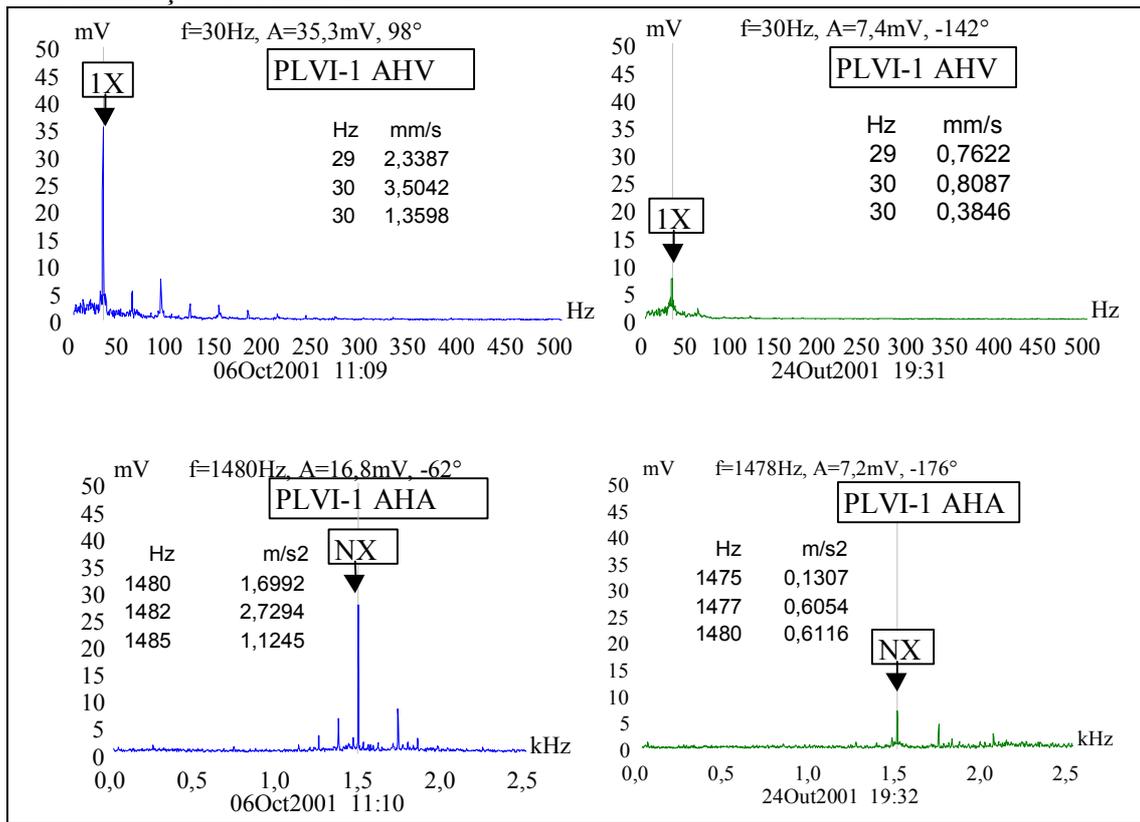
Continuação do anexo 2.



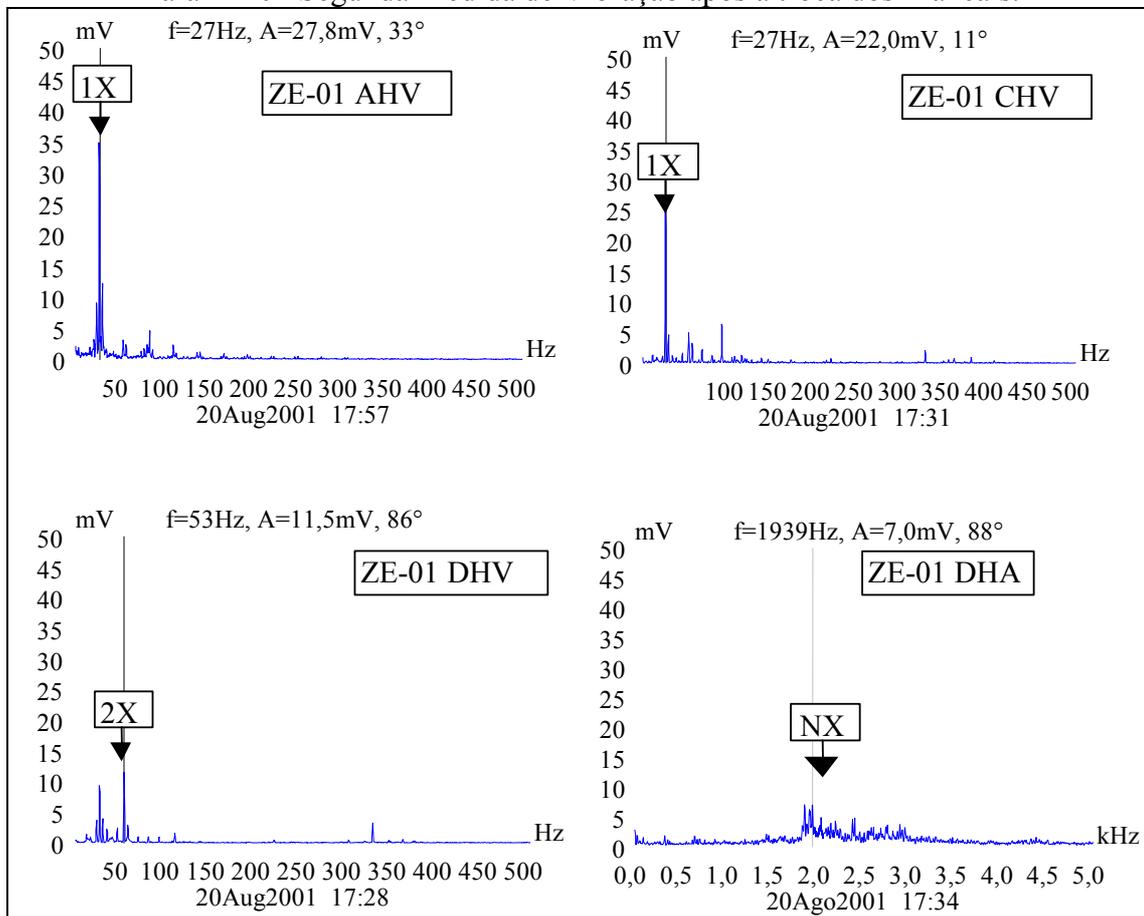
Continuação do anexo 2.



Continuação do anexo 2.

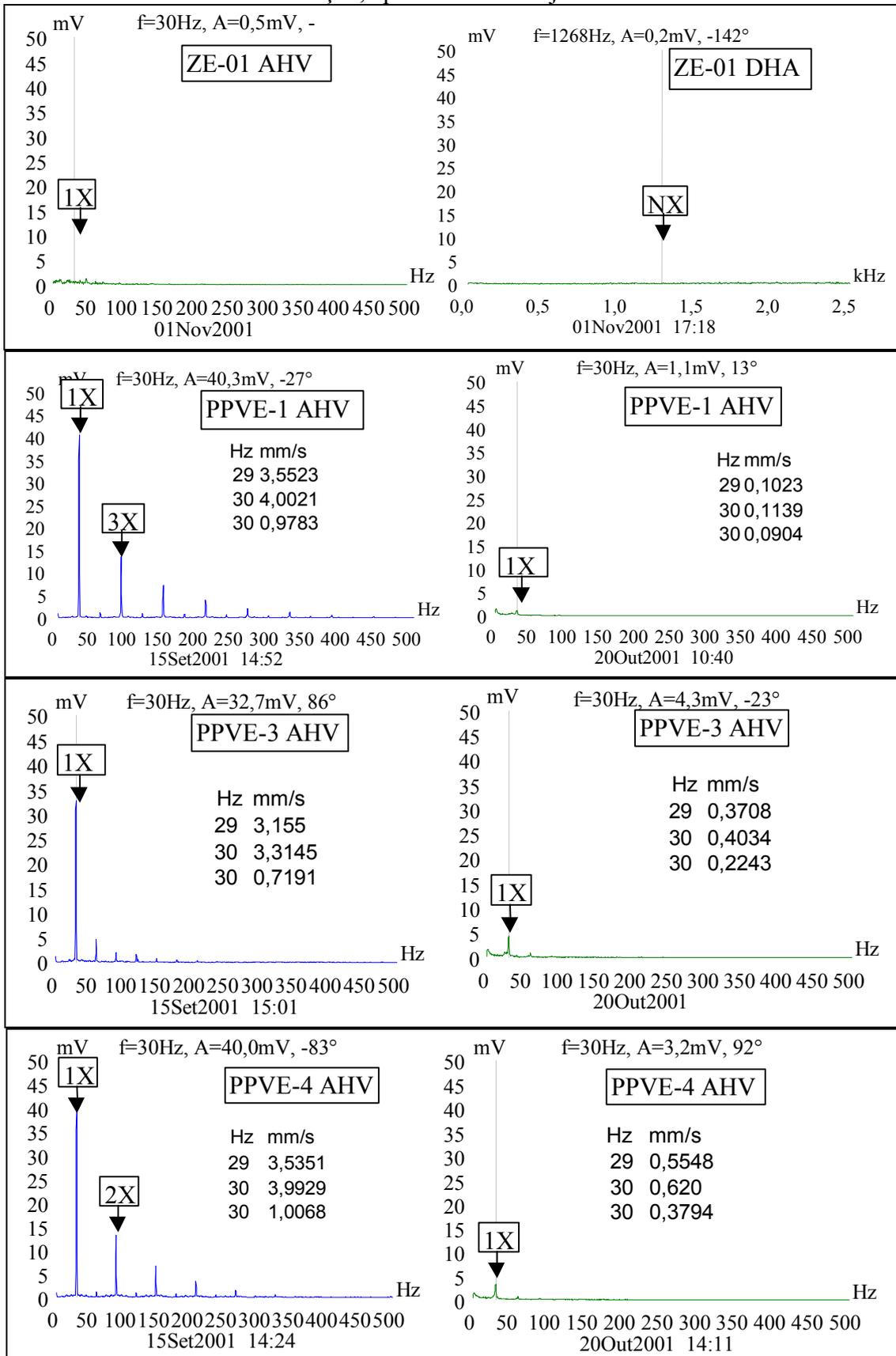


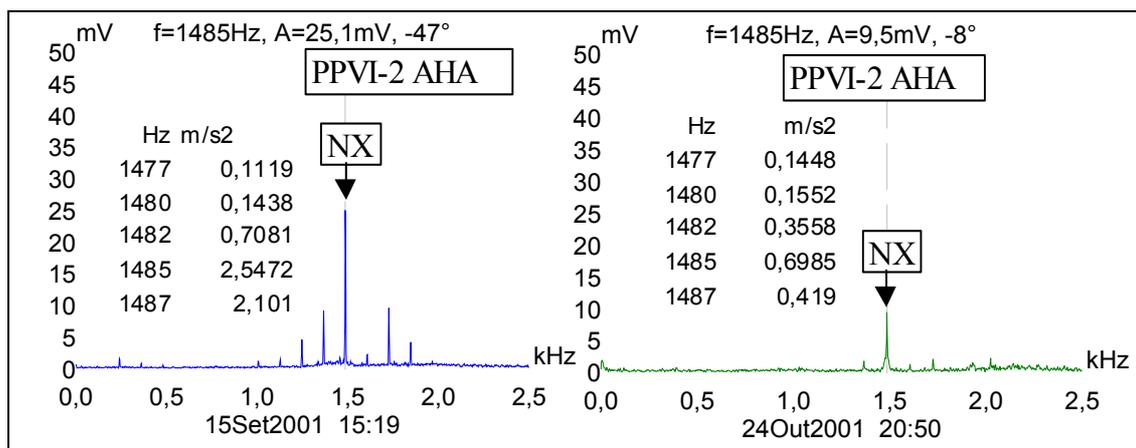
Para ZE-01 Segunda Medida de Vibração após a troca dos Mancais.



Continuação do anexo 2.

ZE-01 Medida final de vibração, após troca do conjunto rotor e mancais.





Anexo 3. Níveis de vibração em função da banda.

Antes						
Limites	Banda1 (0,3 a 0,8)	Banda2 (0,8 a 1,2)X	Banda3 (1,2 a 3,5)X			
	0,72	1,34	0,72			
Equip.	Vibração máxima (mm/s)					
PLVI - 1 AHV	1,14	0,5X	3,09	1X	1,17	2X
PLVE - 2 AHV	0,07		3,64	1X	1,13	2X
PLVE - 3 AHV	0,18		3,62	1X	1,07	2X
PLVE - 4 AHV	0,12		3,89	1X	1,17	2X
PSCI - 1 BHV	0,05		2,85	1X	0,56	
PSCI - 3 BHV	0,15		3,31	1X	0,88	2X
SPRA - 4 AVV	0,32		2,00	1X	0,32	
STRA - 2 BVV	0,18		3,51	1X	0,84	2X
PMVE - 1 AHV	0,20		3,18	1X	0,39	
PMVE - 2 AHV	0,067		3,65	1X	1,16	2X
PMVE - 3 AHV	0,28		2,41	1X	0,41	
PMVE - 4 AHV	0,067		3,62	1X	1,07	2X
PMVE - 5 AHV	0,063		3,66	1X	1,19	2X
PMVE - 6 AHV	0,26		2,39	1X	0,35	
PPVE - 1 AHV	0,10		3,65	1X	1,15	3X
PPVE - 3 AHV	0,15		3,12	1X	0,43	0,43
PPVE - 4 AHV	0,14		3,64	1X	1,12	3X
PPVI - 2 AVV	0,49		2,75	1X	0,56	
SMRA - 1 BHV	0,40		3,31	1X	0,56	
SMRA - 2 AVV	0,36		3,27	1X	0,60	
SMRA - 3 BAV	0,22		3,23	1X	0,43	
SMRA - 4 AHV	0,37		2,34	1X	0,47	
Depois						
SMRA-1 BHV	0,33		1,78	1X	0,41	
SMRA-2 BVV	0,34		1,82	1X	0,41	

**Anexo 4.** Aplicação da equação de amplitude da banda, valores encontrados exemplo, máquina PMVE-06.

Frequência (Hz)	Valor (µV)	Valor mV	Amplitude mm/s	Frequência (Hz)	Valor (µV)	Valor mV	Amplitude mm/s
0	35	0,035	0,0035	22	1112	1,112	0,1112
0	113	0,113	0,0113	23	1102	1,102	0,1102
1	313	0,313	0,0313	<b>23</b>	<b>808</b>	<b>0,808</b>	<b>0,0808</b>
1	281	0,281	0,0281	<b>24</b>	<b>759</b>	<b>0,759</b>	<b>0,0759</b>
2	299	0,299	0,0299	24	549	0,549	0,0549
2	336	0,336	0,0336	25	601	0,601	0,0601
3	275	0,275	0,0275	25	749	0,749	0,0749
3	396	0,396	0,0396	26	1132	1,132	0,1132
4	390	0,39	0,039	26	913	0,913	0,0913
4	298	0,298	0,0298	27	542	0,542	0,0542
5	276	0,276	0,0276	27	813	0,813	0,0813
5	296	0,296	0,0296	28	1131	1,131	0,1131
6	295	0,295	0,0295	28	1983	1,983	0,1983
6	289	0,289	0,0289	29	2543	2,543	0,2543
7	413	0,413	0,0413	29	20080	20,08	2,008
7	401	0,401	0,0401	30	27811	27,811	2,7811
<b>8</b>	<b>353</b>	<b>0,353</b>	<b>0,0353</b>	30	9385	9,385	0,9385
8	278	0,278	0,0278	31	1405	1,405	0,1405
9	286	0,286	0,0286	31	736	0,736	0,0736
9	438	0,438	0,0438	32	1031	1,031	0,1031
10	457	0,457	0,0457	32	887	0,887	0,0887
10	587	0,587	0,0587	33	882	0,882	0,0882
11	475	0,475	0,0475	33	1392	1,392	0,1392
11	484	0,484	0,0484	34	1186	1,186	0,1186
12	529	0,529	0,0529	34	953	0,953	0,0953
12	539	0,539	0,0539	35	773	0,773	0,0773
13	535	0,535	0,0535	<b>35</b>	<b>779</b>	<b>0,779</b>	<b>0,0779</b>
13	459	0,459	0,0459	<b>36</b>	<b>871</b>	<b>0,871</b>	<b>0,0871</b>
14	409	0,409	0,0409	36	1057	1,057	0,1057
14	292	0,292	0,0292	37	1210	1,21	0,121
15	372	0,372	0,0372	37	1011	1,011	0,1011
15	297	0,297	0,0297	38	852	0,852	0,0852
16	398	0,398	0,0398	38	579	0,579	0,0579
16	558	0,558	0,0558	39	657	0,657	0,0657
17	783	0,783	0,0783	39	854	0,854	0,0854
17	764	0,764	0,0764	40	816	0,816	0,0816
18	1001	1,001	0,1001	40	1046	1,046	0,1046
18	883	0,883	0,0883	41	897	0,897	0,0897
19	982	0,982	0,0982	41	820	0,82	0,082
19	1266	1,266	0,1266	42	949	0,949	0,0949
20	938	0,938	0,0938	42	826	0,826	0,0826
20	824	0,824	0,0824	42	763	0,763	0,0763
21	768	0,768	0,0768	43	443	0,443	0,0443
21	542	0,542	0,0542	43	346	0,346	0,0346
21	842	0,842	0,0842	44	339	0,339	0,0339
22	767	0,767	0,0767	44	406	0,406	0,0406

## Continuação do anexo 4.

45	298	0,298	0,0298	70	447	0,447	0,0447
45	343	0,343	0,0343	70	396	0,396	0,0396
46	403	0,403	0,0403	71	343	0,343	0,0343
46	562	0,562	0,0562	71	428	0,428	0,0428
47	414	0,414	0,0414	72	303	0,303	0,0303
47	563	0,563	0,0563	72	253	0,253	0,0253
48	439	0,439	0,0439	73	113	0,113	0,0113
48	469	0,469	0,0469	73	128	0,128	0,0128
49	654	0,654	0,0654	74	156	0,156	0,0156
49	465	0,465	0,0465	74	174	0,174	0,0174
50	278	0,278	0,0278	75	169	0,169	0,0169
50	142	0,142	0,0142	75	159	0,159	0,0159
51	88	0,088	0,0088	76	187	0,187	0,0187
51	187	0,187	0,0187	76	225	0,225	0,0225
52	254	0,254	0,0254	77	226	0,226	0,0226
52	247	0,247	0,0247	77	243	0,243	0,0243
53	173	0,173	0,0173	78	157	0,157	0,0157
53	165	0,165	0,0165	78	287	0,287	0,0287
54	211	0,211	0,0211	79	278	0,278	0,0278
54	206	0,206	0,0206	79	202	0,202	0,0202
55	211	0,211	0,0211	80	126	0,126	0,0126
55	166	0,166	0,0166	80	44	0,044	0,0044
56	218	0,218	0,0218	81	52	0,052	0,0052
56	202	0,202	0,0202	81	96	0,096	0,0096
57	214	0,214	0,0214	82	95	0,095	0,0095
57	208	0,208	0,0208	82	89	0,089	0,0089
58	246	0,246	0,0246	83	113	0,113	0,0113
58	314	0,314	0,0314	83	136	0,136	0,0136
59	375	0,375	0,0375	83	145	0,145	0,0145
59	1948	1,948	0,1948	84	144	0,144	0,0144
60	1911	1,911	0,1911	84	131	0,131	0,0131
60	416	0,416	0,0416	85	140	0,14	0,014
61	461	0,461	0,0461	85	162	0,162	0,0162
61	269	0,269	0,0269	86	155	0,155	0,0155
62	270	0,27	0,027	86	156	0,156	0,0156
62	114	0,114	0,0114	87	170	0,17	0,017
63	246	0,246	0,0246	87	191	0,191	0,0191
63	355	0,355	0,0355	88	199	0,199	0,0199
63	226	0,226	0,0226	88	380	0,38	0,038
64	227	0,227	0,0227	89	1198	1,198	0,1198
64	154	0,154	0,0154	89	871	0,871	0,0871
65	240	0,24	0,024	90	241	0,241	0,0241
65	252	0,252	0,0252	90	217	0,217	0,0217
66	292	0,292	0,0292	91	152	0,152	0,0152
66	366	0,366	0,0366	91	129	0,129	0,0129
67	249	0,249	0,0249	92	65	0,065	0,0065
67	257	0,257	0,0257	92	179	0,179	0,0179
68	215	0,215	0,0215	93	228	0,228	0,0228
68	293	0,293	0,0293	93	104	0,104	0,0104
69	319	0,319	0,0319	94	137	0,137	0,0137
69	317	0,317	0,0317	94	115	0,115	0,0115

## Continuação do anexo 4.

95	175	0,175	0,0175	99	234	0,234	0,0234
96	195	0,195	0,0195	100	315	0,315	0,0315
96	232	0,232	0,0232	100	266	0,266	0,0266
97	176	0,176	0,0176	101	267	0,267	0,0267
97	184	0,184	0,0184	101	270	0,27	0,027
98	121	0,121	0,0121	102	213	0,213	0,0213
98	185	0,185	0,0185	102	144	0,144	0,0144
99	180	0,18	0,018	103	93	0,093	0,0093
				<b>103</b>	<b>79</b>	<b>0,079</b>	<b>0,0079</b>

Resultado:

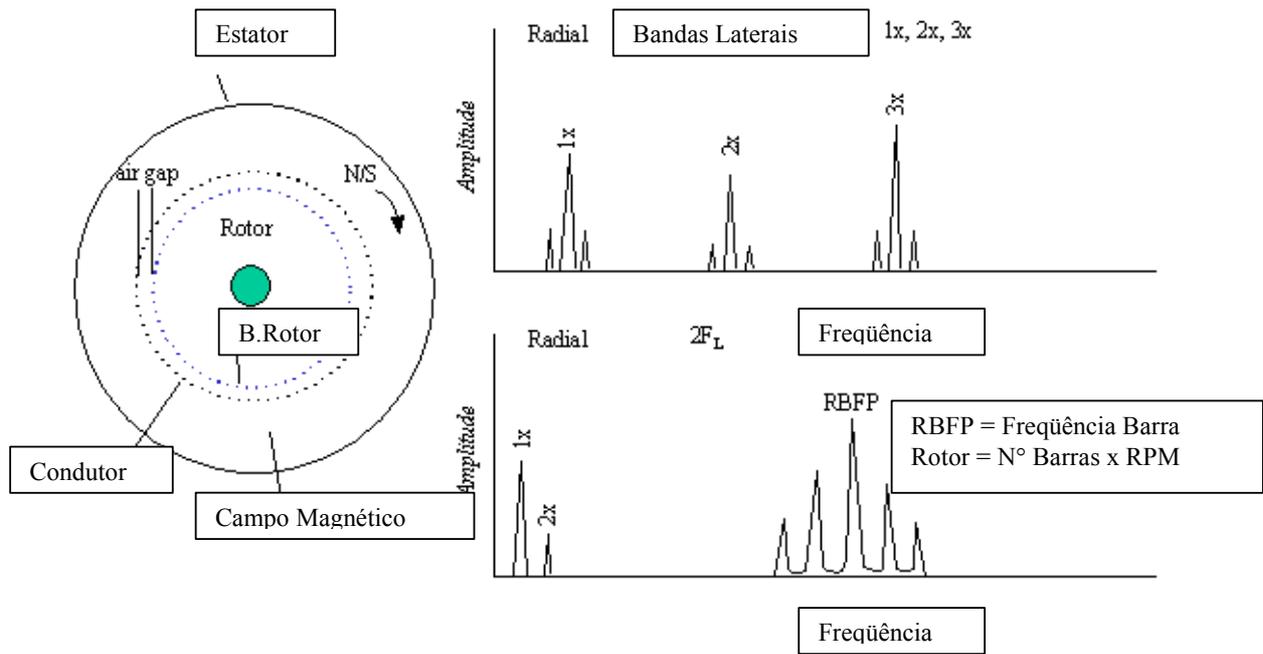
Banda 1 ( 0,26 mm/s )	Banda 2 ( 2,39 mm/s )	Banda 3 ( 0,35 mm/s )
8 Hz a 24 Hz	25 Hz a 35 Hz	36 Hz a 103 Hz

**Anexo 5.** Tabela dos equipamentos com a periodicidade de monitoramento.

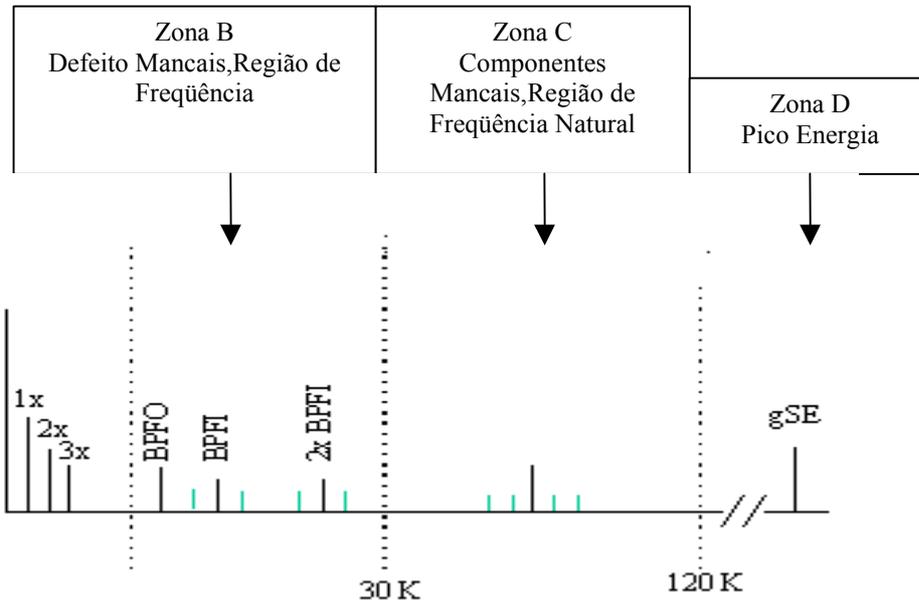
Equip.	Periodo			Equip.	Periodo		
	Mensal	Trimestral	Quadrimestral		Mensal	Trimestral	Quadrimestral
PSCI 01		X		PPVI 02			X
PSCI 03		X		PPVI 03	X		
SPRA 03		X		PMVI 01		X	
STRA 02			X	PMVI 02		X	
PLVI 01	X			PMVI 03		X	
PLVI 02		X		PMVE 01		X	
PLVI 03			X	PMVE 02	X		
PLVE 01			X	PMVE 03			X
PLVE 02	X			PMVE 04	X		
PLVE 03		X		PMVE 05	X		
PLVE 04	X			PMVE 06		X	
PPVE 01		X		SMRA 01	X		
PPVE 02	X			SMRA 02	X		
PPVE 03	X			SMRA 03		X	
PPVE 04	X			SMRA 04		X	

**OBS:** Os outros equipamentos com níveis de vibração dentro dos limites devem ser monitorados em periodo quadrimestral.

**Anexo 6, Espectro defeito entre rotor e estator.**



**Anexo 7. Defeito em mancais causado por várias frequências.**



Continuação do anexo 7.

Formulas para cálculo da frequência dos defeitos em mancais:

$$BPFO = \frac{Nb}{2} \left( \frac{1 - Bd \cos \theta}{Pd} \right) * RPM$$

$$BPFI = \frac{Nb}{2} \left( \frac{1 + Bd \cos \theta}{Pd} \right) * RPM$$

$$BSF = \frac{Pd}{2Bd} \left[ \frac{1 - \left( \frac{Bd}{Pd} \right)^2 (\cos \theta)^2}{2} \right] * RPM$$

$$FTF = \frac{1}{2} \left( \frac{1 - Bd \cos \theta}{Pd} \right) * RPM$$

BPFO = Falha na pista externa;

BPFI = Falha na pista interna;

BSF = Falha na superfície das esferas;

FTF = Falha na gaiola devido desbalanceamento;

RPM = frequência de rotação;

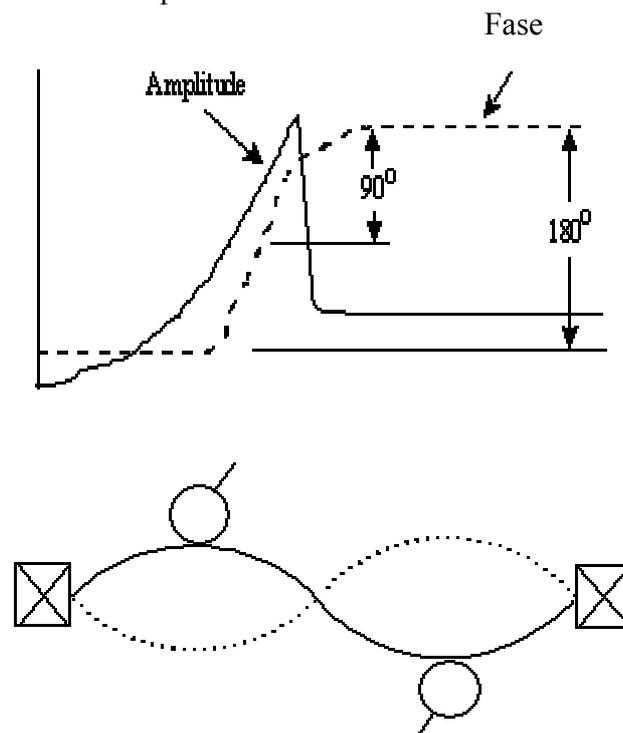
Pd = Diâmetro entre centro das esferas;

Nb = Número de esferas;

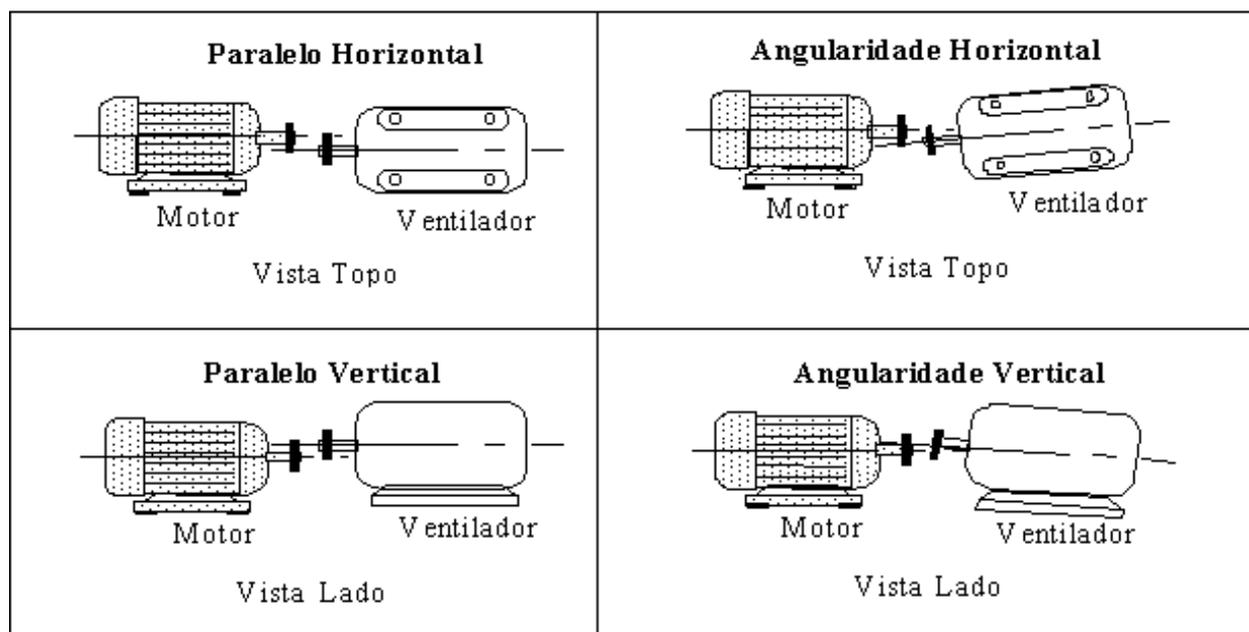
Bd = Diâmetro das esferas;

$\theta$  = Ângulo de contato em graus da esfera com a pista interna;

#### Anexo 8. Ocorrência da Frequência Natural.

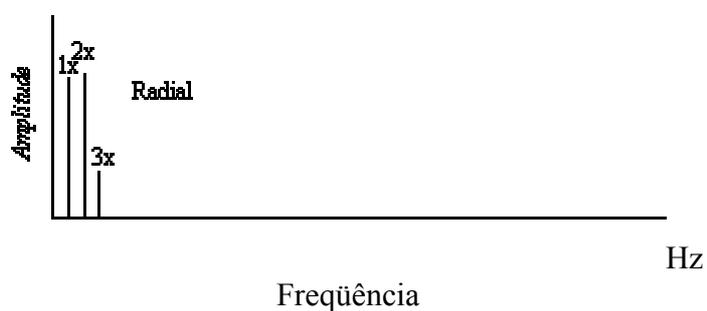


**Anexo 9. Desalinhamento paralelo e angular.**

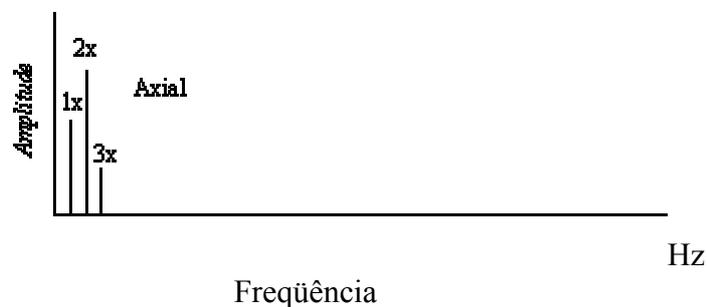


**Paralelo e Angular**

Espectro típico desalinhamento paralelo e angular:



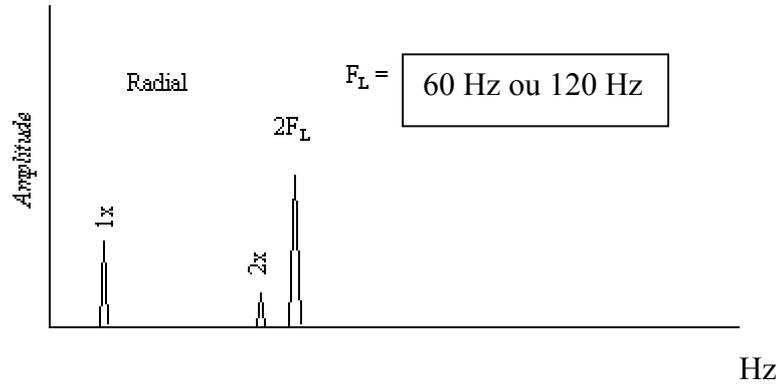
Desalinhamento Paralelo



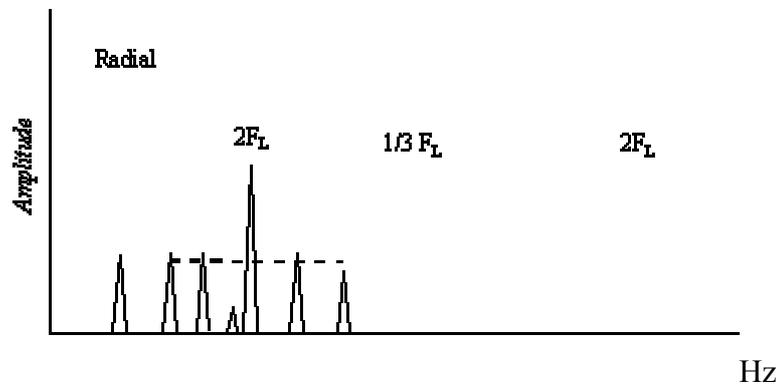
Desalinhamento Angular

**Anexo10.** Espectro típico defeito motor indução.

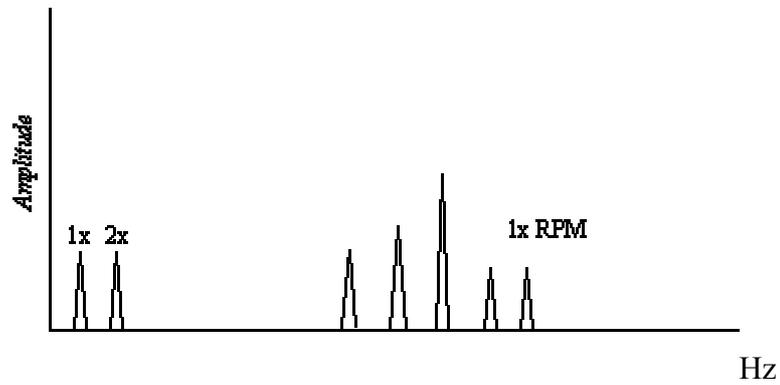
Linha da frequência elétrica..



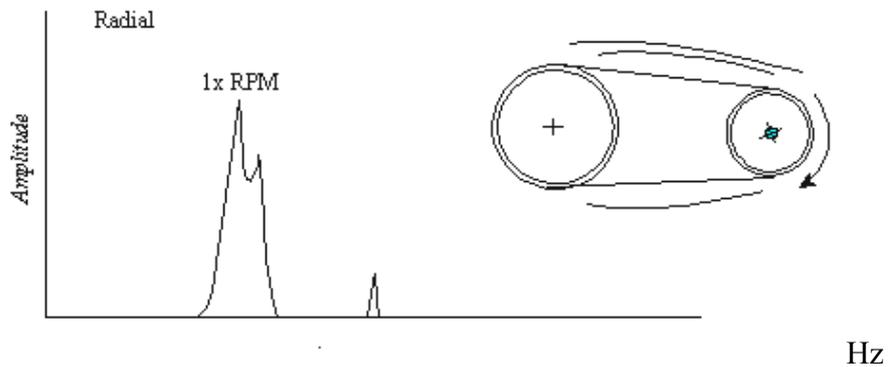
Fase elétrica, bandas laterais ao redor da frequência elétrica.



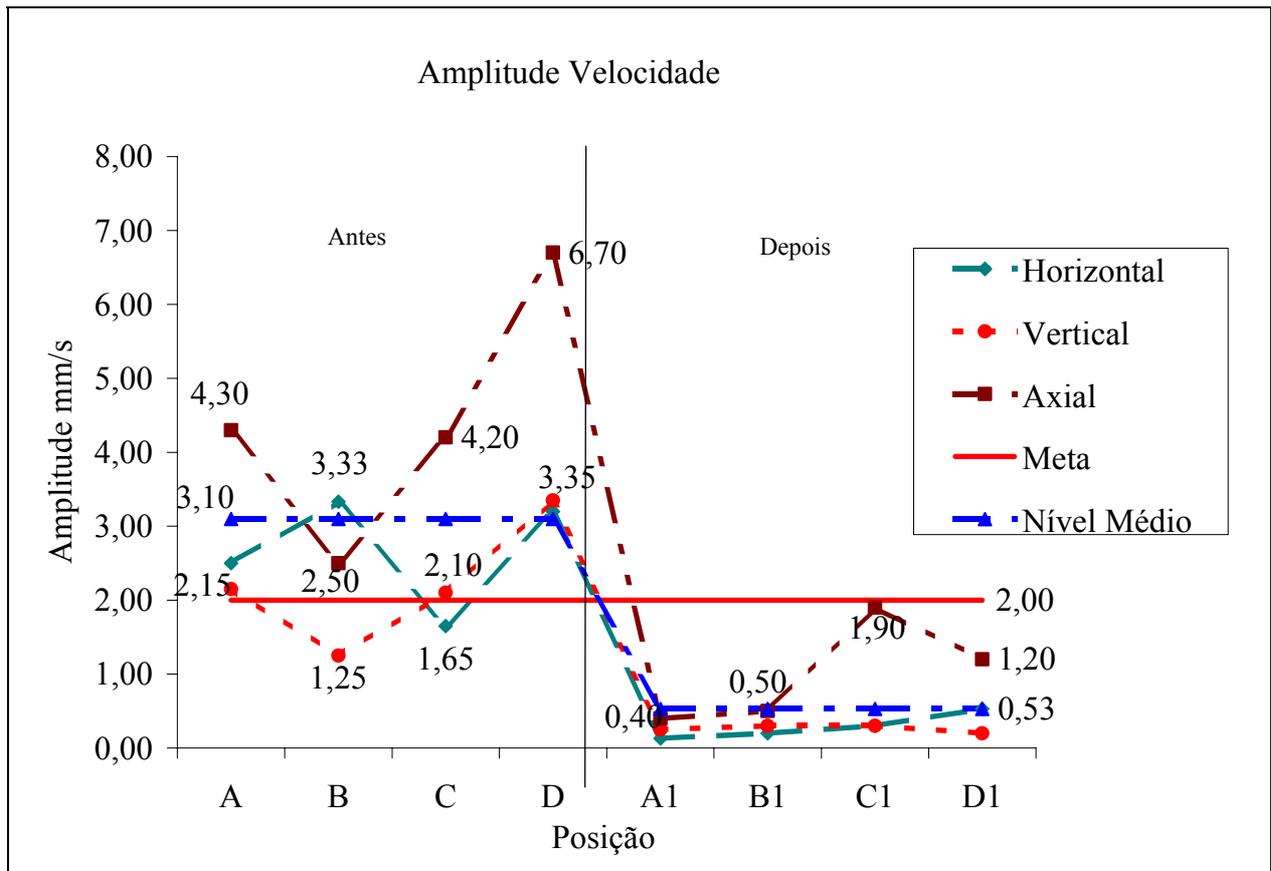
Frequência de passo do enrolamento(pico) e bandas laterais em 1XRPM.



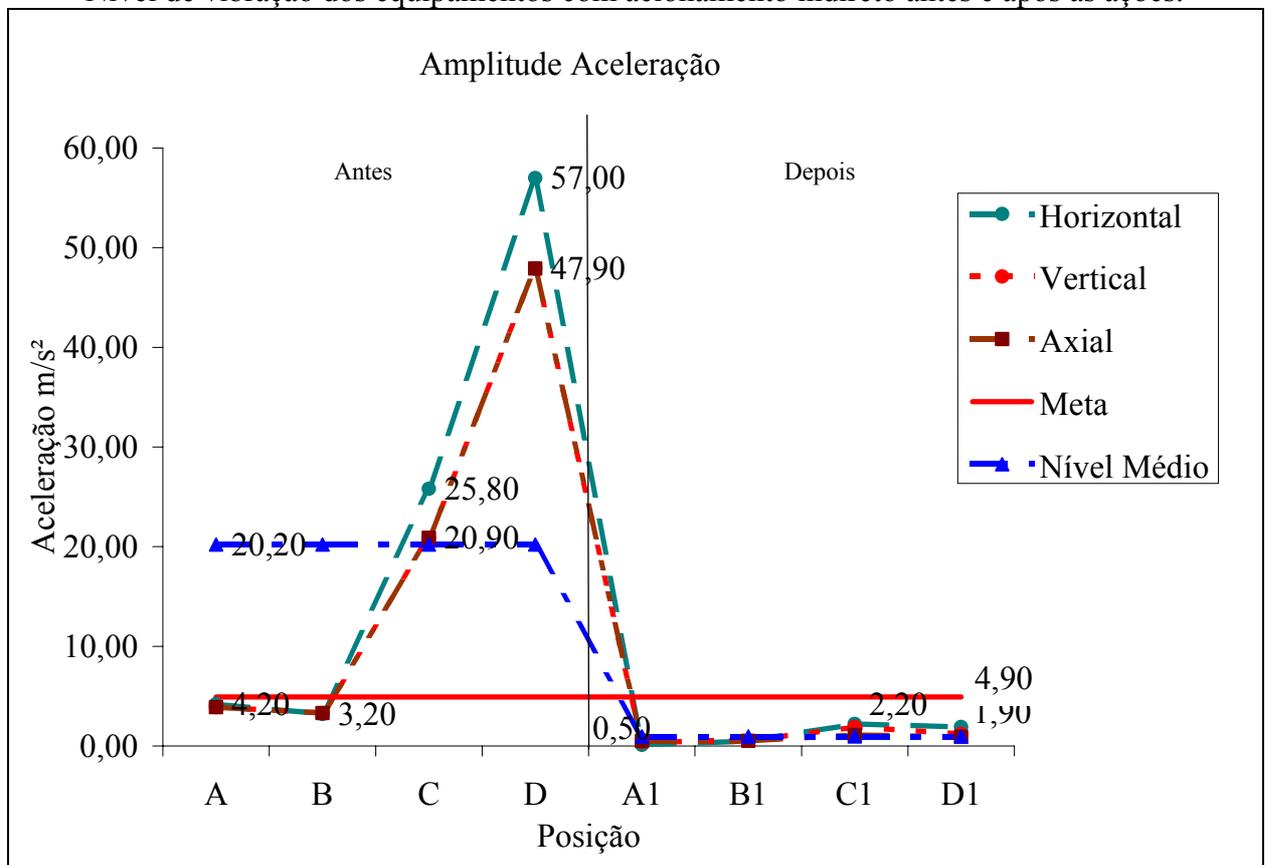
Ressonância em correias



**Anexo 11.** Gráficos dos níveis de vibração, equipamentos com acionamento indireto.



Nível de vibração dos equipamentos com acionamento indireto antes e após as ações.



Nível de vibração dos equipamentos com acionamento indireto antes e após as ações.

**Anexo 12.** Conjuntos ventiladores no processo, fonte JDB.

Conjunto com acionamento direto.



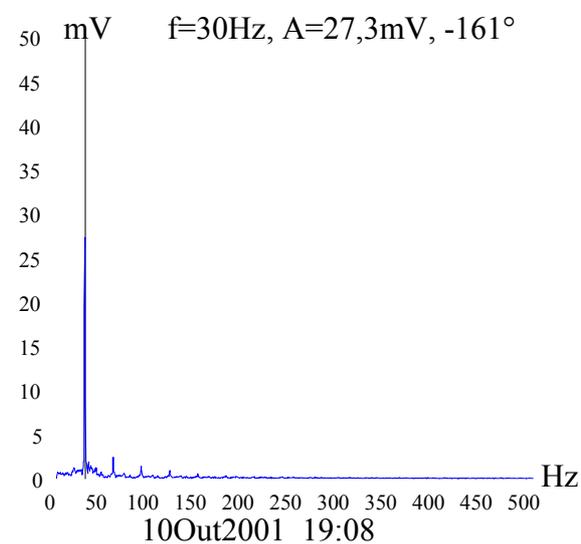
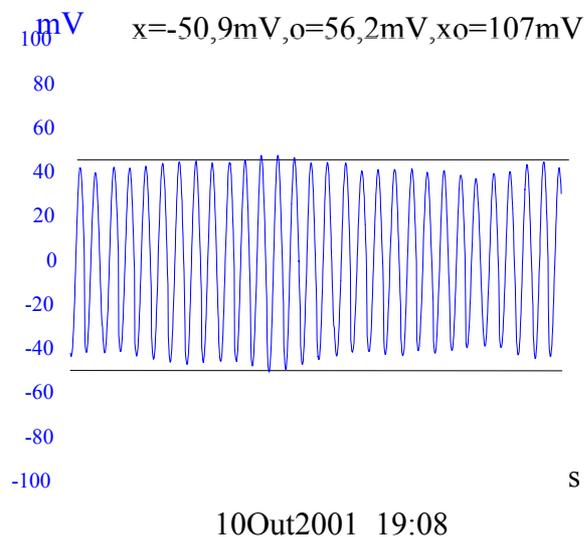
Conjunto com acionamento por correias.



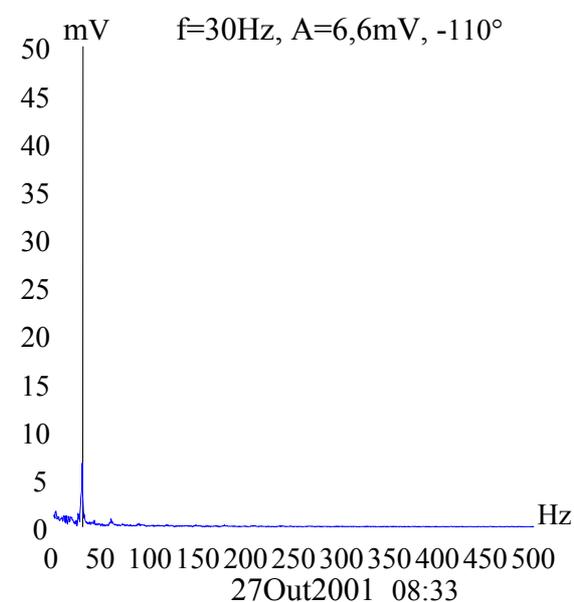
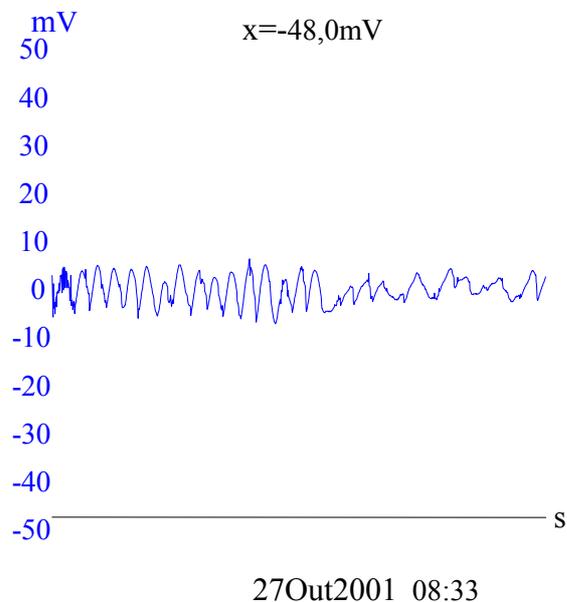
**Anexo 13.** Espectro no tempo e na frequência da PMVE-06.

Espectro AHV, Posição Horizontal Ponto A.

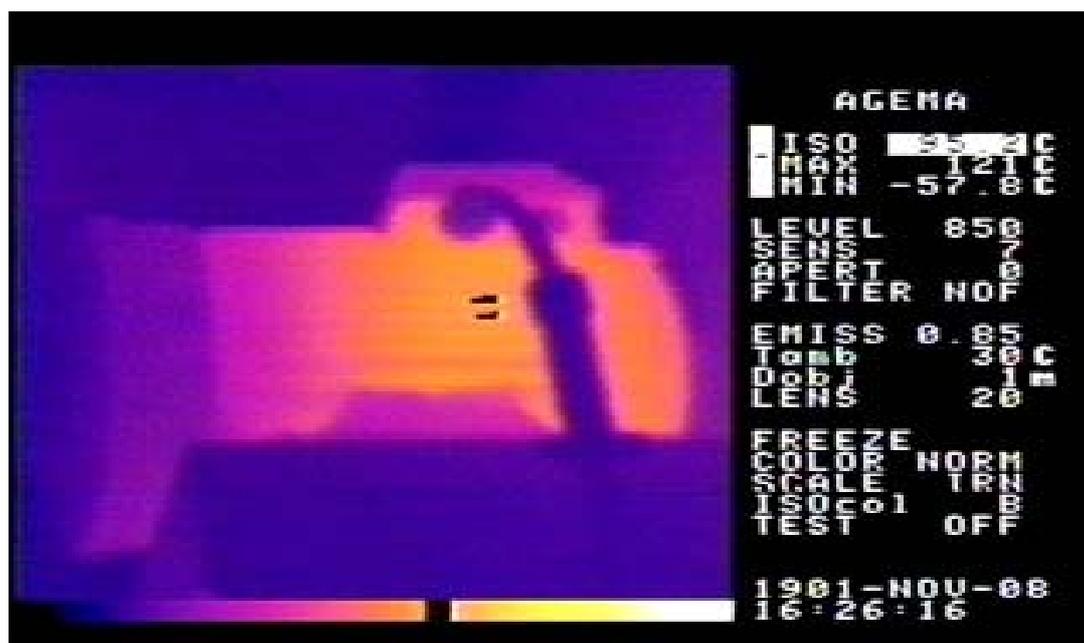
Antes da ação



Após ação



### Anexo 14. Imagem térmica motor de indução 5cv,1800 RPM.

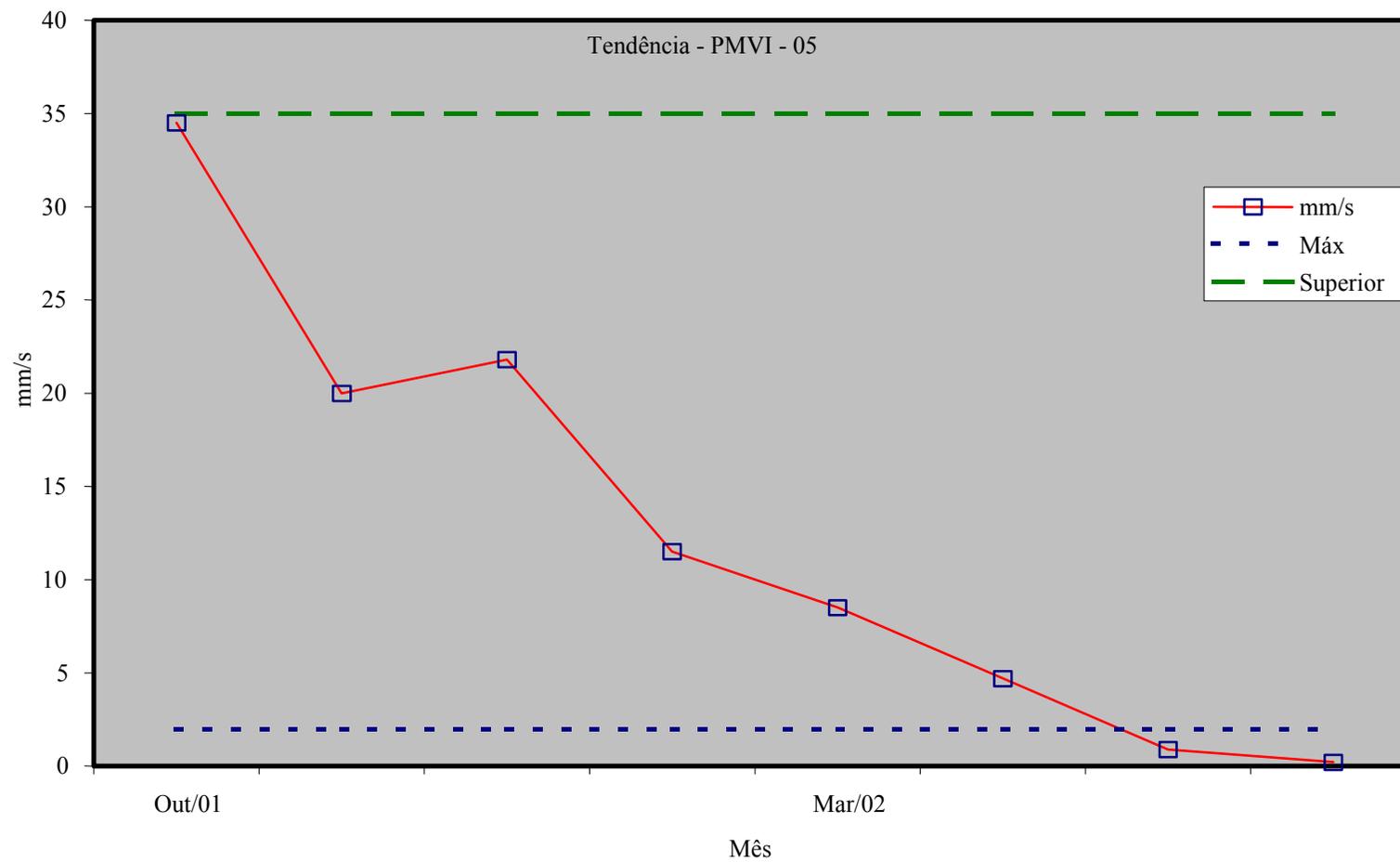


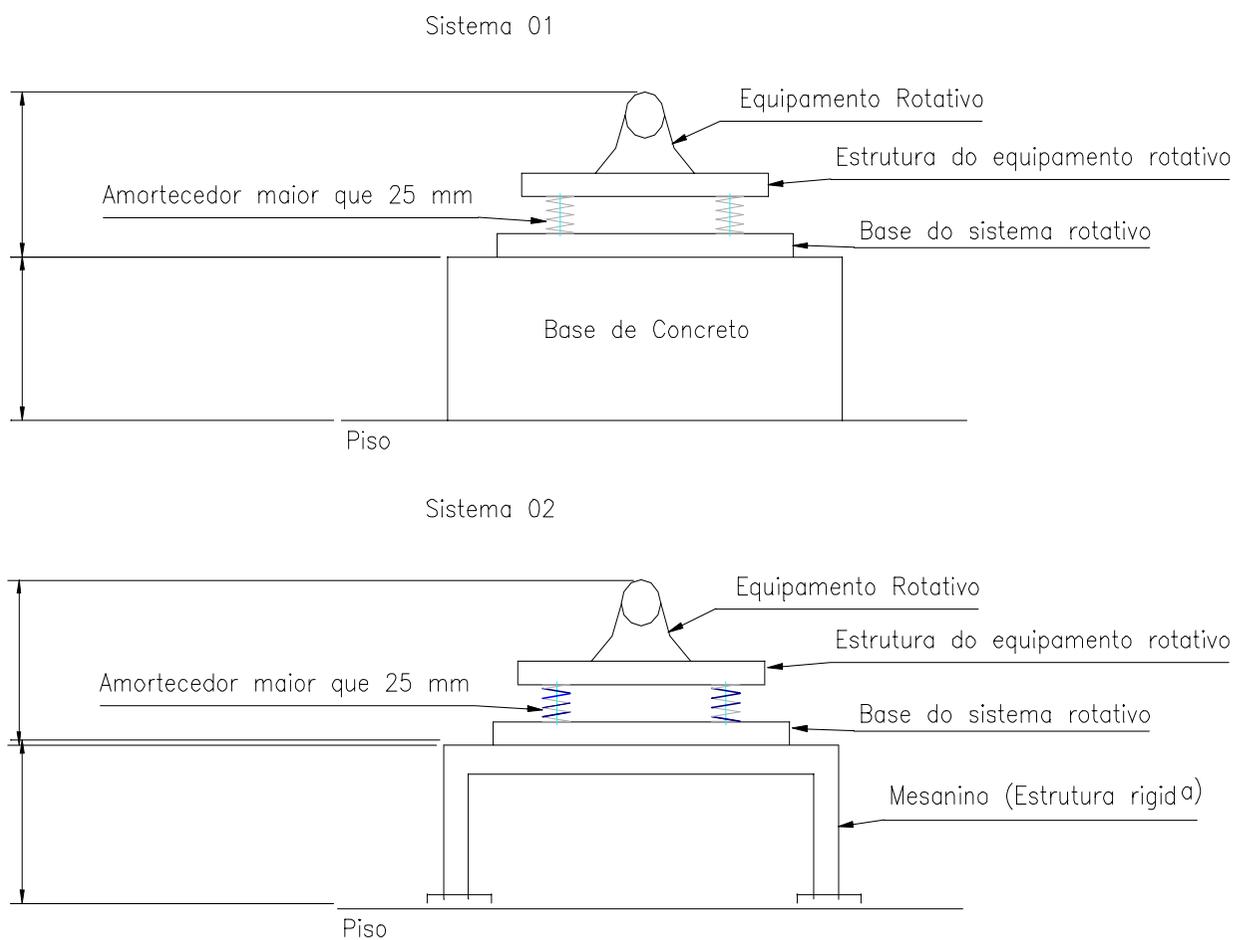
Fonte: JDB e Imagem Colaboração da Empresa Trafo Equipamentos.

**Anexo 15.** Análise de tendência do parâmetro viscosidade. Valores em centistokes ou mm<sup>2</sup>/s.



Fonte: JDB e Colaboração Mobil Oil do Brasil, programa Monitor

**Anexo 16.** Tendência do Nível de Vibração.

**Anexo 17. Sistema de estrutura e apoio para máquinas rotativas - Ventiladores.**

**Anexo 18, LISTA DE EQUIPAMENTOS PARA ANÁLISE DE VIBRAÇÃO**

IDENTIFICAÇÃO					PARÂMETROS						
Código	Função	Processo	Acionamento	Potência (cv)	Rotação (RPM)	Corrente Nom. (A)	Diâmetro Eixo Motor (mm)	Diâmetro Eixo Ventilador (mm)	Capacidade (m³/h)	Pontos Monitorados	Nº Pás Ventilador
PMVI 01	Insuflador	Pintura de Máquinas	Direto Horizontal	30	1778	33,8	48,0	48,0	30000	5	12
PMVI 02	Insuflador	Pintura de Máquinas	Direto Horizontal	30	1779	32,6	48,0	48,0	30000	5	12
PMVI 03	Insuflador	Pintura de Máquinas	Direto Horizontal	30	1774	35,7	48,0	48,0	30000	5	12
PMVI 04	Insuflador	Pintura de Máquinas	Direto Horizontal	30	1777	34,0	48,0	48,0	30000	5	12
PMVE 01	Exaustor	Pintura de Máquinas	Direto Horizontal	20	1774	20,5	42,0	42,0	23000	5	12
PMVE 02	Exaustor	Pintura de Máquinas	Direto Horizontal	20	1774	20,7	42,0	42,0	23000	5	12
PMVE 03	Exaustor	Pintura de Máquinas	Direto Horizontal	20	1773	20,8	42,0	42,0	23000	5	12
PMVE 04	Exaustor	Pintura de Máquinas	Direto Horizontal	20	1773	20,7	42,0	42,0	23000	5	12
PMVE 05	Exaustor	Pintura de Máquinas	Direto Horizontal	20	1774	20,2	42,0	42,0	23000	5	12
PMVE 06	Exaustor	Pintura de Máquinas	Direto Horizontal	20	1759	19,1	42,0	42,0	23000	5	12
SMRA 01	Aquecedor	Secador Máquinas	Direto Vertical	20	1777	21,5	42,0	42,0	23000	5	6
SMRA 02	Aquecedor	Secador Máquinas	Direto Vertical	20	1778	19,8	42,0	42,0	23000	5	6
SMRA 03	Aquecedor	Secador Máquinas	Direto Vertical	20	1776	21,2	42,0	42,0	23000	5	6
SMRA 04	Aquecedor	Secador Máquinas	Direto Vertical	20	1777	20,6	42,0	42,0	23000	5	6
PLVI 01	Insuflador	Pintura Lanças	Direto Horizontal	30	1780	30,2	48,0	48,0	30000	5	12
PLVI 02	Insuflador	Pintura Lanças	Direto Horizontal	30	1778	30,7	48,0	48,0	30000	5	12
PLVI 03	Insuflador	Pintura Lanças	Direto Horizontal	30	1773	32,8	48,0	48,0	30000	5	12
PLVE 01	Exaustor	Pintura Lanças	Direto Horizontal	20	1763	21,6	42,0	42,0	23000	5	12
PLVE 02	Exaustor	Pintura Lanças	Direto Horizontal	20	1770	24,0	42,0	42,0	23000	5	12
PLVE 03	Exaustor	Pintura Lanças	Direto Horizontal	20	1771	21,4	42,0	42,0	23000	5	12
PLVE 04	Exaustor	Pintura Lanças	Direto Horizontal	20	1767	22,0	42,0	42,0	23000	5	12
PPVI 01	Insuflador	Pintura Peças	Direto Horizontal	30	1779	29,5	48,0	48,0	30000	5	12
PPVI 02	Insuflador	Pintura Peças	Direto Horizontal	30	1773	31,4	48,0	48,0	30000	5	12
PPVI 03	Insuflador	Pintura Peças	Direto Horizontal	30	1774	33,0	48,0	48,0	30000	5	12
PPVE 01	Exaustor	Pintura Peças	Direto Horizontal	20	1771	24,2	42,0	42,0	23000	5	12
PPVE 02	Exaustor	Pintura Peças	Direto Horizontal	20	1771	20,6	42,0	42,0	23000	5	12
PPVE 03	Exaustor	Pintura Peças	Direto Horizontal	20	1740	21,4	42,0	42,0	23000	5	12
PPVE 04	Exaustor	Pintura Peças	Direto Horizontal	20	1773	20,1	42,0	42,0	23000	5	12
RPCVI 01	Insuflador	Resfriamento Peças	Indireto Simples(x2)	25	1782/1168	27,0	42,0	60,0	32500	11	12

Continuação do anexo 18.

RPCVI 02	Insuflador	Resfriamento Peças	Indireto Simples(x2)	25	1770/1165	24,8	42,0	60,0	32500	11	12
RPCVE 01	Exaustor	Resfriamento Peças	Indireto Simples(x3)	25	1770/1165	23,0	48,0	48,0	65000	11	12
PSVE 01	Exaustor	Cabina Spray	Indireto Simples(x4)	60	1770	84,0	60,0	80,0	80000	11	8
PSVE 02	Exaustor	Cabina Spray	Indireto Simples(x4)	60	1770	84,0	60,0	80,0	80000	11	8
PSCI 01	Insuflador	Cabina Spray	Indireto Duplo(x3)	48	1765/1100	71,5	55,0	60,0	60000	11	8
PSCI 02	Insuflador	Cabina Spray	Indireto Duplo(x3)	48	1765/1100	71,5	55,0	60,0	60000	11	8
PSCI 03	Insuflador	Cabina Spray	Indireto Duplo(x3)	48	1765/1100	71,5	55,0	60,0	60000	11	8
RPVI 01	Insuflador	Zona Resfriamento	Indireto Duplo(x3)	48	1760/1083	59,0	55,0	60,0	60000	11	8
RPVE 02	Exaustor	Zona Resfriamento	Indireto Duplo(x4)	20	1760/1083	23,6	41,5	60,0	60000	11	8
SPRA 01	Recirculador	Secador D' Água	Direto Horizontal	20	1170	29,5	75,0	75,0	46000	5	6
SPRA 02	Recirculador	Secador D' Água	Direto Horizontal	20	1170	29,5	75,0	75,0	46000	5	6
STRA 01	Recirculador	Secador de Tinta	Direto Horizontal	20	1170	29,5	75,0	75,0	46000	5	6
STRA 02	Recirculador	Secador de Tinta	Direto Horizontal	20	1170	29,5	75,0	75,0	46000	5	6
Ze01-06	Exaustor	Gases	Indireto Simples(x2)	10	17601290	15,0		63	10 000	11	9