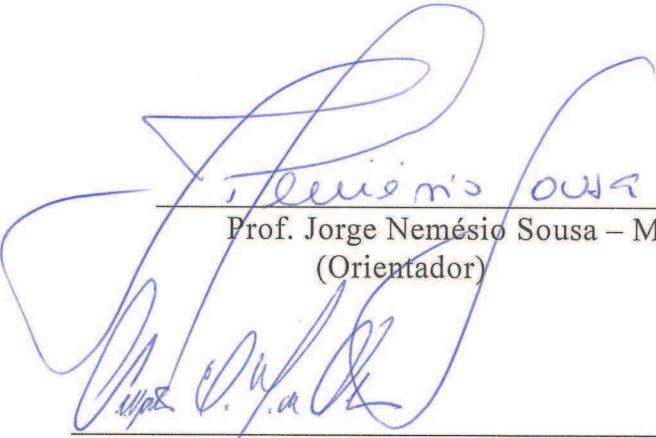


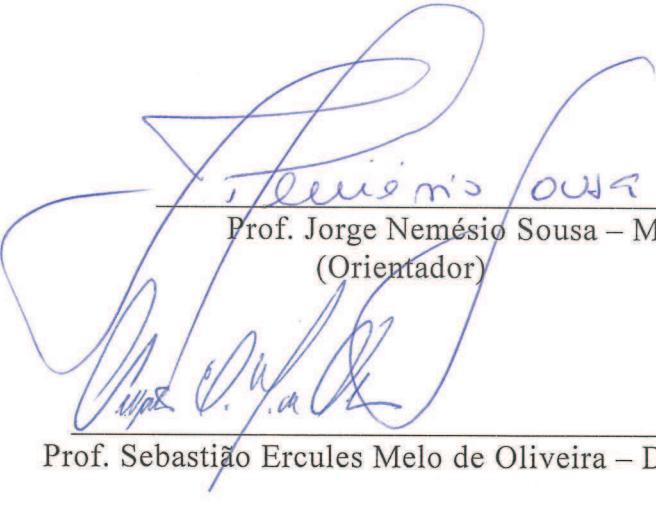
TECNICAS PREDITIVAS DE MANUTENÇÃO DE MÁQUINAS ROTATIVAS

Fernanda Rosa Spamer

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovada por:


Prof. Jorge Nemésio Sousa – M.Sc.
(Orientador)


Prof. Sébastião Ercules Melo de Oliveira – D.Sc.


Prof. Sérgio Sami Hazen – Ph.D

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
AGOSTO DE 2009

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por tudo que tenho em minha vida.

Ao Professor Jorge Nemésio Sousa pela sabedoria que se torna fonte de inspiração, e pelo apoio incondicional durante a realização desse trabalho.

À minha família, em especial à minha amada mãe, pelo apoio incondicional e imensurável em todos os momentos que dela precisei (e realmente não foram poucos). A sua perseverança é minha locomotiva.

Ao meu marido Vitor Lobato da Silva pela compreensão, paciência, encorajamento, tolerância e otimismo dispensados todos os dias.

Finalmente, a todos aqueles que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização esse trabalho.

RESUMO

A maioria das máquinas industriais modernas opera a partir de motores, que podem, com o uso, desenvolver defeitos ou falhas. Estas ocorrências podem causar paradas das máquinas ou a diminuição do nível de eficiência do processo produtivo. Quando uma máquina desenvolve um defeito ou falha, ela apresenta indícios de defeitos de várias formas: mudanças nos sinais de vibrações, variação da temperatura, ruídos e alterações no campo eletromagnético. Este trabalho apresenta a detecção de falhas em motores elétricos por meio das técnicas de manutenção preditiva.

Um programa de manutenção preditiva deve englobar várias técnicas de monitoramento das condições das máquinas rotativas. Dentre elas podem-se citar como clássicas a análise de corrente elétrica e a análise de vibrações. Entretanto, existe um grande número de dificuldades associadas com estas técnicas e, consequentemente, com suas aplicações práticas. Isto devido à abrangência de detecção de ocorrências anormais no seu funcionamento, tais como: defeitos ou falhas em barras rotativas do rotor e no estator, desbalanceamento de tensão e curto-circuito – entre fases e espiras.

O presente estudo se propõe a apresentar uma proposta de solução neste contexto. Tem como objetivo desenvolver uma metodologia para a construção de um programa de manutenção baseado em condição, visando dar suporte às atividades de manutenção industrial e melhorar a sua confiabilidade. A metodologia proposta apresenta conceitos de MCC - Manutenção Centrada em Confiabilidade e Técnicas de Manutenção Preditiva.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de Manutenção

Figura 2 - Partes Principais do Motor de Corrente Contínua

Figura 3 - Partes Constituintes do Motor de Corrente Contínua

Figura 4 - Ponte de 6 Pulso

Figura 5 - Aspecto do Resultado da Retificação

Figura 6 - Exemplo de Aplicação de Motor CA

Figura 7 - Exemplo de um Motor Síncrono

Figura 8 - Corte Longitudinal do Motor Assíncrono

Figura 9 - Exemplo de Motor de Indução em Anéis

Figura 10 - Rotor Gaiola de Esquilo

Figura 11 - Percentuais de Falhas x Partes dos Motores

Figura 12 - Soma da Primeira e Quinta Harmônicas

Figura 13 - Sinal e Decomposição em Frequência

Figura 14 - Viscosidade Cinemática

Figura 15 - Exemplo de Acompanhamento de um Redutor

Figura 16 - Exemplo de Espectro de Absorbância Obtido por Infravermelho

Figura 17 - Cromatograma Obtido a Partir de um Transformador Problemático

Figura 18 - Pêndulo e Onda no Tempo - Criação de um Ciclo

Figura 19 - Demonstração de Onda no Tempo e em FFT e os Pontos de Medição

Figura 20 - Representação de uma Amplitude

Figura 21 - Representação de uma Fase

Figura 22 - Representação de Nível de Vibração

Figura 23 - Representação do Início de Defeito

Figura 24 - Representação do Defeito com Maior Severidade

Figura 25 - Representação da Falha, situação já intermitente

Figura 26 - Representação da Defasagem dos Parâmetros de Vibração

Figura 27 - Representação de Deslocamento, Velocidade e Aceleração

Figura 28 - Representação do Fator de Crista

Figura 29 - Probe, Proximitore e Cabo de Extensão

Figura 30 - Representação do Sinal do Sensor de Vibração Relativa

Figura 31 - *Pick-up* de Velocidade

Figura 32 - Representação do Sinal do Sensor de Vibração Absoluta

Figura 33 - Espectro de Vibrações Mostrando as Frequências Correlacionadas com Cada Parte da Máquina

Figura 34 - Espectro Mostrando Diversas Faixas de Frequência e Defeitos Contidos em Cada Faixa

Figura 35 - Pontos de medição de vibração na carcaça da caixa de mancal

Figura 36 - Fixação do *pick-up* com base magnética

Figura 37 - Exemplos de Mapa Espectral

Figura 38 - Espectro Mostrando Caso de Desbalanceamento em um Rotor de um Exaustor

Figura 39 - Esquema de Desalinhamento Angular, Mostrando Dois eixos que se Interceptam Formando um Ângulo

Figura 40 - Espectro Mostrando um Caso de Desbalanceamento Angular entre Dois Eixos Acoplados

Figura 41 - Esquema de Desalinhamento Paralelo

Figura 42 - Espectro Mostrando um Caso de Desbalanceamento Paralelo entre Dois Eixos Acoplados

Figura 43 - Excentricidade de Polias

Figura 44 - Engrenagem e Rotor de Motor Elétrico Excêntricos

Figura 45 - Espectro Mostrando um Caso de Ressonância Estrutural, que se torna evidente devido ocorrer alta vibração apenas na radial

Figura 46 - Espectro Característico de Folga Mecânica no Mancal do Equipamento, evidenciando os vários picos harmônicos

Figura 47 - Desenho Esquemático de uma Base com Parafusos Folgados gerando Folga – Tipo B

Figura 48 - Partes Constituintes de Rolamentos

Figura 49 - Dimensões Comuns em Rolamentos

Figura 50 - Espectros de Vibração de um Mancal de Rolamento com Falha – 4º estágio de falha

Figura 51 - Espectro Característico de Falha de Rolamento, evidenciando os picos harmônicos da frequência

Figura 52 - Espectro Característico de Falha de Engrenamento

Figura 53 - Espectro de uma Engrenagem com Desalinhamento ou Desgaste Parcial

Figura 54 - Modulação em AM – Engrenagem Excêntrica

Figura 55 - Espectro Típico de um Redutor com a Engrenagem com Dentes Desgastados (Modulação em FM)

Figura 56 - Tabela de Diagnósticos para Engrenagens

Figura 57 - Vibração Típica de uma Bomba Cavitando

Figura 58 - Vibração de uma Bomba Centrífuga Cavitando

Figura 59 - Espectro Característico de Falha devido Fluxo Hidrodinâmico

Figura 60 - Espectro Típico do Roçamento

Figura 61 - Vibrações da Correia em Ressonância

Figura 62 - Vibrações em Correias Induzidas por Desgaste

Figura 63 - Esquema de Formação do Campo

Figura 64 - Principais Componentes de um Motor Elétrico

Figura 65 - Rotor de Motor em Máquina Estacionária de Balanceamento

Figura 66 - Posicionamento do Acelerômetro na Tampa Dianteira do Motor

Figura 67 - Ilustração da Espira

Figura 68 - Fluxo Magnético B

Figura 69 - Estator em Boas Condições

Figura 70 - Principais Fontes de Vibração em Motores Elétricos

Figura 71 - Espectro de Vibração de Motor CC com Defeito no Cartão de Disparo

Figura 72 - Conversão de Corrente AC para DC

Figura 73 - Circuito Básico de um Sistema Fonte de Alimentação DC CPM 6 SCRS

Figura 74 - Foto de um Cartão de Disparo com 6 SCRs

Figura 75 - Espectro Mostrando Bandas Laterais Relacionadas com o Cartão Comparador

Figura 76 - Motor de Corrente Contínua com o Tacômetro em sua Extremidade

Figura 77 - Foto Mostrando Rotor e Suporte de Escovas do Motor de Corrente Contínua

Figura 78 - Região de Ressonância dos Rolamentos

Figura 79 - Carta de Severidade Proposta pela ISO 2372, VD12056 e B54675

Figura 80 - Gráfico de Severidade de Vibrações

Figura 81 - Sistema Básico para Análise Espectral da Corrente

Figura 82 - Fluxograma da Análise

Figura 83 - Integração de um Sistema de Diagnóstico Automático

Figura 84 - FFT do *Ripple* de um Sinal de Corrente para Motor DC

Figura 85 - Forma de Onda de Corrente sem Falha Provocada

- Figura 86** - Forma de Onda de Corrente na Presença da Falha
- Figura 87** - Espectro de Corrente sem a Falha Provocada
- Figura 88** - Espectro de Corrente na Presença da Falha
- Figura 89** - Bobina de Fluxo Fixada Axialmente e Medição em Campo com a Bobina CSI
- Figura 90** - Rotor com as Setes Barras Rompidas
- Figura 91** - Exemplo da Mudança Detectada na Densidade de Fluxo Magnético
- Figura 92** - Espectro de Corrente sem Defeito
- Figura 93** - Espectro de Corrente com 7 Barras Quebradas
- Figura 94** - Espectro de Fluxo sem Defeito
- Figura 95** - Espectro de Fluxo com 7 Barras Quebradas
- Figura 96** - Espectro de Fluxo Magnético para a Condição Normal de Funcionamento
- Figura 97** - Fase Danificada por Desbalanceamento de Tensão da Rede
- Figura 98** - Espectro de Fluxo Magnético para o Desbalanceamento de Tensão (210 V)
- Bobina CSI
- Figura 99** - Espectro de Fluxo Magnético para o Desbalanceamento de Tensão (200 V)
- Bobina CSI
- Figura 100** - Queima por Sobrecarga, Subtensão ou Sobretensões
- Figura 101** - Espectro de Fluxo Magnético para Subtensão (200 V)
- Figura 102** - Espectro de Fluxo Magnético para Subtensão (190 V)
- Figura 103** - Espectro de Fluxo Magnético para Sobretensão (230 V)
- Figura 104** - Espectro de Fluxo Magnético para Sobretensão (240 V)
- Figura 105** - Espectro de Fluxo Magnético para a Condição Normal de Funcionamento
- Figura 106** - Espectro de Fluxo Magnético para Desbalanceamento de Tensão (210 V)
- Figura 107** - Espectro de Fluxo Magnético para Desbalanceamento de Tensão (200 V)
- Figura 108** - Espectro de Fluxo Magnético para Subtensão (200 V)
- Figura 109** - Espectro de Fluxo Magnético para Subtensão (190 V)
- Figura 110** - Espectro de Fluxo Magnético para Sobretensão (230 V)
- Figura 111** - Espectro de Fluxo Magnético para Sobretensão (240 V)
- Figura 112** - Exemplos de Imagens Termográficas de Instalações Elétricas
- Figura 113** - Exemplos de Imagens Termográficas de Equipamentos Estáticos
- Figura 114** - Exemplo de Imagens Termográficas em Revestimentos Estruturais
- Figura 115** - Exemplo de Imagens Termográficas em Processos
- Figura 116** - Exemplo de Imagem Termográfica em Máquinas Elétricas

Figura 117 - Exemplo de Imagens Termográficas Conjuntos Rotativos

Figura 118 - Árvore de Falhas de Sobreaquecimento de Motores

Figura 119 - Termograma Demonstrando Aquecimento Elevado no Mancal Dianteiro do Motor, Resultando em Sobrecarga e Posterior Travamento do Rolamento.

Figura 120 - Ferrógrafo Analítico

Figura 121 - Ferrograma

Figura 122 - Exemplo de Partículas Encontradas em uma Amostra

Figura 123 - Microfotos de Ferrogramas

Figura 124 - Ferrógrafo Quantitativo

Figura 125 - Gráfico de Tendência da Concentração Total de Partículas (L + S)

Figura 126 - Gráfico de Tendência de Modo de Desgaste - PLP

Figura 127 - Desgaste Normal Após Aquecimento a 330 °C

Figura 128 - Desgaste de Amaciamento

Figura 129 - Abrasão a Dois Corpos

Figura 130 - Abrasão a Três Corpos

Figura 131 - Partículas Esféricas com Média de 2 Microns; de Fadiga por Rolamento - Superfícies Lisas e Bordas; e Laminares Finas e Largas - Superfície Lisa

Figura 132 - Entrada do Ferrograma de um Óleo Sintético

Figura 133 - Partícula Contaminante no Ferrograma

Figura 134 - Fibras de Celulose e de Poliéster

Figura 135 - Microscópio Bicromático

Figura 136 - Aço de Baixa Liga Antes e Depois do Aquecimento

Figura 137 - Aço de Média Liga Antes e Depois do Aquecimento

Figura 138 - Medição de Espessura com o Ultrassom

Figura 139 - Aparelho de Ultrassom Portátil e Detalhe de Trinca em Peça Metálica

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Técnicas de Manutenção Preditiva

Tabela 2 - Principais Defeitos de Motores de Corrente Contínua

Tabela 3 - Limites de Vibração Baseado na ISO 2372

Tabela 4 - Problemas X Causas

Tabela 5 - Severidade e Recomendações

Tabela 6 - Diagnósticos de Falhas Elétricas

Tabela 7 - Faixas de severidade de vibração (10 a 1000 Hz)

Tabela 8 - Análise de Fluxo: Severidade e Recomendações

Tabela 9 - Amplitudes em Baixa Frequência

Tabela 10 - Análise das Amplitudes em alta frequência - Bobina CSI

Tabela 11 - Valores de Emissividade de Componentes

Tabela 12 - Fator de Correção da Velocidade do Vento (FCV)

Tabela 13 - Avaliação da Velocidade do Vento

Tabela 14 - Critério Tradicional e MIL-STB-2194 (SH), respectivamente

Tabela 15 - Exemplos de Valores de MTA

Tabela 16 - Critério Flexível para Componentes Aquecidos

Tabela 17 - Distinção entre Partículas de Metal Livre

Tabela 18 - Aplicabilidade de Técnicas de Monitoramento Regular

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- Ac** - Aquecimento Corrigido
- API** - Interface de Programação e Aplicativos
- BD** - Diâmetro do Elemento Rolante
- BPFI** - Frequência da Pista Interna do Rolamento
- BPFO** - Frequência da Pista Externa do Rolamento
- BSF** - Frequência do Elemento Rolante
- CFCA** - Critério Flexível de Classificação de Aquecimentos Elétricos
- CONF** - Confiabilidade
- CPM** - Ciclos por Minuto
- CSI** - Computational Systems Incorporated
- DISP** - Disponibilidade
- DLI** - Data Limite de Intervenção
- DR** - Direct Reading
- ESA** - Electrical Signature Analysis
- FCC** - Fatores de Correções de Carga
- FCV** - Fatores de Correções de Vento
- FDT** - Ponto Inicial de Detecção da Falha
- f.e.m.** - Força Eletromotriz
- FFT** - Transformada Rápida de Fourier
- F.M.M** - Força Magneto Motriz
- fp** - Fator de Potência
- fr** - Frequência de rotação do motor
- FTF** - Frequência da gaiola
- IAD** - Índice de Absorção Dielétrica
- IEC** - *International Electrical Commission*
- INDI** - Indisponibilidade
- IP** - Índice de Polarização
- ISO** - International Organization for Standardization
- KOH** - hidróxido de potássio
- LMTA** - Limite Máximo de Temperatura Admissível
- MAA** - Máximo Aquecimento Admissível
- MCA** - Motor Circuit Analysis

- Mca** - Motor de Corrente Alternada
- MCC** - Manutenção Centrada em Confiabilidade
- Mcc** - Motor de Corrente Contínua
- MCSA** - Motor Current Signature Analysis
- MIT** - Motor de Indução Trifásico
- MPF** - Modos Potenciais de Falhas
- MTA** - Máxima Temperatura Admissível para o componente
- PD** - Diâmetro Primitivo do Rolamento
- PLC** - Power Line Communications
- PPB** - Partes por Bilhão
- PPM** - partes por milhão
- RDP** - Relatório Diagnóstico e Prognóstico
- RMS** - Root Mean Square
- SCRs** - Retificadores Controlados de Silício
- SDCD** - Sistema Digital de Controle Distribuído
- Ta** - Temperatura Ambiente
- TAN** - Total acid number
- TBN** - Total basic number
- THDF** - Total Harmonic Derating Factor
- TMEF** - Tempo Médio entre Falhas
- TMPR** - Tempo Médio para Reparo
- TR** - Transmissor e Receptor
- TXFO** - Taxas de Falhas Observadas
- VDF** - Voltage Derating Factor

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO.....	2
1.2 OBJETIVO DO TRABALHO.....	2
1.3 LIMITAÇÕES	3
1.4 DESCRIÇÃO DO TRABALHO	3
2. METODOLOGIA.....	5
2.1. DELINEAMENTO DA PESQUISA.....	5
2.2 DEFINIÇÃO DE PESQUISA	5
2.3 CLASSIFICAÇÃO E TIPOS DE PESQUISAS.....	5
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
3.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE MANUTENÇÃO.....	10
3.1.1 Conceitos e objetivos	11
3.1.2 Definições da manutenção preditiva	13
3.1.3 Questões gerenciais na implantação da manutenção preditiva.....	15
3.1.4 Classificação geral das técnicas de monitoramento.....	17
3.1.5 Principais técnicas de manutenção preditiva	20
3.1.6 Monitoramento Preditivo.....	22
3.2 MÁQUINAS ELÉTRICAS	25
3.2.1 Motores de corrente contínua.....	26
3.2.2 Motores de corrente alternada	31
3.2.3 Modos potenciais de falhas de motores elétricos	34
3.3 O PROCESSAMENTO DO SINAL DE CORRENTE.....	35
3.3.1 Harmônicos	35
3.3.2 Análise de Fourier aplicada	36

4 COMENTÁRIOS E ANÁLISE PRÁTICA	38
4.1 INSPEÇÃO SENSITIVA	38
4.1.1 Inspeção visual	39
4.2 ANÁLISE DE ÓLEO LUBRIFICANTES	41
4.2.1 Introdução	41
4.2.2 Principais ensaios para avaliação das condições do lubrificante	42
4.3 ANÁLISE DE VIBRAÇÃO.....	51
4.3.1 Introdução	51
4.3.2 Parâmetros de vibração	54
4.3.3 Sensores de vibração	57
4.3.4 Identificação de frequências	62
4.3.5 Como medir vibração.....	64
4.3.6 Avaliação das vibrações	67
4.3.7 Principais causas de vibração em máquinas	69
4.4 ENSAIOS DIELÉTRICOS	131
4.4.1 Resistência de isolamento.....	131
4.4.2 Índice de absorção dielétrica	134
4.4.3 Índice de polarização.....	135
4.4.4 Fator de potência da isolação	135
4.5 ANÁLISE DE CORRENTE E ANÁLISE DE FLUXO MAGNÉTICO	136
4.5.1 Introdução	136
4.5.2 ESA – análise da assinatura elétrica	137
4.5.3 MCA – análise de circuito de motores	138
4.5.4 MCSA – análise de assinatura de corrente do motor.....	139
4.5.5 Análise de fluxo magnético	151

4.5.6 Técnicas usadas para tipos de falhas	153
4.6 INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA	173
 4.6.1 Introdução à teoria da conexão elétrica	173
 4.6.2 Conceitos	173
 4.6.3 Introdução à termometria.....	176
 4.6.4 Análise e instrumentos termográficos	177
 4.6.5 Termografia na manutenção preditiva.....	180
4.7 FERROGRAFIA	200
 4.7.1 Introdução	200
 4.7.2 Técnica.....	201
 4.7.3 Amostragem	201
 4.7.4 Exames ferrográficos.....	205
 4.7.5 Partículas presentes na amostra.....	212
 4.7.6 Diagnóstico de ferrografia	218
 4.7.7 Quantificando a situação de desgaste	221
 4.7.8 Comparação e associação com outras técnicas	222
 4.7.9 Aplicações da ferrografia.....	224
4.8 ENSAIO POR ULTRASSOM	225
 4.8.1 O que é ultrassom?	226
 4.8.2 Aplicando o ultrassom.....	226
 4.8.3 Técnicas de ensaio.....	227
 4.8.4 Identificando e confirmando problemas	228
 4.8.5 Vantagens e desvantagens do ensaio por ultrassom.....	234
5. CONCLUSÕES ACERCA DOS OBJETIVOS DO TRABALHO	235
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	238

1. INTRODUÇÃO

Nesta época de rápidas mudanças, as organizações devem estar sempre sondando por novos cenários, novos concorrentes, mudanças constantes nos requisitos das suas partes interessadas (*stakeholders*), mudanças nas tendências dos negócios, tecnologias inovadoras, aumento da complexidade dos sistemas, exigências ambientais mais rigorosas, entre outros. Todos estes desafios devem ser enfrentados pela organização como um todo e com todos os recursos que possui, ou seja, ninguém e nenhuma função administrativa e produtiva podem ficar à margem ou indiferente.

O novo ambiente de competitividade, ocasionado pela evolução, crescimento e globalização da economia, impõe que as empresas tenham um compromisso ainda maior e contínuo aperfeiçoamento de seus produtos e processos. Segundo Siqueira [33], o desafio da otimização dos ativos de produção é um processo que envolve a avaliação de funções, tarefas e atividades com o objetivo de conseguir um equilíbrio entre atividades reativas, preventivas e preditivas para garantir a preservação das funções dos ativos. Este processo é conseguido através da identificação dos modos de falha dos equipamentos, assim como, das respectivas consequências de falha.

As tecnologias de diagnóstico (vibrações, análise de lubrificantes, termografia, ferrografia, análise de corrente, análise de fluxo magnético, entre outras) têm um papel importante na identificação dos sintomas que conduzem a defeitos ou falhas, permitindo a previsão futura de uma eventual impossibilidade de um equipamento funcionar com as especificações desejadas. Entretanto, muitas vezes a informação que identifica os sintomas não é sempre disponibilizada nem de fácil compreensão.

Raramente existe um processo estruturado de tomada de decisões para identificação das falhas e especificações das ações corretivas necessárias. A completa compreensão do problema e a avaliação da probabilidade de falha de um componente permitem a realização de um melhor julgamento com relação às ações corretivas a serem tomadas a curto e longo prazos.

O objetivo da otimização da eficiência dos ativos de produção é atingir o mais elevado nível de confiabilidade com o menor investimento em componentes e mão de obra. Neste contexto, a tecnologia da informação tem um papel fundamental: identificar automaticamente

sintomas de defeitos ou falhas, realizar diagnósticos e tomadas de decisão direcionando a ação dos gestores, por meio da utilização de redes de comunicação, sistemas de informação, aplicações intranet e internet, sistemas de automação, sistemas de monitoração e diagnóstico periódico ou contínuo. Também se pode incluir nesta área de tecnologia de informação sistemas de engenharia, gestão da manutenção, planejamento e financeiros.

1.1 MOTIVAÇÃO

O presente trabalho foi elaborado pela necessidade da consolidação do material didático para a disciplina de Manutenção e Operação de Equipamentos Elétricos relativo às técnicas de manutenção preditivas em máquinas rotativas.

Este estudo é fruto das exigências crescentes de padrões aceitáveis de disponibilidade, continuidade, qualidade e segurança na manutenção e também devido à sofisticação dos equipamentos elétricos utilizados nas indústrias – a exigência em termos de confiabilidade tem aumentado consideravelmente.

A fim de reduzir a probabilidade, frequência, duração e os efeitos dos eventos de defeitos ou falhas, é necessário realizar investimentos financeiros no sentido de aumentar a confiabilidade dos sistemas e equipamentos. A integridade dos equipamentos passou a ser uma questão estratégica, visto que atualmente uma indisponibilidade operacional pode representar, em termos de custos, muitas vezes mais do que custaria reparar a própria falha.

Assim sendo, a área de manutenção sofre mais desafios do que qualquer outra área de gerenciamento. A manutenção condicional – em que o equipamento é monitorado durante o seu funcionamento e as paradas são realizadas somente se forem identificados indícios que conduzam a uma possível falha – tornaram-se absolutamente necessárias e é onde as técnicas de manutenção preditiva são essenciais.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo geral deste estudo é propor uma análise metodológica para a concepção de um sistema de manutenção preditiva de máquinas elétricas, com base na análise da bibliografia pertinente e nas boas práticas do mercado, em função das condições (*on condition*) da degradação do material ou da previsão, por acompanhamento estatístico de parâmetros, para dar suporte às atividades de manutenção preventiva.

A manutenção preditiva se propõe, por meio de técnicas de diagnóstico, estabelecer parâmetros confiáveis para a avaliação do estado real dos componentes e, com isso, prever um defeito ou falha, ao invés de apenas presumi-lo.

Desta forma, o trabalho tem como objetivo também a apresentação dos conceitos e metodologias das técnicas preditivas no monitoramento elétrico para diagnosticar possíveis defeitos ou falhas antes das suas ocorrências.

1.3 LIMITAÇÕES

Este estudo não abrange os ensaios gerais de rotina ou tipo aplicáveis às máquinas de corrente alternada ou contínua, conforme a ABNT, bem como os ensaios especiais, isto é, os não classificados como de rotina ou de tipo, principalmente os que solicitam levantamento de curvas características.

Tampouco aborda os ensaios específicos que possam ser exigidos em motores de corrente alternada ou contínua destinadas a aplicações especiais, tais como máquinas para tração, serviço naval, aeronaves e alternadores de veículos automotores.

Este estudo está limitado a analisar as principais técnicas de manutenção preditiva, práticas normalmente utilizadas pelas indústrias e concessionárias de energia elétrica. Assim sendo, reconhecemos que podem existir outros procedimentos além dos aqui abordados os quais, no entanto, fogem ao objetivo geral do trabalho.

Fogem também ao escopo deste trabalho as abordagens sobre capacitação e qualificação de pessoal, a relação custo x benefício e a análise dos custos envolvidos na adoção destas técnicas.

1.4 DESCRIÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em 05 (cinco) capítulos, estruturados da seguinte forma:

Capítulo 1 – Introdução: apresentação do assunto, descrevendo-se a motivação, o objetivo e as limitações do estudo.

Capítulo 2 – Metodologia: fundamenta e descreve a metodologia utilizada na pesquisa, classificando a pesquisa quanto aos fins e aos meios de investigação e especificando o que foi realizado para a elaboração do estudo.

Capítulo 3 – Revisão bibliográfica: constituído por uma síntese dos conceitos de manutenção preditiva, as fundamentações teóricas sobre máquinas elétricas rotativas e uma descrição sucinta das suas partes constituintes.

Capítulo 4 – Comentários e análise prática: apresenta os principais ensaios de manutenção preditiva elétrica de máquinas rotativas. Procedimentos, análises de resultados, comentários e diagnósticos.

Capítulo 5 – Conclusões: são apresentadas informações relevantes e relacionadas às atuais práticas e técnicas de manutenção preditiva, monitoramento, análise e diagnóstico em máquinas rotativas - vibrações, análise de lubrificantes, termografia, ferrografia, análise de corrente, análise de fluxo magnético, entre outras. Este conhecimento poderá ser usado no dia-a-dia, contribuindo para o aprimoramento da qualidade e produtividade das práticas de manutenção, produção e segurança industrial, criando subsídios e fundamentos para as decisões.

Ao final encontra-se a bibliografia consultada.

2. METODOLOGIA

Neste capítulo serão tratados os aspectos metodológicos utilizados para a elaboração deste trabalho, mostrando as etapas de pesquisa realizadas.

2.1 DELINEAMENTO DA PESQUISA

Este estudo visa apresentar uma ferramenta para contribuir com o aperfeiçoamento do segmento de manutenção, melhorando a disponibilidade e a confiabilidade das instalações industriais. Antes de se realizar qualquer análise relativa às técnicas de manutenção preditiva percebe-se a necessidade de uma introdução ao assunto. Desta forma, primeiramente, foi realizada uma revisão bibliográfica onde foram tratados os seguintes assuntos:

- Manutenção em Máquinas Rotativas
- Estratégias
- Vantagem Competitiva
- Fatores Críticos de Sucesso

2.2 DEFINIÇÃO DE PESQUISA

Antes de continuar, importante é definir o que se entende por pesquisa. De forma geral, os dicionários definem pesquisa como a ação de busca, indagação e investigação minuciosa para averiguação da realidade, com o fim de estabelecer fatos ou princípios relativos a um campo qualquer do conhecimento. Além disso, a definição do verbete pesquisa ainda é dada como levantamento, registro, análise ou coleta dos fatores relacionados com os problemas de prestação de serviços.

A pesquisa pode buscar o conhecimento pelo próprio desejo de investigar determinada área por motivação de ordem intelectual ou ainda a aspiração de descobrir uma aplicação prática para a solução de um problema.

2.3 CLASSIFICAÇÃO E TIPOS DE PESQUISAS

Existem diversas sistemáticas dos tipos de pesquisa e muitas são as formas de classificar as pesquisas. Dentre estas, destacam-se algumas clássicas, focando somente os pontos relacionados com o objetivo de posicionamento metodológico deste estudo.

Quanto à natureza, as pesquisas podem ser classificadas em básicas e aplicadas; quanto à forma de abordagem, em quantitativa e qualitativa; quanto aos seus objetivos, em exploratória, descritiva e explicativa e quanto aos procedimentos técnicos, em bibliográfica, documental, experimental, levantamento, estudo de caso, *ex post facto*, pesquisa ação e participante. Silva e Menezes [32] explicam que a pesquisa objetiva é aquela que gera conhecimentos novos, úteis para o avanço da ciência sem aplicação prática prevista. Envolve verdades e interesses universais; e a aplicada é a que tem como objetivo gerar conhecimentos dirigidos à aplicação prática e solução de problemas específicos, envolvendo verdades e interesses locais.

Conforme Gil [15], do ponto de vista dos seus objetivos a pesquisa pode ser:

- **Exploratória:** visa proporcionar maior familiaridade com o problema com vistas a torná-lo explícito. Envolve levantamento bibliográfico. Assume, em geral, as formas de Pesquisas Bibliográficas e Estudos de Caso.
- **Descritiva:** visa descrever as características de determinada população ou fenômeno. Assume, em geral, a forma de Levantamento.
- **Explicativa:** visa identificar os fatores que determinam ou contribuem para a ocorrência dos fenômenos. Aprofunda o conhecimento da realidade porque explica a razão, “o porquê” das coisas. Quando realizada nas ciências sociais requer o uso do método observacional. Assume, em geral, as formas de pesquisa Experimental e *Ex Post Facto*.

Silva e Menezes [32] afirmam que, do ponto de vista da forma de abordagem dos problemas, a pesquisa pode ser:

- **Quantitativa:** significa traduzir, em números, opiniões e informações para classificá-las e analisá-las. Requer o uso de recursos e de técnicas estatísticas.
- **Qualitativa:** há uma relação dinâmica entre o mundo real e o sujeito não traduzido em números, o ambiente natural é a fonte direta para coleta de dados e o pesquisador é o instrumento-chave. A interpretação dos fenômenos e a atribuição de significados são básicas no processo de pesquisa qualitativa. É descritiva e não requer métodos e técnicas estatísticas.

Do ponto de vista dos procedimentos teóricos [14], pode ser:

- **Bibliográfica:** quando elaborada a partir de material já publicado, constituído principalmente de livros, artigos de periódicos e atualmente com material disponibilizado na internet.
- **Documental:** quando elaborada a partir de materiais que não receberam tratamento analítico.
- **Experimental:** quando se determina um objeto de estudo, selecionam-se as variáveis de influência, definem-se as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto.
- **Levantamento:** quando a pesquisa envolve a interrogação direta das pessoas cujo comportamento se deseja conhecer.
- **Estudo de Caso:** quando envolve o estudo profundo e exaustivo de um ou poucos objetos de maneira que se permita o seu amplo e detalhado conhecimento.
- ***Ex Post Facto:*** quando o experimento se realiza depois dos fatos.
- **Ação:** realizada em estreita associação com a resolução de um problema coletivo. Os pesquisadores e participantes representativos da situação ou de problemas estão envolvidos de modo cooperativo ou participativo.
- **Participante:** quando se desenvolve a partir da interação entre pesquisadores e membros das situações investigadas.

Por sua vez, Vergara [41], apresenta dois critérios básicos para definir e classificar as pesquisas: quanto aos fins e quanto aos meios. Segundo a autora, sob esses aspectos os diversos tipos de pesquisa não são mutuamente excludentes, podendo ser, ao mesmo tempo, de tipos e finalidades diversas.

Quanto à sua finalidade, uma pesquisa pode ser:

- **Exploratória:** aquela que possui uma natureza de sondagem em uma área com pouco conhecimento acumulado.
- **Descritiva:** a pesquisa que expõe características de determinada população ou fenômeno, não possuindo compromisso de explicar os fenômenos que descreve.
- **Explicativa:** tem como objetivo principal tornar um fato ou fenômeno comprehensível, justificando os motivos e esclarecendo quais fatores contribuem para a sua ocorrência.

- **Metodológica:** é aquele que se refere aos instrumentos de captação ou de manipulação da realidade e está, portanto, associada a caminhos, formas e maneiras para se atingir um determinado fim.
- **Aplicada:** a que é motivada pela necessidade de resolver problemas concretos e existentes no ambiente da pesquisa. A pesquisa aplicada tem, portanto, finalidades práticas, diferentes da pesquisa pura, a qual é basicamente motivada pela curiosidade e desejo de pesquisar.
- **Intervencionista:** tem como principal objetivo interpor e interferir na realidade estudada, de forma a modificá-la.

No caso do presente estudo, e com base na taxionomia apresentada por Vergara [41] e Gil [15], quanto à sua finalidade esta pesquisa é classificada como **exploratória e aplicada**.

A pesquisa é **exploratória**, tendo em vista que não tem objetivo de verificar consistências teóricas, mas sim investigar o assunto, explorado pelas organizações.

Por outro lado, a pesquisa também é **aplicada**, pois tem a finalidade de ajudar a resolver problemas no ambiente da manutenção industrial, propondo um sistema de manutenção *on condition* para dar suporte às atividades de manutenção preventiva.

Quanto aos meios de investigação, a pesquisa pode ser:

- **de Campo:** pesquisa de investigação empírica, realizada no local onde ocorreu um fenômeno ou que dispõe de elementos para explicá-lo.
- **de Laboratório:** é aquela realizada em local circunscrito, normalmente envolvendo simulações.
- **Documental:** aquela na qual a investigação é realizada com base no conteúdo dos documentos.
- **Bibliográfica:** é o estudo sistematizado desenvolvido mais fortemente com base a matérias publicadas por outros pesquisadores.
- **Experimental:** investigação empírica na qual o pesquisador manipula e controla as variáveis independentes e observa as mudanças nas variáveis dependentes.
- ***Ex Post Facto:*** pesquisa referente a um fato já ocorrido, o qual o pesquisador não pode controlar ou manipular as variáveis.

- **Participante:** pesquisa que não se esgota na figura do pesquisador e da qual tomam parte pessoas implicadas no problema.
- **Pesquisa-ação:** é um tipo específico de pesquisa participante que supõe intervenção participativa na realidade social.
- **Estudo de caso:** é o circunscrito a uma ou poucas unidades, com caráter de profundidade e detalhamento.

Quanto aos meios de investigação, classifica-se esta pesquisa como **bibliográfica**.

Conforme Vergara [41], a pesquisa bibliográfica é desenvolvida com base em material acessível ao público em geral, isto é, publicado em livros, revistas, relatórios técnicos e mídia eletrônica.

Resumindo, pode-se afirmar que este estudo foi desenvolvido por meio de pesquisa **exploratória e aplicado**, com metodologia investigativa de caráter **bibliográfico**, com estudo de procedimentos técnicos da literatura pertinente.

Este capítulo abordou os aspectos metodológicos utilizados no trabalho, classificando a pesquisa quanto aos objetivos, fins e aos meios de investigação.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a revisão da literatura que serve como fundamentação teórica para sustentar o estudo. Foi estruturado com base nos aspectos abordados na pesquisa e nas práticas recomendadas pela bibliografia para as técnicas preditivas de manutenção de máquinas elétricas rotativas, pesquisadas de acordo com o desenvolvimento do estudo.

3.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE MANUTENÇÃO

A manutenção está sempre tomando novos rumos e caminhando cada vez mais próxima da operação. Mudanças profundas têm-se apresentado na última década nos mercados. Eles estão sendo marcados por conceitos como: globalização, redução de custos e melhoria da qualidade de serviços. Hoje sua gestão é integrada com as estratégias e objetivos estratégicos da empresa, tendo a produção como foco principal.

No mercado elétrico, no nível nacional, temos assistido à desregulamentação do setor, a concessão de serviços, a geração como atividade de risco comercial, competição de preços e a constituição de entidades reguladoras com capacidade técnica e legal para o controle da atividade.

Logicamente estas trocas estão motivando o mercado para a competição, redução de preços, com qualidade e continuidade. O impacto desse novo ambiente atingiu todos os setores das empresas, incluindo a atividade de manutenção.

Quando se fala de manutenção, muitas vezes o entendimento não é inteiramente adequado, pois esta atividade adquiriu uma grande importância no cenário industrial, e para tal, foram providenciadas implementações significativas a essas atividades. Nesse nosso cenário, a manutenção passa a ser uma atividade estratégica que possibilita a plena confiabilidade do funcionamento de determinado processo industrial.

A mudança de mentalidade de manutenção voltada para a corretiva ou para a preventiva, incorporando técnicas de manutenção preditiva, vem ganhando força nos sistemas modernos de manutenção no Brasil. Hoje já é visível o crescimento do interesse de empresas e profissionais ligados aos serviços de manutenção, em busca da utilização das técnicas de manutenção preditiva tais como termografia, análise de vibração, dentre outras que veremos mais adiante.

Atualmente a técnica de manutenção deve ser necessariamente desenvolvida sob a estratégia de redução dos tempos de intervenção nos equipamentos, buscando obter o menor tempo de indisponibilidade para o serviço.

3.1.1 Conceitos e objetivos

Segundo Nemésio Sousa [22], a classificação clássica da manutenção contempla dois níveis gerais:

- **Manutenção Preventiva:** Intervir no equipamento antes que ele pare de operar, de uma forma programada, baseada na experiência, estatísticas ou outro tipo de avaliação, analisando a conveniência ou não de retirar o equipamento de operação.
- **Manutenção Corretiva:** Deixar operar até surgir uma falha que interrompa a operação do equipamento, ou ocorrer um defeito que provoque a perda, parcial ou total, da sua função operacional e que justifique uma intervenção.

Baseado nestes conceitos e considerados os aspectos de segurança, confiabilidade, desempenho e disponibilidade, conclui-se que o ideal é que a manutenção intervenha na máquina apenas quando e onde se fizer necessário.

A manutenção preventiva se preocupa, portanto em parar no momento necessário e oportunamente, tanto para o equipamento como para o processo produtivo. Essa análise necessita de levantamento de parâmetros técnicos, estatísticos e operacionais, para embasar a decisão da intervenção.

De acordo com Nemésio Sousa [22], e admitindo-se apenas estes dois tipos de manutenção todas as outras atividades que não sejam de caráter corretivo, seria acompanhamento e/ou determinação de parâmetros para realizar intervenção preventiva antes do aparecimento de defeitos e/ou a instalação de falhas - ver figura 1.

Manutenção					
Preventiva					Corretiva
Rotina	Inspeção	Sistemática	Preditiva	Seletiva	
Efetuada com o equipamento em operação.	Acompanhamento do estado do equipamento usando sentidos humanos.	Baseada na duração do funcionamento. Tempo Calendário	Efetuada em função do estado do material.	Efetuada após término da Vida Útil.	Efetuada após Defeito e/ou Falha do equipamento ou componente.
			Estatístico Acompanhamento		Programável Não Programável
<i>Equipamento Energizado ou Desligado</i>					

Figura 1 – Tipos de Manutenção [22]

O objetivo da manutenção preditiva não é eliminar os níveis de manutenção preventiva ou corretiva, mas minimizá-los de forma prática, técnica e objetiva, por meio do acompanhamento e/ou monitorização de parâmetros, com uso de instrumentação adequada.

3.1.1.1 Objetivos da manutenção preditiva

Os principais objetivos da manutenção preditiva são: parar o equipamento no momento certo, minimizar as intervenções, aumentar a disponibilidade, reduzir custos e determinar parâmetros preventivos.

Tendo em vista os aspectos mencionados podemos tecer alguns comentários sobre a manutenção preditiva e refletir a cerca de suas vantagens e aplicações.

O alto investimento inicial pode levar a conclusão de que introduzir a manutenção preditiva é dispendioso e, portanto não oferece compensação, optando-se por deixar a situação como está aplicando-se os recursos apenas em máquinas e equipamentos. Os estudos mais detalhados mostram, contudo, que a manutenção preditiva apresenta resultados tão bons que hoje é considerada como atividade produtiva e a principal técnica para levantamentos de parâmetros para ação de manutenção preventiva nos equipamentos.

3.1.1.2 Vantagens da manutenção preditiva

Conforme a bibliografia pesquisada, dentre as vantagens oferecidas pela manutenção preditiva, podemos citar:

- Intervenções corretivas programadas que custam menos e evitam perdas de produção.
- Diminuição de problemas porque as máquinas e equipamentos são mantidos dentro de suas conformidades e parâmetros recomendados.
- Aperfeiçoa a manutenção, de forma a diminuir – em alguns casos até eliminar, a necessidade de equipamentos reservas e estoque de peças sobressalentes.
- Oferece dados seguros sobre a frequência e modo de falhas e modo das falhas e dos componentes envolvidos, dando margem para um melhor dimensionamento do almoxarifado e da política de materiais e sobressalentes.
- Incentiva e fornece dados para a procura de fornecedores de peças e componentes de melhor qualidade.
- A operação tem conhecimento periódico da situação das máquinas e equipamentos, passando a se envolver e participar da manutenção, reduzindo “as surpresas” e as consequências de reparos urgentes com baixa qualidade.
- De maneira geral, a introdução da manutenção preditiva tem proporcionado uma redução de 15% a 20% do custo, quando comparada com a manutenção clássica.
- Um dos objetivos da manutenção preditiva é detectar defeitos intermediários e orientar a tomada de decisão e as ações, antes que o processo degenerativo conduza o equipamento a um defeito ‘paralizador’, isto é, a falha.

3.1.2 Definições de manutenção preditiva

O termo associado à manutenção preditiva é ‘predizer’. Esse é o principal objetivo da manutenção preditiva: predizer - ou prevenir, as falhas nos equipamentos por meio do acompanhamento de diversos parâmetros, permitindo a operação contínua pelo maior tempo possível. Ou seja, a manutenção preditiva privilegia a disponibilidade à medida que, em princípio, não deve promover intervenções nos equipamentos em operação.

A manutenção preditiva consiste na técnica de monitoramento da tendência e modo de falha de um equipamento, ou seu componente, pelo acompanhamento de parâmetros indicativos de sua condição. Portanto, alguns indicadores importantes tais como: temperatura, pressão, vibração, vazão, ruídos, vazamentos, desgastes e corrosão servem como subsídios à antecipação das falhas em equipamentos.

Segundo Mirshawka [20], podemos definir manutenção preditiva segundo dois conceitos ou ‘filosofias’:

- **Manutenção Condisional** (filosofia européia) - Manutenção preventiva subordinada a um acontecimento pré-determinado revelador do estado de degradação do material.
- **Manutenção Preditiva ou Previsiva** (filosofia americana) - Tipo especial de manutenção condicional que permite reajustar as previsões de manutenção por meio da análise da tendência evolutiva do funcionamento não adequado detectado no equipamento e da estimativa do tempo possível de continuar a utilizá-lo antes da falha. Esta estimativa ocorre a partir da análise periódica do estado do equipamento pelos métodos e técnicas preditivas. Portanto a manutenção preditiva é efetuada em função do estado do material.

Baroni [5], por sua vez, define manutenção preditiva como “*qualquer atividade de monitoramento que seja capaz de fornecer dados suficientes para uma análise de tendências, emissão de diagnóstico e a tomada de decisão*”.

A idéia básica é, independentemente da técnica empregada, utilizar-se de critérios científicos para coletar, registrar e estudar os dados, com o objetivo de se obter uma decisão gerencial. É imprescindível eliminar o ‘eu acho que’.

Logo, segundo Nemésio Sousa [22], pode-se afirmar que a manutenção preditiva consiste basicamente, em:

- Escolha dos equipamentos a serem monitorados
- Determinação dos parâmetros e quadro de variação
- Escolha da metodologia e instrumentação adequadas
- Utilização de sistemas avançados de planejamento, programação e controle da manutenção
- Coleta de dados para observação e detecção do defeito em desenvolvimento com:
 - ✓ Equipamento em funcionamento
 - ✓ Mínima interferência no processo produtivo
- Coleta dos dados que possibilitem
 - ✓ Diagnóstico
 - ✓ Análise da tendência
- Registros sistemáticos dos parâmetros selecionados

- Análises periódicas das variações destes parâmetros
- Diagnósticos destas variações com a predição da natureza, modo e momento de falha
- Utilização de metodologia e instrumentação de monitorações adequadas para detectar o que muda, isto é, a causa e efeitos dos defeitos intermediários
- Acumular experiência sobre:
 - ✓ Escolha dos equipamentos produtivos que necessitam de manutenção preditiva
 - ✓ Determinação dos parâmetros a serem acompanhados
 - ✓ Controle e análise do quadro de variação desses parâmetros
 - ✓ Diagnóstico do estado do equipamento com base nesta análise
- Desenvolver um sistema de informações rápido e eficiente que forneça dados históricos sobre os equipamentos submetidos ao acompanhamento preditivo tais como:
 - ✓ Banco de dados completos das ocorrências: tipos de defeito ou falha, componentes que falharam e os afetados etc.
 - ✓ Uso de recursos de informática
 - ✓ Programas especialistas de predição e análise de tendências

3.1.3 Questões gerenciais na implantação da manutenção preditiva

Antes de se iniciar a implantação de manutenção preditiva, devemos considerar os seguintes pontos: Qual é nosso custo da manutenção? Qual é nosso índice de disponibilidade? Quais são os nossos equipamentos mais críticos? Que técnicas serão empregadas? Quem executará o programa de manutenção preditiva: pessoal próprio ou contratado? Quem irá gerenciar o processo? Quem vai coletar dados, analisar e emitir os pareceres? Como a equipe será capacitada – preparada?

Admitindo-se que os equipamentos serão monitorados, surgem novas questões: que tipos de informações queremos receber? Alerta sobre máquinas que estão na iminência de uma quebra? Alerta sobre as máquinas com problemas ainda na fase inicial e assim poder evitar que eles progridam e causem danos maiores? Acompanhamento sistemático dos dados ligados às máquinas e dados relativos ao seu desempenho (importantes para o processo)?

A forma como é colocada a questão tem influência direta sobre os custos. Desse modo novos pontos devem ser analisados.

A manutenção preditiva não é absoluta e nem todos os equipamentos requerem o mesmo tratamento. Desse modo a escolha do tipo ou modalidade de manutenção a ser aplicada a este ou aquele equipamento é puramente gerencial.

3.1.3.1 Estabelecimento de níveis-limite de alerta

A utilização de níveis-limite facilita a tomada de decisão. A grande questão é como obtê-los. É bastante comum imaginar-se que máquinas iguais devem ter o mesmo nível de alerta. Teoricamente está correto, entretanto não existem máquinas iguais. Dependendo da sensibilidade do método de monitoramento, vemos que não há, sequer, máquinas semelhantes.

Portanto, o estabelecimento prévio de níveis de alerta deve ser encarado como uma providência de curtíssima duração. Logo que possível, deve-se buscar a referência fornecida pela própria máquina.

De acordo com Baroni [5], este conceito não é novo. Propõem-se aqui um método utilizado há vários anos na lida diária do monitoramento.

Em primeiro lugar, admitimos que todos os fenômenos que cercam as máquinas apresentem uma taxa de incidência e intensidade segundo a curva estatística normal.

Tal curva possui uma área determinada pela média e a variação de 1 (um) desvio-padrão (s), à esquerda e à direita, engloba 68,3% dos fenômenos observados. Mesmo com 2 (dois) desvios-padrão, representa 95,4% dos casos. Utilizando-se três vezes o desvio-padrão, cobrimos 99,7% das ocorrências.

Se aplicarmos estas propriedades às ocorrências de anormalidades das máquinas, podemos ter os seguintes significados físicos:

Média + $2s$ = Alerta, ou primeiro alerta. Probabilidade simples de ser alcançado apenas 4,6 vezes em 100 ocorrências.

Média + $3s$ = Crítico, ou segundo alerta. Ao ser atingido estaríamos frente a um comportamento com a probabilidade de ocorrer apenas 0,3 em 100 eventos.

Portanto, basta seguir as leis das estatísticas, selecionar um mínimo de 7 resultados confiáveis e não incoerentes para o cálculo do que convencionaremos chamar de “nível estatístico de alerta”.

Com o decorrer do monitoramento, à medida que a máquina monitorada vai sendo mais bem conhecida, o nível de alerta deverá ser ajustado.

3.1.3.2 Erros cometidos na manutenção preditiva

Vejamos os erros mais comuns:

- Testar técnicas em equipamentos importantes, mas com baixa taxa de falhas. Corre-se o risco da verba para o estudo acabar e não ter ocorrido algum problema possível de detecção.
- Sobrecarregar a equipe de preditiva antes que ela esteja realmente preparada.
- Escolher a frequência de amostragem financeiramente, desconsiderando-se que para cada tipo de máquina ou aplicação, a velocidade de progressão de defeitos é diferente.
- Escolher técnicas “baratas” sem verificar qual a taxa de erro.
- Esperar que uma técnica seja aplicável para qualquer situação.
- Não auditar as várias fases do processo – incluindo-se aqui o treinamento de conscientização do ‘cliente’ final - a operação.
- Sonegar informações para os analistas – últimas ocorrências e/ou intervenções alterações no processo produtivo etc.
- Medir, medir e não analisar nem diagnosticar.
- Possuir gerentes que não conhecem técnicas preditivas.
- Não acompanhar a evolução das técnicas e dos instrumentos.

3.1.4 Classificação geral das técnicas de monitoramento

3.1.4.1 Introdução

A manutenção preditiva é a primeira grande quebra de paradigma nos tipos de manutenção, e sua prática no Brasil ainda pode evoluir bastante. A manutenção preditiva é estratégica do ponto de vista empresarial.

Como já visto, a manutenção preditiva é aquela que indica a necessidade de intervenção em função do estado de degradação do material - com base no acompanhamento da condição do equipamento por análise estatística de parâmetros. A avaliação do estado do equipamento se dá através de medição, acompanhamento ou monitoramento destes parâmetros. Este acompanhamento pode ser feito de três formas:

- Monitoração subjetiva
- Monitoração objetiva
- Monitoração contínua

3.1.4.2 Monitoração subjetiva

A monitoração subjetiva (também chamada de inspeção) é a atividade exercida pelo pessoal da manutenção de acompanhar o estado do equipamento utilizando os sentidos humanos, ou seja, tato, olfato, audição e visão. Quando um mecânico coloca a palma da mão sobre uma caixa de mancal, pode perceber, por exemplo, a temperatura e a vibração.

Esses procedimentos fazem parte da monitoração da condição do equipamento e serão tanto mais confiáveis quanto mais experientes sejam os profissionais de manutenção.

3.1.4.3 Monitoração objetiva

A monitoração objetiva é o acompanhamento feito por meio de instrumentos específicos. É objetiva, pois fornece um valor de medição do parâmetro que está sendo acompanhado e o valor medido independe do operador do instrumento, desde que sempre se utilize o mesmo procedimento nas ‘mesmas condições’.

Para a utilização de qualquer meio de acompanhamento do estado de equipamentos por meio de instrumentos – monitoração objetiva – é fundamental que: a pessoa que opera os instrumentos seja treinada e habilitada; os instrumentos estejam aferidos e calibrados; e haja pessoal capaz de interpretar os dados coletados e emitir diagnósticos.

3.1.4.4 Monitoração contínua

A monitoração contínua, que é também um acompanhamento objetivo, foi inicialmente adotada em situações onde o tempo de desenvolvimento do defeito era muito curto e em equipamentos de alta responsabilidade. Isso significa uma excelente proteção,

desde que a monitoração contínua venha associada a dispositivos que alarmem e desliguem o equipamento, uma vez atingido o valor limite estipulado.

Com o desenvolvimento da eletrônica e de sistemas digitais, a oferta de sistemas de monitoração teve seu leque de aplicações ampliado, e o preço final tem caído. Isso vem permitindo a utilização de sistemas de monitoração *on-line* e à distância.

É possível monitorar variáveis típicas de processo como densidade, vazão e pressão e variáveis mais relacionadas diretamente com os equipamentos, como vibração, temperatura de mancais, temperatura do isolamento e dos enrolamentos de motores elétricos. Outros aspectos importantes da monitoração contínua:

- Independente de pessoal.
- Pode enviar os dados em tempo real (*on-line*) para as unidades lógicas de processamento ou computadores com programas especialistas.
- Pode ser configurada de acordo com as necessidades, fornecendo redundância onde se exija alta confiabilidade e saídas para acoplamento de instrumentos e processadores visando análises mais profundadas.
- Alguns fenômenos, particularmente na área de equipamentos rotativos, somente podem ser detectados pelo acompanhamento permanente de determinadas variáveis.
- Alguns dados só podem ser levantados em situação de parada ou partida das máquinas, por serem muito rápidos ou por ocorrerem em horários e condições que inviabilizam o levantamento manual de dados.
- A existência de sistemas de monitoração é fator de economia em relação a prêmios de seguros e tempo de parada.

No local mais apropriado para medição é instalado um sensor (ou captor) que pode ser de contato ou não, dependendo do tipo de medição. Esse sensor é ligado a um transdutor que faz a decodificação do sinal para que ele possa ser traduzido em valores no indicador instalado no painel. São comumente empregados os seguintes tipos de instalação:

- No campo - todo sistema, desde os sensores até o painel, é instalado no campo, normalmente ao lado das máquinas ou instalações.
- Painel na casa de controle - quando a indústria utiliza o conceito de casa de controles por unidades operacionais ou conjunto fabril.

- Painel de dados para a casa de controle central - principalmente quando a planta usa sistema centralizado de controle como o SDCD – Sistema Digital de Controle Distribuído.
- Painel na unidade operacional - em uma das três opções acima, e dados em locais remotos (sede de empresa, centro de controle etc.) distantes fisicamente da planta.

Os sinais de condição mecânica, elétrica ou de processo transmitidos pelos sensores são levados até os transmissores, que são capazes de realizar cálculos complexos, detecção de alarme e verificação de erros. Desse modo, entradas de pressão, temperatura, rotação, fase, tensão, corrente elétrica, quando processadas, podem fornecer a potência, carga e eficiência volumétrica; comparar os resultados com dados previamente informados; verificar níveis de alarme e comunicar essas condições para os PLC ou SDCD.

3.1.5 Principais técnicas de manutenção preditiva

Em termos práticos uma técnica de manutenção preditiva, em princípio, deve atender aos seguintes requisitos:

- Permitir a coleta de dados com o equipamento em funcionamento, com o mínimo de interferência possível no processo de produção.
- Permitir a coleta dos dados que possibilitem a análise de tendência.

Poderíamos classificar as técnicas de manutenção preditiva pela grandeza medida – vibração, temperatura, corrente elétrica etc., ou pelo defeito – vazamento, pitting, corrosão, baixa isolação etc. Poderíamos ainda classificá-las pela aplicabilidade – caixas de engrenagens, sistemas hidráulicos, máquinas elétricas etc. Apenas para efeito de estudo, vamos classificar as técnicas mais importantes em famílias de especialização.

Tabela 1 – Técnicas de Manutenção Preditiva [5]

Radiações Ionizantes Raios X e Gamagrafia	Energia Acústica Ultrassom e Emissão acústica
Energia Eletromagnética Partículas magnéticas Correntes parasíticas	Fenômenos de Viscosidade Líquidos penetrantes
Inspeção Visual Endoscopia ou Boroscopia	Análise de Vibrações Nível global, Espectro de vibrações Pulso de choque
Detecção de Vazamentos	
Análise de óleos lubrificantes ou isolantes Viscosidade, Número de neutralização (acidez ou basicidade), Teor de água, Insolúveis, Contagem de partículas Metais por espectrometria por infravermelho Cromatografia gasosa, Tensão interfacial, Rigidez dielétrica, Ponto de fulgor	Análise de Temperatura – Termometria Termometria convencional Indicadores de temperatura Pirometria de radiação Termografia
Ferrografia Ferrografia quantitativa Ferrografia analítica	Verificações de Geometria Metrologia convencional Alinhamento de máquinas rotativas
Ensaios Elétricos Corrente, Tensão, Isolação, Perdas dielétricas, Rigidez dielétrica, Espectro de corrente ou tensão	Forças Células de carga, Teste de pressão Teste hidrostático, Teste de vácuo, Detecção de trincas

Em princípio, podemos classificar qualquer técnica de manutenção preditiva como sendo um ensaio não destrutivo. Afinal nada é destruído na máquina, apenas medimos seus parâmetros - temperatura ou vibração, por exemplo.

Algumas técnicas de END - Ensaios Não Destrutivos, listadas na Tabela 1, só podem ser aplicados com o equipamento fora de operação, o que invalidaria a condição das técnicas preditivas, por definição, serem aplicáveis com o equipamento em funcionamento.

As técnicas da Tabela 1 são capazes de detectar eventuais defeitos ou falhas de funcionamento sem a necessidade de interrupção do processo produtivo e de modo que a intervenção corretiva possa ser programada com antecedência suficiente proporcionando os seguintes benefícios:

- Aumento da segurança e da disponibilidade dos equipamentos, com redução dos riscos de acidentes e interrupções inesperadas da produção.
- Eliminação da troca prematura de componentes com vida útil remanescente ainda significativa.
- Redução dos prazos e custos das intervenções, pelo conhecimento antecipado dos defeitos a serem corrigidos.

- Aumento da vida útil das máquinas e componentes pela melhoria das condições de instalação e operação.

A análise estatística dos dados coletados pela manutenção preditiva permite ainda:

- Identificar equipamentos com problemas crônicos e orientar a sua correção.
- Avaliar a eficácia e a quantidade dos serviços corretivos e propor programas de treinamento e a adoção de novas tecnologias, visando o seu aprimoramento.

3.1.6 Monitoramento preditivo

Por que fazer monitoramento? Quais os objetivos da empresa: produtividade? Redução de custos? Qualidade? Expansão? Como a manutenção irá atender estes objetivos? Quais os indicadores que medirão isto?

Consideramos que o planejamento é a fase mais importante em um projeto de monitoramento de equipamentos. A proposta é usar a técnica de planejamento 5W1H que é uma das mais simples, mas que resolve questões que surgem durante o desenvolvimento dos serviços, evitando-se assim comprometer a credibilidade do sistema no futuro.

3.1.6.1 WHY - Por que se pretende fazer monitoramento?

Em princípio, para não deixar quebrar a máquina sem prévio aviso, mas podem-se encontrar outros motivos, dentre os quais se destacam:

- ⌚ Minimizar a Indisponibilidade - INDI
- ▲ Manter alta a Disponibilidade (DISP) e Confiabilidade (CONF) dos equipamentos e sistemas
- ⚡ Baixar as Taxas de Falhas Observadas - TXFO
- ▲ Aumentar o Tempo Médio Entre Falhas - TMEF
- ⌚ Diminuir o Tempo Médio Para Reparo - TMPr
- \$ Reduzir custos
- ✗ Eliminar as fontes de multas

Para avaliar o alcance dos objetivos de monitorar e acompanhar os resultados, devemos definir um indicador para cada motivo.

3.1.6.2 WHO - Quem monitorar?

Quais os equipamentos que se justificam serem monitorados em consonância com os motivos vistos anteriormente.

3.1.6.3 WHAT - O que monitorar?

Uma vez selecionados os equipamentos e seus motivos de estarem no plano de monitoramento, devemos saber o que estamos procurando neles. Ou melhor, quais os MPF - Modos Potenciais de Falhas, detectáveis em cada equipamento.

3.1.6.4 HOW - Como detectar cada MPF?

Para cada MPF de um determinado equipamento, definimos a técnica mais adequada para monitorá-lo. Neste estudo está prevista a abordagem das seguintes técnicas:

- Análise de vibração
- Análise de óleo lubrificante
- Emissão acústica
- Inspeção termográfica
- Análise de óleo isolante
- Inspeção de motores elétricos

3.1.6.5 WHERE - Onde localizar os pontos de coleta de dados?

Para cada técnica, ou cada medida a ser feita, deve-se definir com clareza o ponto de medição ou retirada de amostras. Deve-se ter especial atenção às condições de segurança, sendo às vezes necessário solicitar instalações de guarda-corpo, janelas de inspeção e/ou outros dispositivos de proteção física.

3.1.6.6 WHEN - Qual a cadência de medições?

Segundo John Moubray [21], explicando um dos primeiros paradigmas da manutenção, a cadência de inspeção não se define pelo tempo que o equipamento não apresentou problemas, mas sim, pelo tempo que o equipamento desenvolveu a falha.

Uma curva comum que ilustra o comportamento do equipamento conforme este se aproxima da falha é a ‘Curva P-F’. A curva demonstra que conforme uma falha começa a se manifestar (falha incipiente ou a instalação de um provável defeito), o equipamento deteriora-

se ao ponto em que ela pode, possivelmente, ser detectada (P). Se o defeito (ou a falha incipiente) não é acompanhado e detectado, continua ocorrendo até que a falha se estabeleça (F).

O intervalo entre P e F é a grande oportunidade, durante uma inspeção, para se detectar a falha iminente e tomar as ações necessárias. Intervalos P-F podem ser medidos em qualquer unidade associada com a exposição ao estresse – tempo de operação/funcionamento (horas ou dias - tempo calendário), ciclos ou número de operações etc. Por exemplo, se o intervalo P-F é de 200 dias e o item vai falhar com 1.000 dias, a aproximação da falha começa a ser detectável em 800 dias. A figura abaixo ilustra a curva P-F.

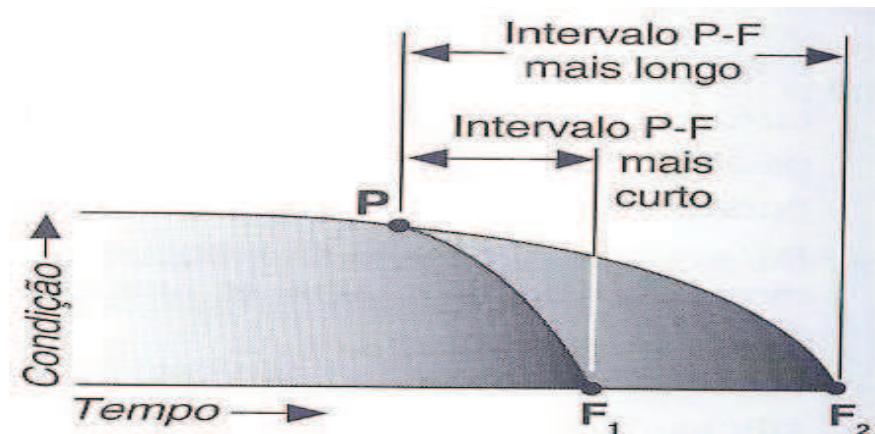


Figura 1 – Curva P-F [31]

Além dos intervalos P-F, a indicação de quando a aproximação de falha vai se tornar detectável durante as inspeções pode ser especificada usando um fator chamado de FDT - Ponto Inicial de Detecção da Falha.

O FDT é um número entre 0 e 1 que indica a porcentagem da vida de um item que deve decorrer antes que um defeito a caminho da falha (falha incipiente) possa ser detectado. Por exemplo, se o FDT é 0,9 e o item vai falhar com 1.000 dias, a falha a caminho torna-se detectável após 90% de sua vida que, traduzindo, decorre a 900 dias.

O intervalo P-F ou o FDT pode ser estimado usando-se o julgamento e a experiência de quem projeta, constrói, opera e/ou mantém o equipamento. Observe que o intervalo P-F ou o FDT deve ser estimado para cada modo de falha.

3.1.6.7 Objetivos e ganhos

Objetivos:

- ⌚ Monitorar as máquinas procurando por mudança de condição.
- 💣 Determinar a natureza e a severidade da condição defeituosa.
- ⌚ Parar o equipamento no momento certo - recomendar a intervenção no melhor momento para a produção e manutenção.
- ▼ Minimizar as intervenções.
- ⌚ Aumentar a Disponibilidade.
- ✓ Determinar parâmetros para intervenções de manutenção preventiva.

Ganhos:

- \$ Redução dos custos - operação, manutenção, consumo de energia elétrica etc.
- ⌚ Redução da *downtime* (*downtime* é a percentagem de tempo em que um sistema permanece inativo por causa de um problema inesperado ou para fins de manutenção, troca de equipamento etc.)
- ↓ Redução das peças estocadas.

3.2 MÁQUINAS ELÉTRICAS

Máquinas elétricas são dispositivos que transformam a energia proveniente de uma fonte primária em energia elétrica. As fontes primárias entregam à máquina energia mecânica ou trabalho, para que a mesma seja transformada em energia elétrica pela máquina.

O estudo acadêmico das máquinas elétricas envolve o estudo tanto dos geradores elétricos quanto dos motores elétricos. Os geradores elétricos convertem energia mecânica em energia elétrica e os motores elétricos, ao contrário, convertem energia elétrica em energia mecânica. Tanto os motores quanto os geradores caracterizam-se pela ocorrência de movimento em seu funcionamento. Tal movimento pode ser rotativo ou linear.

Todas as máquinas modernas estão baseadas na Lei de Indução ou de Faraday e utilizam o fato que um campo magnético variável produz força eletromotriz, ou seja, tensão elétrica.

Podemos classificar as máquinas rotativas nos seguintes tipos: máquinas de corrente contínua e máquinas de corrente alternada – máquinas síncronas e assíncronas.

3.2.1 Motores de corrente contínua

Primeiramente a fim de revisar as fundamentações teóricas que levam ao desenvolvimento das técnicas de análise de motores, faz-se uma descrição sucinta das partes constituintes do mesmo, com foco voltado às suas possíveis falhas e características de manutenção.

3.2.1.1 Partes constituintes e possíveis falhas

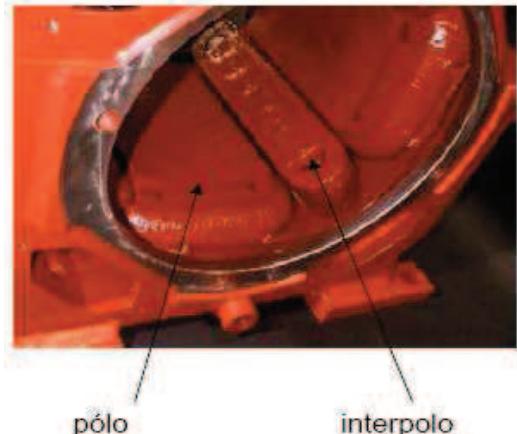
Basicamente o Motor de Corrente Contínua (Mcc) é constituído por:

- **Rotor** – parte girante da máquina, montada sobre o eixo central, construído de um material ferromagnético envolto em um enrolamento chamado enrolamento de armadura, o qual suporta alta corrente, e o anel comutador. Suas partes constituintes são:
 - ✓ **Rotor com enrolamento:** centrado no interior da carcaça, é constituído por um pacote de chapas de aço silício laminadas, com ranhuras axiais na periferia para acomodar o enrolamento da armadura. Este enrolamento está em contato elétrico com lâminas do comutador. Quando esses enrolamentos apresentam curto-circuito ou são interrompidos o motor tende a falhar na sua partida ou sobreaquecer.
 - ✓ **Comutador:** é o conversor mecânico que transfere a energia ao enrolamento do rotor. O comutador é constituído de lâminas de cobre isoladas uma das outras por meio de lâminas de substância isolante (mica). Falhas no comutador, como a sua ovalização, presença de sujeira e montagem mecânica errônea, levam ao fiscamento (centelhamento) das escovas.
 - ✓ **Eixo:** é o elemento que transmite a potência mecânica desenvolvida pelo motor.

A figura 2 mostra as partes principais do motor de corrente contínua.



a) Rotor



b) Estator

Figura 2 - Partes Principais do Motor de Corrente Contínua [46]

- **Estator** – Parte estática da máquina, montada em volta do rotor, de forma que este possa girar internamente. É constituído de material ferromagnético envolto em um enrolamento de baixa potência, chamado de enrolamento de campo, que tem a função de produzir um campo magnético fixo, para interagir com o campo de armadura. O estator é formado por:
 - ✓ **Carcaça:** é a estrutura suporte do conjunto. Tem também a finalidade de conduzir o fluxo magnético.
 - ✓ **Pólos de excitação:** têm a finalidade de gerar o fluxo magnético. São constituídos de condutores enrolados sobre núcleos de chapas de aço laminadas, cujas extremidades possuem um formato que se ajusta a armadura e são chamadas de sapatas polares. Caso o seu circuito esteja interrompido o motor poderá não realizar sua partida, poderá rodar acelerado e/ou oscilar na presença de carga. Um curto-circuito provocará um sobreaquecimento no motor.
 - ✓ **Pólos de comutação (interpolo):** são colocados na região interpolar e são percorridos pela corrente da armadura. Sua finalidade é compensar o efeito da reação da armadura na região de comutação, evitando o deslocamento da linha neutra da carga, reduzindo a possibilidade de faiscamento.
 - ✓ **Enrolamento de compensação:** é um enrolamento distribuído na periferia da sapata polar e percorrido pela corrente da armadura. Sua finalidade é também compensar a reação da armadura, mas agora em toda a periferia do rotor, e não somente na região transversal. Evita o aparecimento de faíscas provocadas por

uma diferença de potencial entre as espiras, devido à distribuição não uniforme da indução no entreferro.

- ✓ **Conjunto porta-escovas e escovas:** o porta-escovas permite alojar as escovas e está montado de tal modo que possa ser girado para o ajuste da zona neutra. As escovas são compostas de material condutor e deslizam sobre o comutador quando este gira, pressionado por uma mola, proporcionando a ligação elétrica entre a armadura e o estator. Caso não estejam na zona neutra, podemos ter dificuldade para partir o motor.

A figura 3 mostra o desenho de um motor de corrente contínua completo:

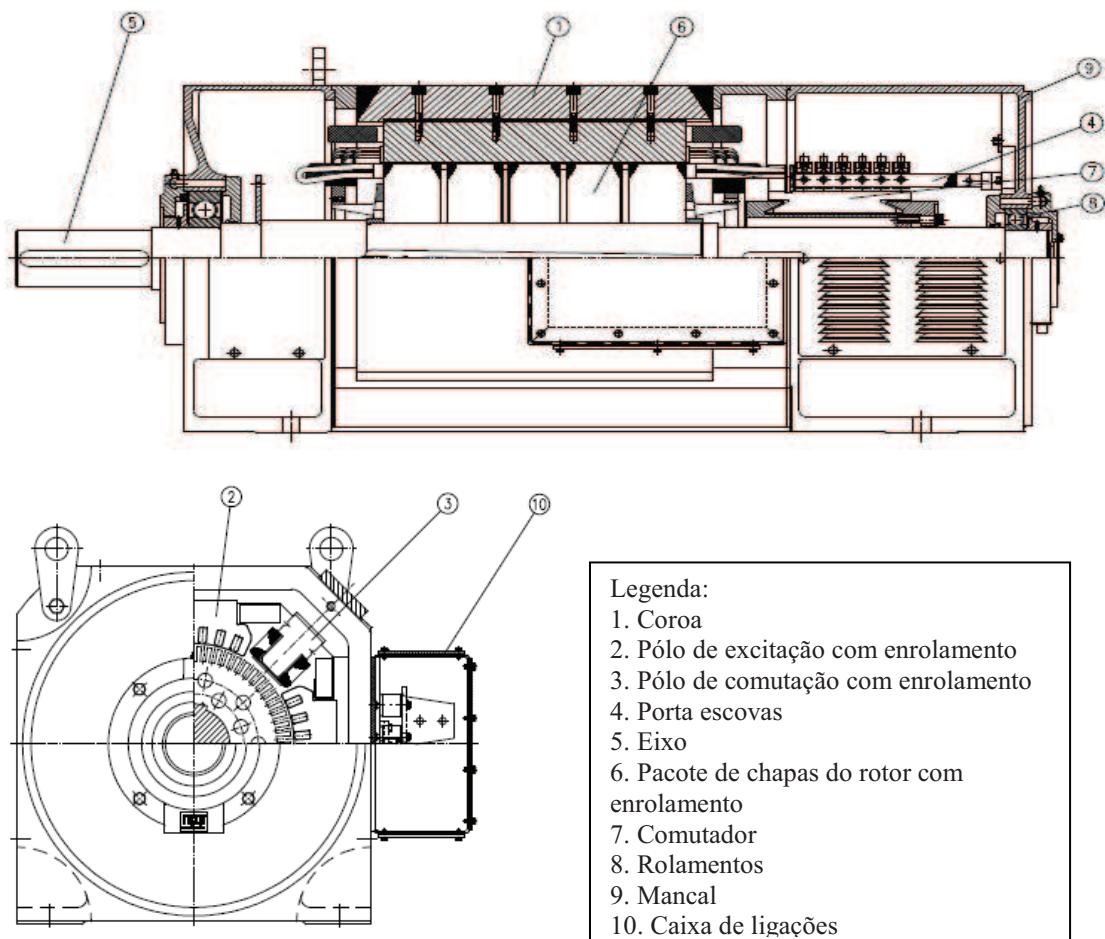


Figura 3 – Partes Constituintes do Motor de Corrente Contínua [45]

A tabela 2 apresenta as avarias mais comuns relativas aos motores de corrente contínua de acordo com a sua parte constituinte.

Tabela 2 – Principais Defeitos de Motores de Corrente Contínua [2]

Parte Constituinte	Falha apresentada	Efeito
Armadura	Círculo interrompido	Não parte em vazio
	Em curto-circuito	Parte com solavancos
		Não desenvolve torque/velocidade na presença de carga
		Sobreaquecimento
Campo	Círculo interrompido	Não parte
		Roda acelerado e oscila quando está sobre carga
	Em curto-circuito	Sobreaquecimento
Comutador	Ovalização	Presença de faiscamento
	Sujeira	
	Presença de estrias	
	Isolação insuficiente	
	Mau-contato entre o terminal e o porta-escovas	
	Escovas desgastadas	
	Posicionamento mecânico inadequado	
Porta-Escovas	Deslocamento da zona neutra	Não parte em vazio
		Não desenvolve torque/velocidade na presença de carga
		Aceleração fora do especificado

Vê-se pela tabela 2 que as principais falhas em máquinas de corrente contínua geram efeitos bastante semelhantes, dificultando a identificação de onde realizar a manutenção corretiva, justificando-se, também por esse fato, o desenvolvimento de técnicas preditivas que possibilitem acompanhar e aprofundar-se na análise de falhas de motores.

3.2.1.2 Pontes retificadoras

A função desses circuitos é a conversão de tensão e corrente de formas senoidais alternadas para energia de forma contínua, como é necessário para a alimentação do motor de corrente contínua. Nessa aplicação faz-se a retificação sobre sinais trifásicos a fim de convertê-los em um sinal de tensão e corrente contínua. Para isso geralmente utiliza-se uma ponte de 6 pulsos, apresentada na figura 4.

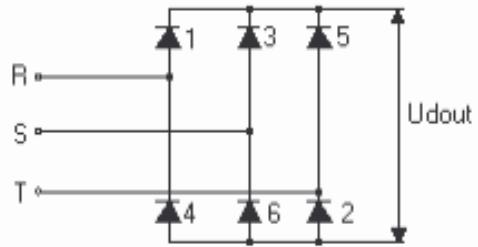


Figura 4 - Ponte de 6 Pulso [12]

Na figura 4 a tensão U_{dout} é a tensão resultante da retificação, aplicada aos terminais do motor de corrente contínua. No entanto, tem-se que a tensão U_{dout} não é perfeitamente lisa em decorrência das características da própria retificação do sinal senoidal, ficando remanescente no mesmo uma componente AC, chamada de *ripple*.

A figura 5 mostra o resultado da retificação da onda, onde o sinal na parte superior do gráfico é o resultado da retificação dada pela ponte.

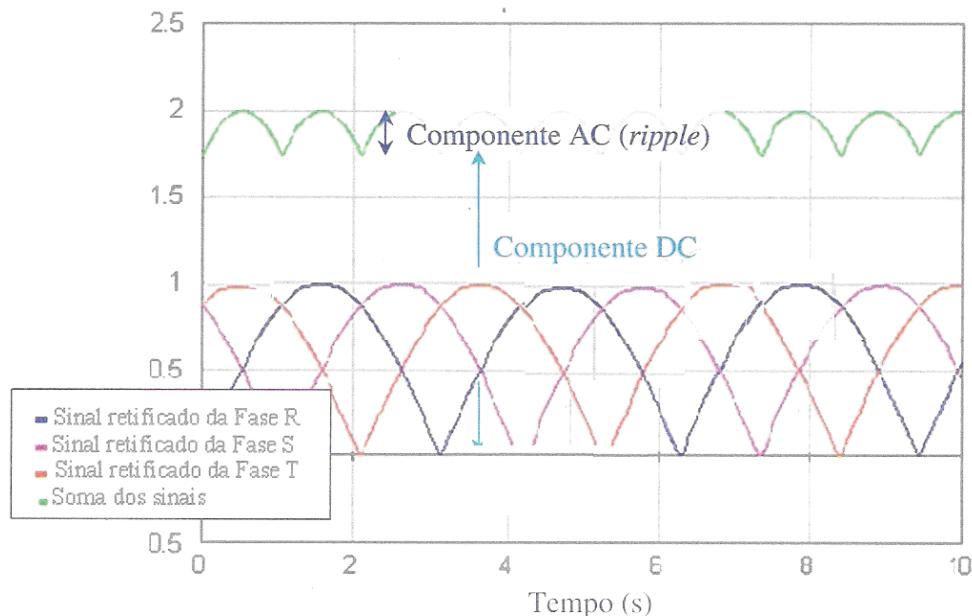


Figura 5 – Aspecto do Resultado da Retificação [12]

Sobre esse sinal é que indicará a análise de Fourier, apresentada no tópico 3.3.2, para que, assim, se possam obter as componentes que caracterizarão a assinatura de falhas utilizada em MCSA - Motor Current Signature Analysis (ver 3.3).

3.2.2 Motores de corrente alternada

Compõem-se de duas partes principais: estator e rotor. São assim denominados em função de sua tensão de alimentação ser alternada e possui ampla utilização na indústria.

Estes motores podem ser divididos em motor síncrono, de indução com anéis e de indução em gaiola. Os motores de indução também são conhecidos por motores assíncronos.



Figura 6 – Exemplo de Aplicação de Motor CA [31]

3.2.2.1 Motores síncronos

São assim denominados porque o rotor gira com a mesma frequência da rede, ou seja, com velocidade fixa. Possuem maior rendimento em baixas rotações se comparado com um motor assíncrono e ampla faixa de velocidades (80 a 3.600 RPM). Sua aplicação só é viável para potências acima de 15.000 CV devido ao seu alto custo para potências mais baixas.

Suas aplicações são: na correção de fator de potência de instalações, serviços que exigem altos torques, como britadores, na mineração, na siderurgia (laminação), bombas, misturadores e processos de alta eficiência.



Figura 7 – Foto de um Motor Síncrono [44]

3.2.2.2 Motores assíncronos ou de indução

São os motores mais utilizados na indústria, onde cerca 90% dos motores são de indução. Suas principais vantagens são: elevada confiabilidade, baixo custo, baixa manutenção, simplicidade construtiva, bom rendimento e apresentam pouca variação de velocidade. Como desvantagens, temos: seu conjugado cai a partir da velocidade nominal, possuem elevada corrente de partida ($I_p/I_n = 5$ a 9) e possuem baixo rendimento fora da condição de plena carga (condição nominal).

Partes integrantes dos motores assíncronos:

- **Estator** - Circuitos magnéticos estático com chapas empilhadas e isoladas entre si.
- **Bobinas** - Enroladas no estator, alimentadas por corrente alternada.
- **Rotor** - Formado de material ferromagnético laminado, no qual há enrolamentos (bobinados) ou um conjunto de barras paralelas ligadas por anéis de curto-círcuito - gaiola de esquilo.
- **Mancais** - Onde se apóia o rotor.
- **Carcaça** - Que dá suporte ao conjunto todo.

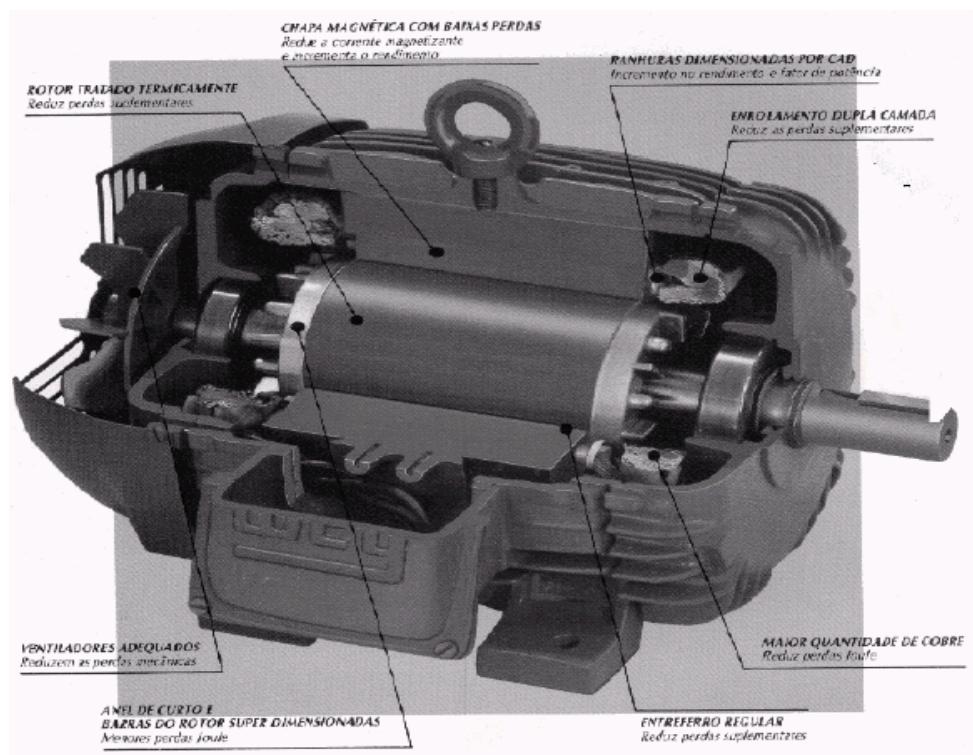


Figura 8 – Corte Longitudinal do Motor Assíncrono [31]

Segue a descrição do princípio de funcionamento dos motores assíncronos. Ao alimentar-se o estator surge, ao mesmo tempo, um campo magnético variável no tempo. Este campo induz uma f.e.m. - força eletromotriz no rotor. A f.e.m. induzida dá origem a uma corrente induzida que tende a opor-se à causa que lhe deu origem, causando assim um torque no rotor, que o coloca em movimento.

A Lei de Faraday diz que, sempre que através da superfície abraçada por um circuito tiver lugar uma variação de fluxo, gera-se, nesse circuito, uma força eletromotriz induzida. Se o circuito é fechado será percorrido por uma corrente induzida.

Por sua vez, a Lei de Lenz afirma que o sentido da corrente induzida é tal que esta, pela sua ação magnética, tende sempre a opor-se à fonte que lhe deu origem.

3.2.2.3 Motores de indução em anéis

Geralmente possuem o rotor com três enrolamentos separados, ligados em conexão estrela: um terminal comum e os outros três ligados a anéis isolados entre si. Escovas transferem os terminais das bobinas para fora do circuito. Estes terminais são ligados a um reostato que tem por função limitar a corrente de partida. À medida que o motor acelera, as resistências são retiradas.

São aplicáveis apenas em casos de elevadas potências, pois necessitam mais manutenção que os outros motores CA devido ao desgaste das escovas e anéis. Exemplos: pontes rolantes, pórticos, guinchos e guindastes, cargas de inércias elevadas, usinas siderúrgicas etc.

Suas principais vantagens são: alto torque, reduzida corrente de partida e podem funcionar em regime intermitente – sucessivas partidas, ou em regime contínuo.



Figura 9 – Exemplo de Motor de Indução em Anéis [44]

3.2.2.4 Motores de indução em gaiolas

É, sem dúvida, o mais usado na indústria em geral por sua robustez e baixo custo. O rotor é formado por núcleo de chapas ferromagnéticas, isoladas entre si e um conjunto de barras não isoladas, ligadas por anéis em curto-círcuito.

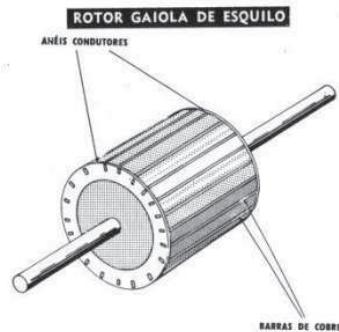


Figura 10 – Rotor Gaiola de Esquilo [31]

Principais vantagens: construção mais simples e rápida, robustez, baixo custo, rápida instalação na rede, velocidade constante.

Os motores elétricos estão expostos a uma ampla variedade de ambientes e condições que os tornam sujeitos a diversos defeitos e/ou falhas incipientes. Tais defeitos, se não forem detectados rapidamente, contribuem para a degradação da isolação e sua eventual falha. O monitoramento, diagnóstico e detecção de falhas incipientes de motores justificam-se pela economia gerada pela sua prevenção antes de ocorrências anormais que retirem o equipamento de operação.

3.2.3 Modos potenciais de falhas de motores elétricos

De origem elétrica, em motores CA, os modos potenciais de falha são: desbalanceamentos entre fases, curto entre fases, baixa isolamento, barras quebradas – rotor/estator, sobrecarga, mau contato das conexões da caixa de ligação e passagem de corrente elétrica pelos mancais.

De origem elétrica, em motores CC, os modos potenciais de falha são: problemas com inversor de frequência, problemas nas escovas, centelhamento das escovas, problemas em anéis, curto entre fases, baixa isolamento, sobrecarga, tiristor aberto, passagem de corrente elétrica pelos mancais e problemas com inversor de frequência.

De origem mecânica, tanto em motores CC quanto CA, os modos potenciais de falha são: rolamentos, lubrificação, folgas na tampa, desalinhamentos das tampas, eixos empenados ou trincados, desbalanceamentos mecânicos, base, pá quebrada ventilador e folga da chaveta.

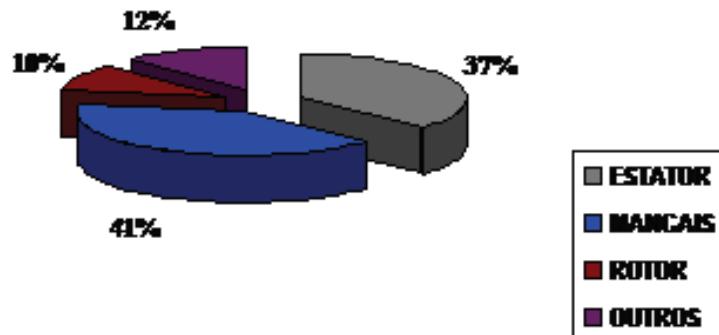


Figura 11 – Percentuais de Falhas x Partes dos Motores [31]

3.3 O PROCESSAMENTO DO SINAL DE CORRENTE

O processamento dos sinais em MCSA (Motor Current Signature Analysis) basicamente tem como objetivo identificar, no seu espectro de frequências, quais as fontes destas frequências e assim caracterizar a presença ou não de uma determinada falha. Assim, é interessante que se tenha em mente que existem outros fatores que incidem sobre o espectro de frequências da corrente coletada do motor, sendo um destes fatores a geração de harmônicos no momento da retificação da corrente trifásica senoidal para a forma de corrente contínua.

3.3.1 Harmônicos

Componentes harmônicos são elementos da série de Fourier os quais podem ser usados para originar quaisquer formas de ondas periódicas. Correntes e tensões harmônicas são criadas por cargas não-lineares conectadas a sistemas de distribuição de energia. A distorção harmônica é uma forma de ‘poluição’ elétrica, que pode vir a causar problemas, caso a soma dessas harmônicas aumentem além de valores determinados.

O princípio de como as componentes harmônicas estão presentes em determinados sinais pode ser verificado na figura 12.

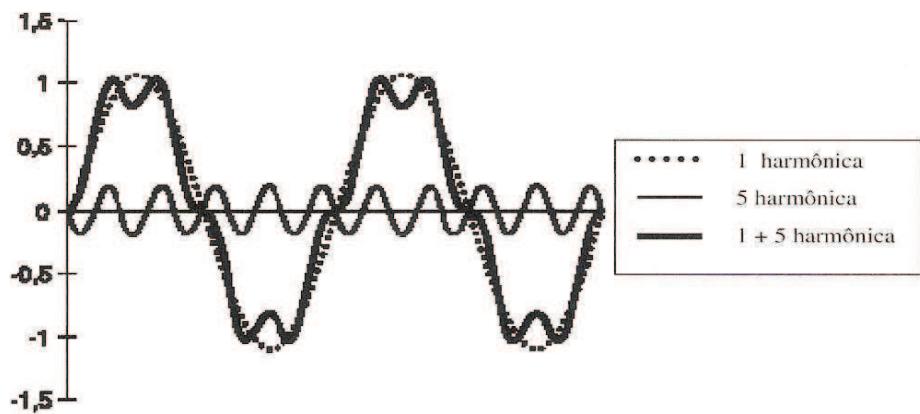


Figura 12 - Soma da Primeira e Quinta Harmônicas [23]

3.3.2 Análise de Fourier aplicada

Visto o conceito de harmônicos, apresentamos, sucintamente, a análise de Fourier, ferramenta esta que permite separar os harmônicos para posterior estudo.

A análise de Fourier realiza a transformação de um sinal no domínio do tempo para o domínio da frequência, possibilitando assim a análise de vibrações e principalmente na aplicação prática com MCSA.

Para isso, é interessante que se saiba que um sinal de corrente retificado apresenta diversas harmônicas em suas componentes. O resultado direto disso é que a análise de Fourier do sinal de corrente proveniente de pontes retificadoras apresentará diversas componentes espalhadas em seu espectro de frequência. A transformada de Fourier permite decompor esse sinal em diversos sinais de acordo com suas frequências.

Pela figura 13 pode-se ver a decomposição de um sinal originalmente no domínio do tempo para o domínio da frequência.

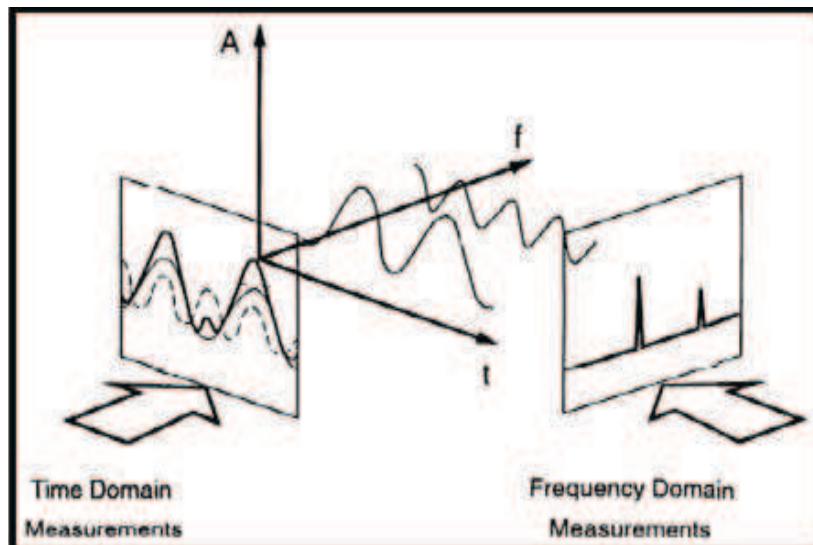


Figura 13 - Sinal e Decomposição em Frequência [34]

Assim, é interessante que se apresentem alguns conceitos relacionados à análise de Fourier aplicada às técnicas de processamento de sinais para manutenção preditiva de máquinas elétricas girantes.

- **Componente Fundamental:** é a frequência fundamental do elemento a ser estudado. Em análise de vibrações é a velocidade de rotação, representada por 1x. Em MCSA geralmente é dada pela frequência da rede (60 Hz).
- **Harmônicas e múltiplos:** as harmônicas correspondem a múltiplos inteiros da frequência fundamental. Em análise de sinais advindos de corrente alternada, geralmente a primeira harmônica é dada por 60 Hz, a segunda harmônica por 120 Hz e assim por diante. Os símbolos 1x e 2x, comumente utilizados em análise de vibrações, representam respectivamente 1x (uma vez) à frequência de rotação e 2x (duas vezes) a frequência de rotação do sistema.
- **Variações de frequência ao longo do tempo:** para que se obtenha uma decomposição de frequências que não se altere ao longo da coleta do sinal a ser decomposto, a técnica de FFT - Transformada Rápida de Fourier, recomenda que o sinal a ser transformado seja estacionário.

4. COMENTÁRIOS E ANÁLISE PRÁTICA

4.1 INSPEÇÃO SENSITIVA

São atividades de monitoração subjetiva, também chamada de inspeção, que consiste em acompanhar o estado dos equipamentos utilizando os sentidos humanos, levantando parâmetros para realizar ações de manutenção preventiva.

É um procedimento básico para o reconhecimento e análise prévia dos problemas nas várias partes das máquinas, utilizando instrumentos simples, tais como, termômetros e, principalmente, os sentidos.

Consiste na medição das condições de temperatura, vibração ou ruído, que determinados elementos da máquina produzem, quando existem problemas.

Em situações emergenciais, ou quando não se dispõe, no momento, de instrumentos de análise, então se utiliza o instrumento de medição mais antigo do homem, nossas mãos, ouvidos, olhos e nariz - sentindo, ouvindo, vendo e cheirando.

Segundo [23], temos alguns parâmetros para observar, monitorar e/ou ‘medir’ que são, principalmente temperatura, vibração, ruído e vazamentos.

- **Temperatura:** medimos via termômetro, ou se não dispomos de instrumentos adequados, colocando-se uma das mãos, no ponto que queremos verificar a temperatura (exterior do mancal, parte inferior do redutor etc.), sempre tomando cuidado com a segurança (não se queimar). Se conseguir ficar com a mão na superfície do ponto medido, está tudo bem. Caso não seja possível, a temperatura está acima da normal de trabalho.
- **Vibração:** da mesma forma como na medição de temperatura, verificando-se a existência de vibração do ponto desejado - vibra ou não. Se existir vibração, não é normal para a máquina.
- **Ruído:** é a mais fácil de observar (ou ‘medir’), mas também a mais catastrófica, pois é um dos últimos sintomas antes da quebra da máquina. Motor bem lubrificado não apresenta ruído.

- **Vazamento:** verificar a existência de vazamento de óleo ou outros fluídos, identificando o produto (utilizando o olfato) e a quantidade que está vazando por minuto, se possível.

Muita atenção com sua própria segurança e dos companheiros de trabalho. Nunca coloque a mão num local, sem cuidado e atenção, pois elas são nossos meios de vida.

Estes procedimentos de inspeção têm que ser utilizados todas as vezes que vamos realizar uma atividade de manutenção. Devemos sempre inspecionar as condições do equipamento, e se verificarmos alguma anormalidade, avisar ao responsável pela Ordem de Serviço, ao pessoal da segurança industrial e da manutenção.

4.1.1 Inspeção visual

Antes de procedermos a qualquer ensaio, tanto as condições elétricas quanto as mecânicas deverão ser inspecionadas visualmente. De acordo com Nemésio [22], dentre os fatores que deverão ser observados, dependendo do tipo e das recomendações do fabricante, podemos relacionar os seguintes:

1. **Levantamento dos dados de placa** – verificação efetuada no sentido de constatar se os dados de placa são condizente com as normas e as condições de operação a que ele será submetido.
2. **Inspeção nos calços do motor** – caso existam devemos retirar os calços do rotor além de efetuar uma verificação no balanceamento. Girar o rotor, sem ligá-lo à rede, várias vezes e observar se há alguma posição preferencial de parada. Em caso de existir, significa problema no balanceamento do rotor e as principais causas podem ser:
 - Rotor raspando no estator e sistema de ventilação
 - Rotor desequilibrado
 Se o rotor não girar livremente, então devemos verificar as condições dos mancais e a existência de freio que estejam mal ajustados. Os mancais podem estar precisando de lubrificação ou limpeza.
3. **Terminais de alimentação** – precisamos identificar os terminais de alimentação do motor para não sofrermos as consequências desagradáveis de ligações erradas. Nas máquinas de CA a troca dos terminais de alimentação poderá provocar a inversão do sentido de rotação, a tendência do motor a partir devagar, não atingir a velocidade

nominal e absorver corrente de maneira anormal. Se as ligações forem trocadas em máquinas de CC, esta poderá sofrer perda de excitação ou ter a polaridade invertida. Nos motores e geradores de CC autoexcitado, com a inversão da polaridade podemos eliminar o magnetismo residual do campo.

4. **Inspeção Geral no Comutador** – devemos efetuar uma inspeção geral no comutador observando seus componentes (anéis coletores, escovas, porta-escovas, ligações, molas etc.) e seu funcionamento. Caso seja notada a existência de verniz sobre os anéis devemos removê-lo, com uma lixa bem fina e um pano limpo, seco e que não solte fiapos, para que se estabeleça um bom contato. Devemos verificar a distância das escovas para os anéis. Caso seja necessário ajustar, atuaremos nos parafusos existentes com esta finalidade, mo porta-escovas. A distância recomendada deve ser fornecida pelo fabricante, porém caso não exista uma recomendação específica o ajuste deverá estar entre 0,005 mm e 0,254 mm (0,002" e 0,01"). Valores menores podem provocar o bloqueio nas escovas devido à dilatação e maiores podem provocar a sua quebra. Precisamos também observar a pressão das molas sobre as escovas e ajustar dentro dos valores dos fabricantes. Quando este valor não for especificado, devemos adotar um valor que deverá ficar entre 125 a 200 g/cm². Quando há centelhamento excessivo e não podemos conseguir uma boa comutação, devemos examinar cuidadosamente o comutador e os porta-escovas, para localizar os defeitos e eliminá-los, se possível, sugerimos os seguintes procedimentos para as pesquisas desses defeitos:
 - Observar a máquina em funcionamento e verificar possíveis ligações frouxas.
 - Verificar se não existe má superfície de contato entre a escova e coletor.
 - Verificar se não existe inversão de ligações;
 - Verificar distância, alinhamento e as posições relativas das escovas no comutador.
 - Verificar se não existem lâminas do coletor rebaixadas ou ressaltadas.
 - Certifique-se de que a escova pode se mover livremente dentro do porta-escovas.
 - Regule o espaçamento escova-coletor e a pressão das molas.
 - Inspecionar o comutador quanto à presença de sujeira, poeira, corrosão, irregularidades e se o filme que se forma entre o coletor e as escovas é normal.

5. **Limpeza** – precisamos executar limpeza periódica nos motores principalmente para evitar o acúmulo de poeira nos enrolamentos já que a sujeira e a umidade são um dos fatores que mais provocam alterações nas propriedades dos materiais isolantes. Esta limpeza deverá ser efetuada com um jato de ar seco, de alta pressão, quando a

máquina estiver parada. É bom, sempre que possível, programar a execução de limpeza dos enrolamentos com solvente especial para motores. A máquina após a limpeza com solvente deverá sofrer um processo de secagem.

4.2 ANÁLISE DE ÓLEOS LUBRIFICANTES

4.2.1 Introdução

Conforme Galvani [13], uma lubrificação só poderá ser correta quando: um ponto de lubrificação recebe o lubrificante correto, no volume certo e no momento exato.

O ponto só recebe ‘lubrificante correto’ quando: a especificação de origem (fabricante) estiver correta; a qualidade do lubrificante for controlada; não houver erros de aplicação; o produto em uso for adequado; e o manuseio, armazenagem e estocagem estiverem corretos.

O ‘volume certo’ só será alcançado se: o lubrificador estiver habilitado e capacitado; os sistemas centralizados estiverem corretamente projetados, mantidos e regulados; os procedimentos de execução forem elaborados implantados e obedecidos; houver uma inspeção regular e permanente nos reservatórios.

O ‘momento exato’ será atingido quando: houver um programa para execução dos serviços de lubrificação; os períodos previstos estiverem corretos; as recomendações do fabricante estiverem corretas; os sistemas centralizados estiverem corretamente regulados.

Qualquer falha de lubrificação provoca, na maioria das vezes, desgastes, com consequências a médio e longo prazo, afetando a vida útil dos elementos lubrificados.

Existem duas formas de encararmos as informações obtidas a partir de amostras de lubrificante:

- Condições do lubrificante: avaliação das propriedades físico-químicas do lubrificante para garantir a eficiência da lubrificação.
- Condições da máquina: análise de substâncias estranhas ao óleo (gases ou partículas de desgaste em suspensão no lubrificante) para avaliação das condições da máquina.

4.2.2 Principais ensaios para avaliação das condições do lubrificante

4.2.2.1 Viscosidade

Esta é a propriedade físico-química mais importante para um óleo lubrificante. Relacionada à velocidade de fluxo de óleo, garante a formação adequada do filme lubrificante.

A viscosidade é a resistência do óleo ao movimento de fluir. Nos fluidos newtonianos, a viscosidade é inversamente proporcional à temperatura, isto é, será tanto menor quanto maior for à temperatura.

Tem influência sobre a transferência de calor, portanto, seu aumento faz cair à evidência de refrigeração. Ela não deve ser elevada demais porque provocaria aquecimento e perda de potência por atrito interno no próprio óleo, também não pode ser baixa demais porque poderá ser não suficiente para manter a continuidade da película e o afastamento completo das superfícies.

Existe uma faixa ideal para o conjunto de valores relativos a cargas, velocidades, e temperaturas de trabalho. A viscosidade condiciona ainda o fluxo de óleo entre as superfícies e consequentemente a capacidade de refrigeração das mesmas.

A viscosidade é um dos principais fatores na seleção de um óleo lubrificante, sendo sua determinação influenciada por diversas condições:

- **Velocidade:** quanto maior a velocidade, menor deve ser a viscosidade, pois a formação da película lubrificante é mais fácil. Os óleos de maior viscosidade possuem maiores coeficientes de atrito interno, aumentando a perda de potência, isto é, a quantidade de força motriz absorvida pelo atrito interno do fluido.
- **Pressão:** quanto maior for a carga, maior deverá ser a viscosidade para suportá-la e evitar o rompimento da película.
- **Temperatura:** como a viscosidade diminui com o aumento da temperatura, para manter uma película lubrificante quanto maior for à temperatura, maior deverá ser a viscosidade.

- **Folgas:** quanto menores forem às folgas, menor deverá ser a viscosidade para que o óleo possa penetrar nelas.
- **Acabamento:** quanto melhor o grau de acabamento das peças, menor poderá ser a viscosidade.

A medição da viscosidade em laboratório é realizada tomando-se uma porção de óleo, levando-se a amostra a uma temperatura padronizada – normalmente 40°C, e medindo o tempo que o óleo leva para fluir por um orifício ou tubo capilar.

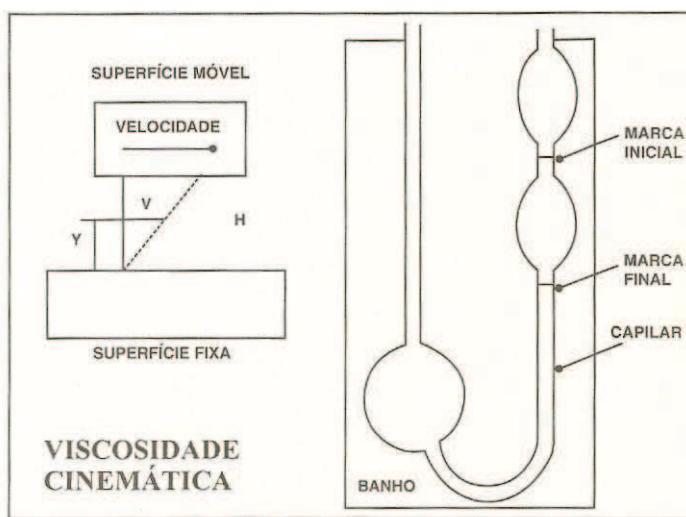


Figura 14 - Viscosidade Cinemática [5]

- **Índice de viscosidade**

Todos os óleos sofrem aumento de viscosidade (engrossam) quando resfriados e diminuição de viscosidade (afinam) quando aquecidos. Uns são mais afetados – naftênicos, do que outros – parafínico. De acordo com Galvani [13], foi criada uma escala de índices de viscosidade para indicar essa maior ou menor variação da viscosidade com a variação da temperatura.

A uma série de óleos tipicamente naftênicos, foi atribuído o índice ‘zero’ (máxima variação de viscosidade) e outra série de óleos tipicamente parafínico foi atribuído índice ‘100’ (mínima variação de viscosidade).

Existem atualmente óleos com índice de viscosidade abaixo de zero e óleo com índice de viscosidade acima de 100. O índice de viscosidade é uma característica utilizada para identificar a natureza de óleos minerais puros e pode ser aumentado pela adição de ativos.

- **Abaixo de zero** – óleos de processamento de borracha componentes naftênicos e aromáticos.
- **Entre 0 e 40** – baixo índice de viscosidade: óleos de base naftênicos preponderante.
- **Entre 40 e 80** – médio índice de viscosidade: óleos de base mista ou naftêlica que tenham recebido tratamento.
- **Entre 80 e 100** – alto índice de viscosidade: óleos de base preponderante parafínica.

4.2.2.2 Índice de neutralização

Os aditivos antidesgaste de óleos industriais são normalmente ácidos. Já os de uso em motores a explosão são básicos. Analisar a evolução da acidez ou basicidade é uma forma de acompanhar o consumo de aditivos.

À medida que o óleo envelhece em serviço surgem ácidos orgânicos como consequência da sua oxidação. Portanto, ao longo da vida de um óleo hidráulico, por exemplo, percebemos que a acidez diminui com o tempo – pelo consumo de aditivos, para depois subir novamente – pela oxidação do óleo.

Em óleos isolantes, o teste de acidez é muito importante porque produtos ácidos afetam as propriedades dielétricas do óleo, diminuindo-as.

Um óleo de motor diesel apresentará, ao longo do uso, decréscimo na basicidade. Isto porque os aditivos básicos estão neutralizando os ácidos gerados durante a combustão.

Este teste determina a quantidade de caráter ácido ou básico dos produtos. As características ácidas ou básicas dependem da origem do produto, do conteúdo de aditivos, do processo de refinação e da deterioração em serviço.

O índice de neutralização pode ser determinado pelo método de Potenciométrico. O método Potenciométrico baseia-se no princípio eletrolítico: “ao colocarem-se dois eletrodos

de diferentes materiais em uma solução, é gerada uma diferença de potencial entre eles”. Esta diferença de potencial pode ser relacionada diretamente ao valor de pH.

De acordo com o caráter ácido ou básico, o valor do índice de neutralização pode ser indicado pelos seguintes nomes:

- **TAN – Total acid number:** é a medida da quantidade de base, expressa em miligrama de KOH – hidróxido de potássio, necessária para neutralizar todos os componentes ácidos presentes em um grama de amostra.
- **TBN – Total basic number:** é a medida da quantidade de ácido, expressa em miligramas de KOH equivalente ao ácido clorídrico, gasta para neutralizar as bases fortes presentes em um grama de amostra.

4.2.2.3 Tensão interfacial

Quando dois líquidos não miscíveis estão em contato, cria-se uma interface entre eles. O grau de resistência que estes líquidos oferecem à sua separação se define como tensão interfacial.

Tensão interfacial, portanto, é a medida da força necessária para romper a película de óleo existente na interface água/óleo.

Os fatores que interferem na tensão interfacial são: natureza química dos líquidos em contato; temperatura – se a temperatura aumenta, a tensão interfacial diminui; e presença de corpos polares abaixa a tensão interfacial - podem ser contaminantes alguns tipos de aditivos ou produtos de degradação do óleo.

Este teste indica a presença ou ausência de compostos polares – sabões, tintas, vernizes, aditivos contaminados e produtos da degradação e oxidação, mesmo em concentrações muito baixas e é indicado para óleos isolantes e óleos de turbina.

O ensaio é feito numa cuba com água e óleo. Um pequeno anel de platina montado numa balança é movido para baixo e para cima, verificando-se a resistência que a interface oferece ao seu movimento.

4.2.2.4 Teor de água

É a medida da quantidade de água em solução no óleo. A presença de água num lubrificante é extremamente danosa, pois provoca ferrugem nos componentes, acelera a degradação dos aditivos e a oxidação. Os métodos de ensaios mais comuns para detectar a presença de umidade nos óleos são:

- **Crepitação** – ensaio a base do sentido da audição, utilizado para separar amostras que deverão ser analisadas em laboratório. Em uma chapa aquecida a 120°C joga-se algumas gotas de óleo. Caso o teor de água seja maior que 0,1%, vamos ouvir um ruído típico de crepitação.
- **Destilação** – destila-se uma porção da amostra e mede-se o volume de água obtido no resfriador. O valor prático mínimo de detecção é de 0,1%.
- **Karl Fisher** – utiliza-se um processo de titulação com um reagente especial. Este teste é muito sensível e por este motivo é empregado na avaliação de óleos isolantes. Os resultados são fornecidos em PPM – partes por milhão.

4.2.2.5 Contagem de partículas

A qualidade do óleo decresce com o aumento do nível de contaminação por partículas e não apenas pela umidade. As estatísticas mostram que 80% dos problemas em sistemas hidráulicos são causados por contaminantes sólidos – partículas. Nada mais natural que monitoremos a concentração destas partículas.

O desempenho do líquido lubrificante é influenciado pelas partículas em função da: concentração, perfil, dimensão e tipo de partícula.

Os métodos mais comuns são:

- **Comparação visual de membranas de filtro** – historicamente, as primeiras avaliações foram feitas por meio da comparação visual de membranas de filtro por onde foram passados 100 ml de óleo. A baixa resolução do processo e a grande subjetividade na interpretação dos resultados nos permitem aceitar este processo, nos dias de hoje, apenas em casos de máquinas muito robustas, distantes da civilização ou em casos de emergência.

- **Contagem de partículas em microscópio** – o processo anterior foi normatizado e, empregando-se microscópios ópticos de até 400 vezes de ampliação, contam-se as partículas presentes no filtro. É um método muito demorado.
- **Contadores de partículas automáticos** – existem contadores que utilizam feixes de laser e outros que inferem o grau de contaminação pela perda de carga causada pela obstrução de filtros calibrados. É o processo mais rápido.



Figura 15 - Exemplo de Acompanhamento de um Redutor [5]

4.2.2.6 Partículas insolúveis

Partículas sólidas de contaminantes, limalhas de desgaste e certas borras de degradação não são solúveis no óleo.

Neste ensaio, numa ampola de vidro graduada, centrifuga-se certo volume de óleo ao qual foi adicionado um solvente – pentano ou tolueno. Ao final da centrifugação, retira-se uma parte do líquido e acrescenta-se mais solvente. O líquido é novamente centrifugado. O processo se repete até que não haja mais alteração de cor no solvente. Secamos o solvente e pesamos a amostra. O resultado final é dado em porcentagem de insolúveis em peso ou também em mg/l.

Uma variação do método é pesar uma membrana de filtro antes e depois da passagem de um óleo previamente dissolvido.

Quando empregamos o pentano como solvente, dizemos que a medição foi dos insolúveis totais. Quando utilizamos o tolueno, este solvente é capaz de dissolver a maioria das borras e outros produtos de oxidação. A diferença entre as leituras obtidas com o pentano e as do tolueno nos indica o quanto nosso óleo está oxidado.

Este ensaio é muito utilizado, mas possui uma resolução muito baixa. Tanto que, a menos que estejam absurdamente contaminados, óleos de turbina e de sistemas hidráulicos são geralmente aprovados neste teste. Por esse motivo é que este ensaio pode ser empregado apenas em redutores e, assim mesmo, somente em casos de máquinas muito robustas como, por exemplo, em aplicações siderúrgicas ou mineração.

4.2.2.7 Metais por espectrometria

Espectrometria é a técnica de análise qualitativa e quantitativa baseada na obtenção e estudo do espectro de emissão de substâncias. Emprega a fragmentação de molécula, e a detecção da massa e da abundância dos fragmentos resultantes, para deduzir a estrutura dessa molécula.

O método mais famoso no meio da lubrificação é a espectrometria por absorção atômica. A amostra de óleo é introduzida numa câmara de combustão – ou diretamente numa tocha de plasma, ou entre a faísca obtida por meio de eletrodos ou ainda é submetida ao bombardeamento por raios X – e os materiais presentes são ‘desintegrados’ até o seu nível atômico e fortemente excitados.

Uma vez que cada elemento químico possui sua própria característica de emissão ou absorção de energia eletromagnética – exemplo: o átomo de sódio emite uma luz amarela praticamente pura, podemos identificar qual elemento químico está na amostra.

A intensidade da emissão ou absorção é proporcional à concentração. Por meio de comparações com amostras de concentrações conhecidas são possíveis cálculos quantitativos. Os resultados são fornecidos em PPM – partes por milhão ou PPB – partes por bilhão.

Com este ensaio podemos identificar a presença de ferro, alumínio, níquel, chumbo e outros metais que são utilizados na fabricação dos componentes da máquina. A areia é quantificada pela presença do silício. Os aditivos são quantificados pela presença de zinco, magnésio, cálcio e fósforo. Entretanto, esta técnica não consegue detectar partículas maiores que 8 µm – a média de limite de detecção está em torno de menor do que 5 µm.

É possível contornar este problema atacando-se a amostra com produtos químicos e analisando-se os íons resultantes. Este processo é, porém, bastante elaborado e não muito

prático para monitoramentos sistemáticos. Sua importância na avaliação do lubrificante em si é indiscutível e fortemente recomendada.

4.2.2.8 Espectrometria por infravermelho

Técnica que emprega a absorção de radiação infravermelha por certos grupamentos atômicos, para determinar a estrutura de moléculas. Cada molécula absorve uma determinada frequência de luz infravermelha.

O método de exame consiste em levantar o espectro de absorbância do óleo novo, que é a sua propriedade de absorver outros líquidos, raios luminosos, gás etc., e tomá-lo como referência.

Quando aplicamos a Transformada Rápida de Fourier no espectro de absorbância podemos identificar e quantificar os compostos resultantes de: oxidação, nitração, sulfatação, teor de água, glicol e diluição por combustíveis. A fuligem, por outro lado, opera como um filtro, absorvendo todas as frequências da luz infravermelha.

Mais ainda, como o exame é comparativo – inicialmente levanta-se o espectro de absorbância do óleo novo, como referência, podemos até identificar se o óleo em uso é do mesmo modelo do óleo especificado.



Figura 16 - Exemplo de Espectro de Absorbância Obtido por Infravermelho [5]

4.2.2.9 – Cromatografia gasosa

Este ensaio é considerado o mais importante no monitoramento de óleos isolantes, pois determina a presença de hidrogênio e compostos gasosos de hidrocarbonetos de baixo peso molecular. Os casos abaixo são os mais estudados:

- Arcos Elétricos = Acetileno

- Corona no Óleo = Hidrogênio e Metano
- Corona no papel/óleo = Hidrogênio e CO
- Eletrólise da Água = Hidrogênio
- Deterioração Acelerada do Isolamento = CO e CO₂
- Superaquecimento do Óleo = Etileno

A coleta de óleo deve ser feita com muito cuidado, em dias secos e por meio de seringas de vidro cuidadosamente lavadas e secas – normalmente fornecidas pelo próprio laboratório. Logo após a coleta, deve-se proteger a seringa contra a luz e remetê-la imediatamente ao laboratório.

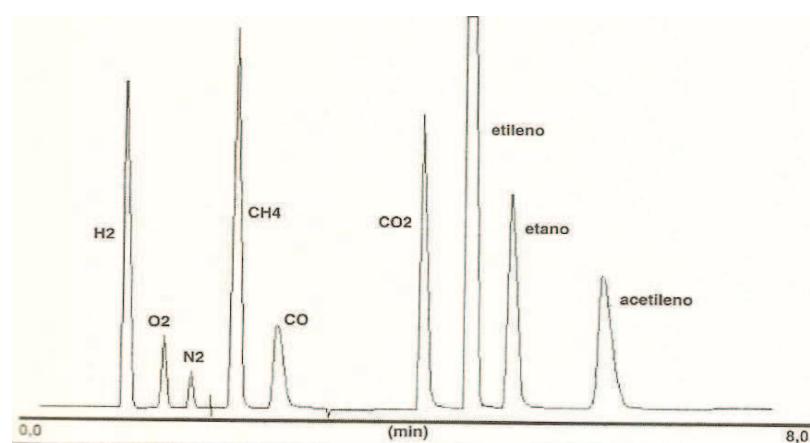


Figura 17 - Cromatograma Obtido a Partir de um Transformador Problemático [5]

4.2.2.10 Rrigidez dielétrica

Indica a tensão para qual uma falha ocorre, mostrando a capacidade do óleo em suportar tensões elétricas sem falhar. Um óleo isolante deve suportar as tensões normais de trabalho do equipamento acrescidas de eventuais surtos.

O ensaio de rigidez não é utilizável para a predição de vida útil porque não é função da composição do óleo, mas dos contaminantes presentes – carbonos, sólidos em suspensão e principalmente a umidade. Entretanto este teste deve ser realizado periodicamente para determinação do momento de troca ou regeneração da carga.

O ensaio é bastante simples. Numa cuba com eletrodos, e sob temperatura e umidade controladas, aplicar tensão crescente e observar para qual valor de tensão o óleo deixa de atuar como isolante e ocorre a descarga de corrente. Os resultados são expressos em KV/cm.

4.3 ANÁLISE DE VIBRAÇÃO

4.3.1 O que é vibração?

Vibração é a oscilação de um corpo sobre um ponto de referência decorrente de uma determinada força. Existem alguns conceitos fundamentais sobre vibrações que devem ser entendidos de maneira clara, evitando interpretações e afirmações que não correspondem à realidade.

Dentre os movimentos vibratórios pode-se citar o movimento dos pêndulos, das cordas de instrumentos musicais, corpos em movimento e, inclusive os átomos que constituem os sólidos e que vibram em torno de posições fixas na rede cristalina. Na indústria as vibrações ocorrem em máquinas girantes e alternativas, acoplamentos, redutores, estruturas etc.

4.3.1.1 Caracterização do fenômeno

Vibração mecânica é o fenômeno observado quando uma partícula executa movimentos em torno de uma posição de equilíbrio. Existem várias maneiras de definir movimento vibratório através de expressões matemáticas que podem ser bastante simples, assim como de alta complexidade.

Fisicamente, o fenômeno de vibração é o resultado da troca de energia entre dois depósitos de um mesmo sistema. Quando há troca de energia cinética em energia potencial e vice-versa, aparece a vibração.

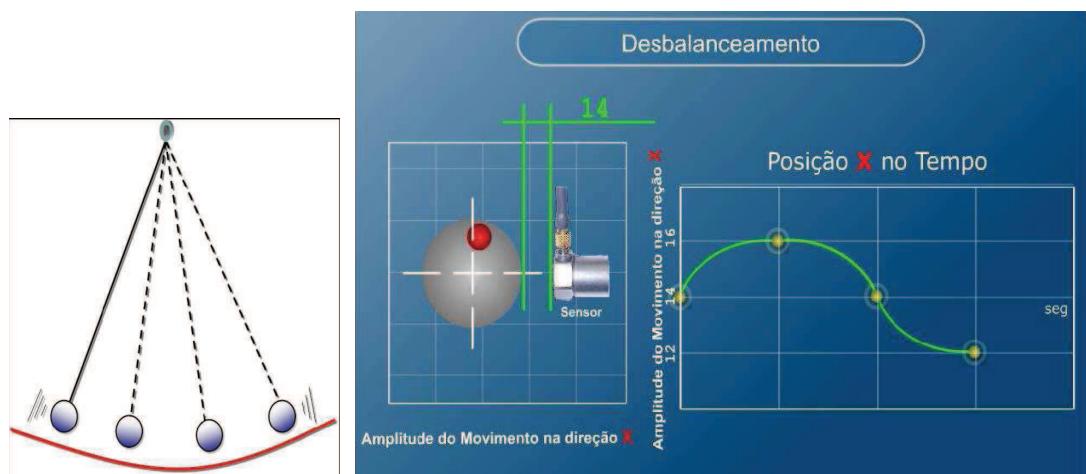


Figura 18 - Pêndulo e Onda no Tempo - Criação de um Ciclo [31]

A equação fundamental da vibração é: **Vibração = f (excitação, mobilidade)**

Daí, podemos inferir:

- Excitação: movimento normal (rotativo, alternativo), desbalanceamentos e choques.
- Mobilidade: folgas e rigidez.

4.3.1.2 Grandezas físicas da vibração

As grandezas físicas da vibração são: frequência, amplitude e fase.

- Frequência é o número de ciclos que um evento acontece em um determinado período, medidos na unidade Hz - Hertz.

A investigação dos sinais através da frequência é a técnica fundamental no diagnóstico de vibrações. A análise da frequência facilita o trabalho para detecção de fontes de vibrações.

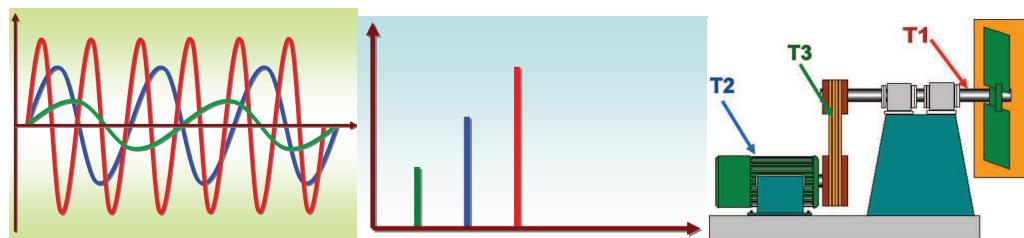


Figura 19 – Demonstração de Onda no Tempo e em FFT e os Pontos de Medição [31]

A análise de frequência é representada com o parâmetro escolhido para a medição em função da frequência conforme figura 19.

- Amplitude é a intensidade que acontece um determinado evento mostrando a criticidade e a destrutividade dos eventos presentes. É plotado no eixo Y cartesiano.

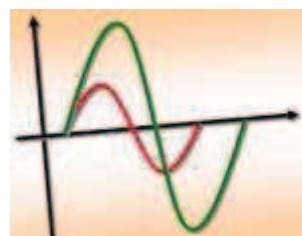


Figura 20 – Representação de uma Amplitude [31]

- Fase: Informa o ângulo em que o sinal se apresenta através da reação física da máquina ou componente. Em máquinas rotativas tem-se o seguinte evento: em um ponto de referência da máquina existe a atuação da força num determinado instante “t”

e para toda ação existe uma reação igual e contrária. A força de ação é em movimento e quando ocorrer à reação, o ponto forçante não estará no ponto de referência.



Figura 21 – Representação de uma Fase [31]

4.3.1.3 Nível de vibração

O nível de vibração de um espectro, em função do tempo, pode ser medido em valor Pico a Pico, valor de Pico e valor RMS - *Root Mean Square*.

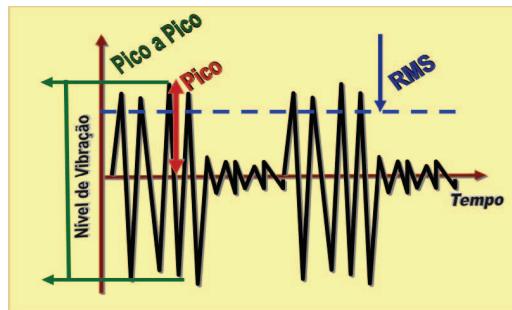


Figura 22 – Representação de Nível de Vibração [31]

O valor Pico a Pico indica o percurso máximo da onda, é o maior ciclo, usado para identificar a falha no estágio prematuro e também para seu estágio avançado, não leva em consideração o histórico no tempo da onda. (ver figuras 23 e 25).

O valor de Pico é utilizado para identificar choques de curta duração, porém, indica somente a ocorrência do pico, não levando em consideração o histórico no tempo da onda.

O valor RMS é a medida de nível mais relevante, porque leva em consideração o histórico da onda no tempo e registra a severidade da energia contida no sinal, e, portanto, à capacidade destrutiva da vibração (ver figura 24).

- Pico a Pico = 20; Pico = 10 e RMS = 1,5

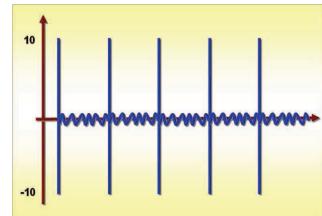


Figura 23 – Representação do Início de Defeito - o valor de RMS é baixo [31]

- Pico a Pico = 20; Pico = 10 e RMS = 7

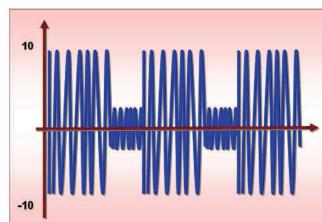


Figura 24 – Representação do Defeito com Maior Severidade - o valor de RMS aumenta [31]

- Pico a Pico = 40; Pico = 25 e RMS = 1,3

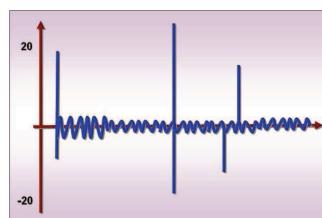


Figura 25 – Representação da Falha, situação já intermitente - o valor de RMS cai [31]

Correlação entre nível pico a pico, nível de Pico e nível RMS, para uma onda seno:

$$\text{Nível RMS} = \sqrt{1/T \int_0^t x^2(t) dt}$$

4.3.2 Parâmetros de vibração

Os parâmetros para medir os níveis de vibração são: deslocamento, velocidade ou aceleração. Observando a vibração de um componente simples, como uma lâmina fina, considera-se a amplitude da onda, como sendo o deslocamento físico da extremidade da lâmina, para ambos os lados da posição de repouso.

Todas as três representam ‘o quanto’ o equipamento está vibrando. A frequência é a outra variável de importância, que ajuda a identificar a origem da vibração, ou seja, o que está causando a vibração e, finalmente a fase indica onde o ponto pesado se encontra em relação ao sensor de vibração.

Qualquer que seja o parâmetro considerado, deslocamento, velocidade ou aceleração, a forma e o período de vibração permanecem similares. A divergência principal é que existe uma diferença de fase entre os três parâmetros.

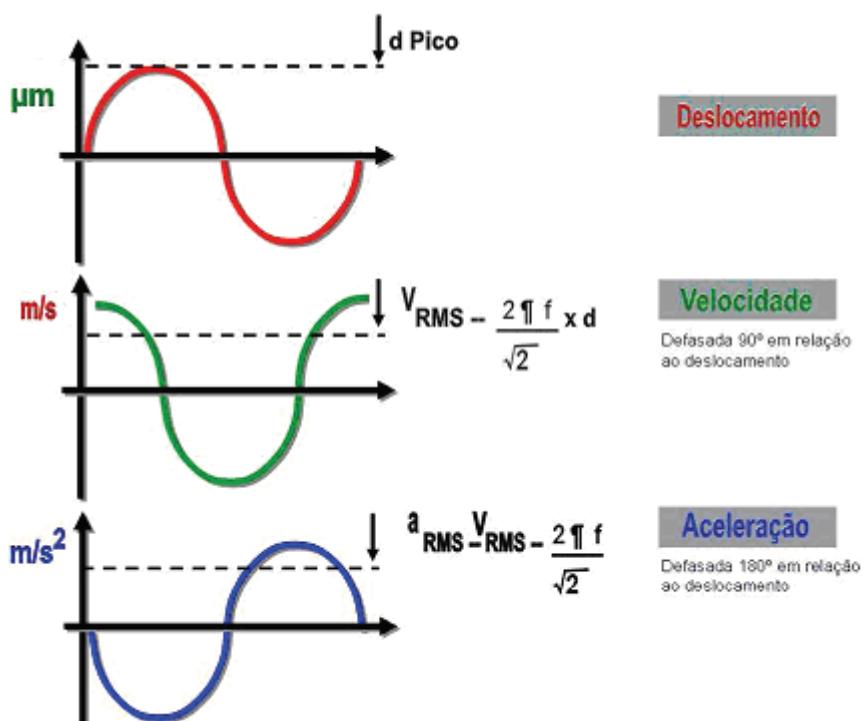


Figura 26 – Representação da Defasagem dos Parâmetros de Vibração [31]

Os parâmetros de vibração são universalmente medidos em unidades métricas de acordo com as recomendações da ISO, sendo:

Deslocamento: m, mm, μm .

Velocidade: m/s , mm/s .

Aceleração: m/s^2 , km/s^2 .

4.3.2.1 Escolha do parâmetro de vibração

O sensor de vibração utilizado numa medição de vibração é o que transforma o sinal de vibração mecânica em sinal elétrico, para interpretá-lo através do equipamento de medição ou software.

Os equipamentos medidores de análise de vibração estão equipados para medir todos os três parâmetros, convertendo (através de integradores eletrônicos) o sinal medido pelo sensor, no parâmetro escolhido pelo usuário. Assim somente precisa decidir qual parâmetro utilizar numa medição de vibração.

Cada parâmetro tem um comportamento característico em função da frequência, conforme mostra a figura 27.

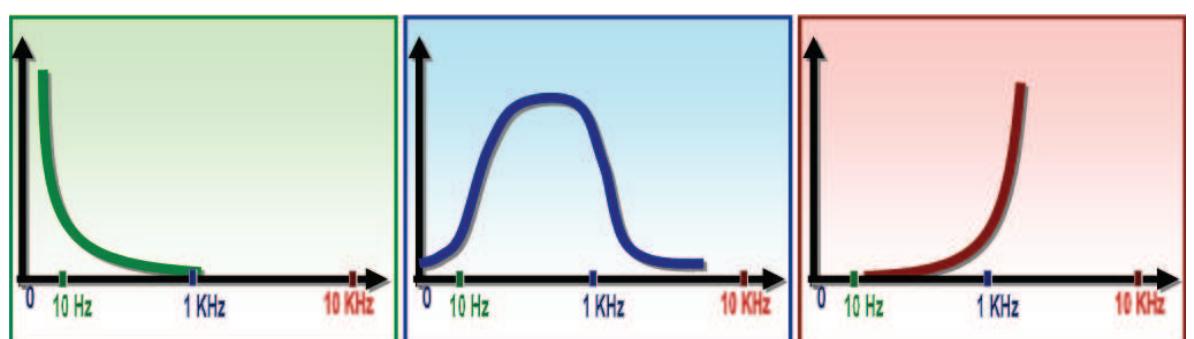


Figura 27 – Representação de Deslocamento, Velocidade e Aceleração [31]

O deslocamento evidencia as energias de vibrações que ocorrem em baixa frequência (até 10 Hz, ou seja, 600 RPM). O deslocamento é utilizado para a identificação de desbalanceamento em partes de máquinas rotativas com amplitudes elevadas na frequência de rotação de um eixo. Devido a isto, o balanceamento de campo apresenta bom desempenho até 20 Hz (1.200 RPM) e eventualmente até 30 Hz (1.800 RPM), dependendo da rigidez do sistema.

A velocidade de vibração é o parâmetro menos influenciado por ruídos de baixa ou alta frequência, se mostrando num espectro a mais aplainada das curvas, sendo, por isso, o parâmetro normalmente escolhido para avaliação da severidade de vibração entre 10 Hz e 1.000 Hz dos seguintes problemas:

- Falta de rigidez mecânica.
- Desbalanceamento.
- Desalinhamento paralelo e angular.
- Empenamento.
- Folgas.

- Desgastes em acoplamentos.
- Passagem de pás.
- Problemas elétricos (ex: escorregamento).

A aceleração de vibração é o parâmetro que representa melhor os componentes de alta frequência, ou seja, é a rapidez que a velocidade de um corpo varia. Como a própria velocidade é uma rapidez, pode-se dizer que é velocidade da velocidade. Sua aplicação é recomendada na monitoração de frequências entre 1.000 Hz e 10.000 Hz para identificar os seguintes problemas:

- Engrenamento.
- Falhas de rolamento.
- Cavitação.
- Problemas elétricos (ex: frequências de ranhuras).

Fator de Crista – um procedimento típico de avaliar a condição de deterioração de rolamento é verificar a curva de tendência por fator de crista. O fator de crista é definido como sendo a relação entre o valor de pico e o seu correspondente valor RMS.

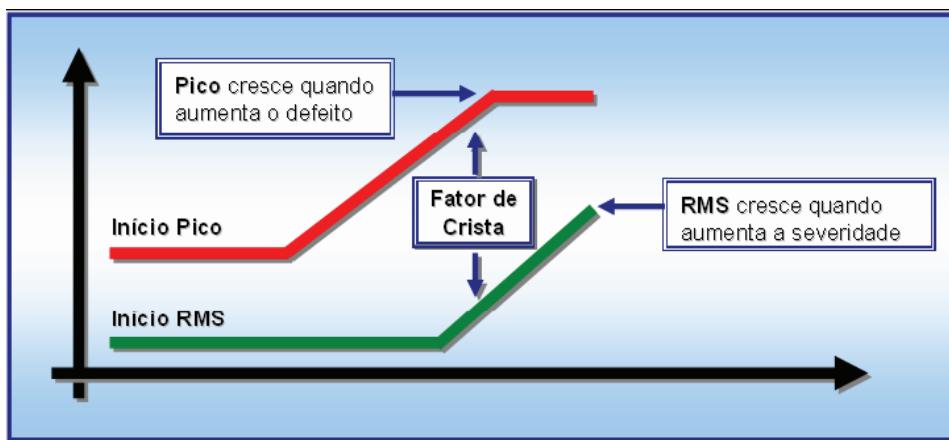


Figura 28 – Representação do Fator de Crista [31]

4.3.3 Sensores de vibração

Os sensores de vibração são dispositivos que fazem a codificação de um sinal mecânico em um sinal elétrico representativo. Existem basicamente dois tipos de sensores: absoluto e relativo.

4.3.3.1 Sensor relativo (sem contato)

O sensor relativo chamado de probe de deslocamento sem contato é o sensor de maior aceitação para monitoração contínua de máquinas rotativas. O sistema consiste de um probe, um cabo de extensão e um oscilador-demulador conhecido no Brasil como ‘proximitor’. Esse sensor consiste de uma bobina montada em plástico ou cerâmica não condutora que, por sua vez, fica alojada num corpo roscado.

O probe é excitado por uma frequência de 1,5 MHz gerada pelo oscilador demodulador (proximitor) e transmitida através do cabo de extensão. Esta excitação produz um campo magnético, que se irradia da ponta do probe. Quando a ponta do probe fica próxima a uma superfície condutora, correntes parasitas são induzidas na superfície do material, extraindo energia da excitação do probe e reduzindo sua amplitude. Como a distância entre a ponta do probe e o material condutor, normalmente o eixo da máquina, é variada, uma tensão DC correspondente é gerada na saída do proximitor, que irá variar proporcionalmente à variação da distância entre a ponta do probe e o eixo.

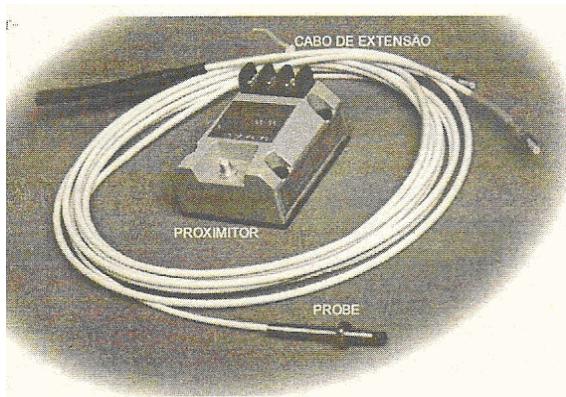


Figura 29 – Probe, Proximitor e Cabo de Extensão [5]

O parâmetro-chave do qual esta medição de vibração depende é a capacidade do espaço. A tecnologia de medição capacitiva é independente do campo magnético, das irregularidades da superfície do alvo e das propriedades metalúrgicas do alvo.

As vantagens do uso do sensor relativo são: tamanho reduzido, não sofre efeitos de óleo e gases, suportar temperatura de até 120°C, multiaplicação (vibração, deslocamento axial, fase, rotação) e faixa de resposta de frequência ampla (0 a 5 kHz) e as desvantagens são: suscetível a variações na superfície do eixo (arranhões, mossas, recuperação com

materiais de condutividade diferente), requer fonte externa para gerar sinal e não pode ser submerso em água.

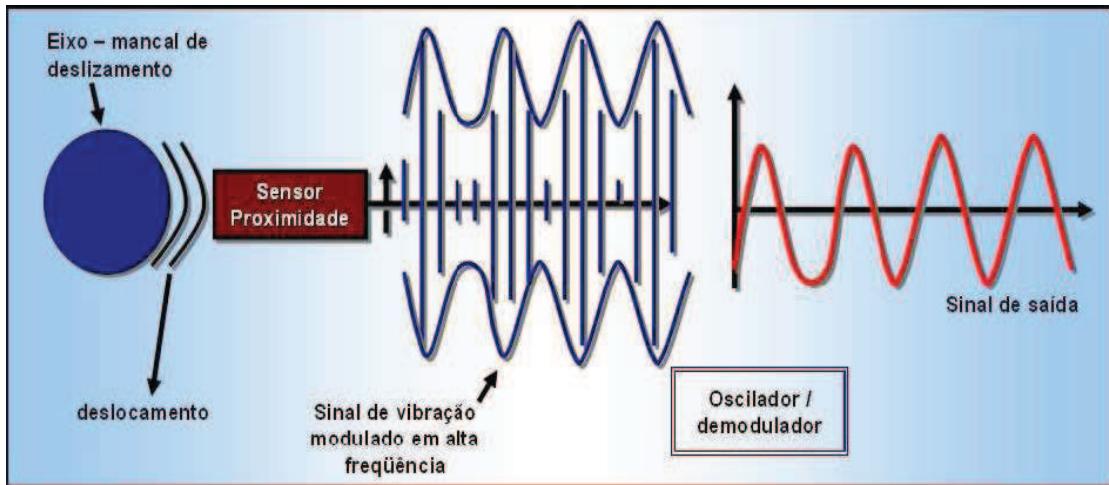


Figura 30 – Representação do Sinal do Sensor de Vibração Relativa [31]

4.3.3.2 Pick-up de velocidade

O *pick-up* de velocidade típico está mostrando na figura 31. Consiste de uma carcaça, normalmente de alumínio, dentro da qual estão alojados uma bobina, um imã permanente e duas molas. O imã fica suportado pelas duas molas, uma em cada extremidade, e esse conjunto é colocado no interior da bobina.

Quando o *pick-up* é encostado a uma superfície que apresenta vibração, ocorre um movimento relativo entre o imã e a bobina. Esse movimento corta as linhas de fluxo magnético, induzindo uma voltagem proporcional à velocidade de vibração. O sinal produzido, que é gerado apenas pelo movimento, é de baixa impedância podendo ser usado diretamente para a análise ou monitoração. A faixa de utilização desse tipo de sensor se situa entre 10 e 1.500 Hz.

Entretanto, como esse sensor tem um sistema eletromecânico com partes móveis, estando sujeitos a falhas, seu uso tem sido gradativamente descontinuado em favor de outros tipos de sensores. Sua grande aplicação é a utilização em aparelhos de medição e análise de vibração portátil.

As vantagens do uso do *pick up* são: sinal forte, geração do seu próprio sinal (voltagem) e pode ser montado em qualquer direção e razoável precisão até 300.000 RPM e

as desvantagens são: grande e pesado, preço elevado e limitação de utilização abaixo de 10 cps.

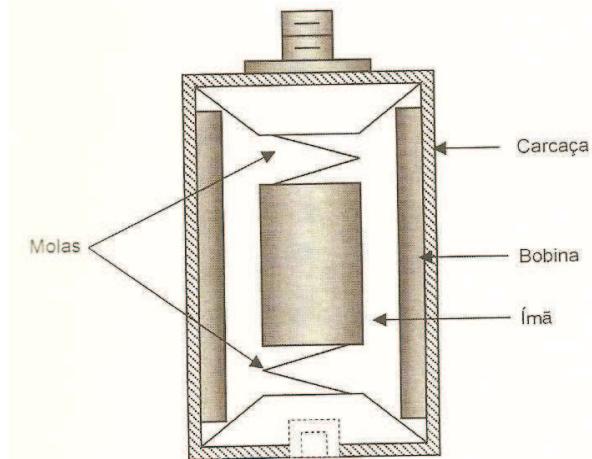


Figura 31 – Pick-up de Velocidade [5]

4.3.3.3 Sensor absoluto

O sensor absoluto chamado de “acelerômetros piezoelétrico” tem-se tornado, recentemente o mais utilizado para medida de vibração de máquinas por apresentarem uma curva de resposta em frequência muito superior do que os pick ups de velocidade combinadas com dimensões razoavelmente reduzidas. Além disso, esses sensores apresentam uma maior durabilidade (não possuem partes móveis), que os torna indicado para o rigor do trabalho diário de coleta de dados. Como muita situação de monitoração torna-se necessárias medições de frequências bem acima de 1.000 Hz, combinadas com amplitudes de vibração extremamente elevadas, o acelerômetro piezoelétrico é a única escolha.

Com uma instrumentação baseada no uso de acelerômetros, o usuário fica livre para escolher entre aceleração, velocidade ou deslocamento, como parâmetros de medida, bastando para isso que o medidor de vibração possua circuitos integradores, que transformam sinais proporcionais à aceleração do movimento vibratório em sinais proporcionais a velocidade e ao deslocamento.

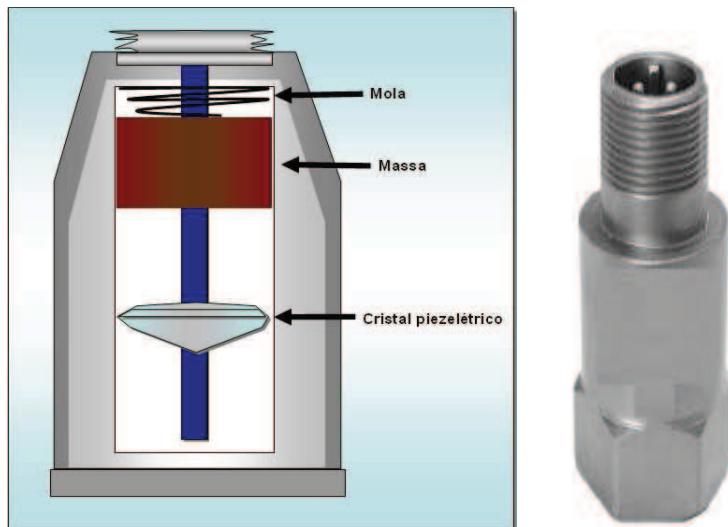


Figura 32 – Representação do Sinal do Sensor de Vibração Absoluta [31]

O acelerômetro, quando fixo a uma superfície vibrante, produz em seus terminais de saída uma tensão ou descarga que é proporcional à aceleração no qual está submetido, ou seja, seu princípio de funcionamento está na utilização de discos cerâmicos piezoelétricos, que por sua vez, possuem a propriedade física de gerar descargas elétricas quando solicitados a esforços.

No projeto deste sensor, os elementos piezoelétricos são arranjados para que sejam submetidos a uma carga na forma de massa em uma mola pré-tensionada, onde todo este conjunto é montado assentado em uma base, sendo que o sistema massa-mola fica preso no topo e protegido por um invólucro resistente. A figura 32 ilustra um acelerômetro do tipo compressão.

A forma que o transdutor é fixado no ponto de medição altera sua frequência de ressonância e consequentemente o alcance da frequência. Uma prática conceituada é ter o limite superior da faixa de frequência de interesse da medição a 1/3 da faixa de frequência a qual tem como limite superior de ressonância do sensor.

Um acelerômetro piezoelétrico, por exemplo, tem sua frequência de ressonância em torno de 32 kHz, obtida na calibração, na qual a superfície de montagem é completamente plana e lisa.

Quando o acelerômetro é montado e rosqueado por um parafuso prisioneiro, fixo na carcaça da máquina, há pouca alteração da frequência de ressonância: 31 kHz sendo este método o mais recomendado para execução de medição para alcance para até – 10 kHz.

Onde os pontos de medição permanentes em máquinas estão para ser estabelecidos, e não é desejado furar e fazer rosca de fixação pode ser utilizado prisioneiro colado, usando cola dura tipo epóxi. Outras coisas macias reduzem consideravelmente a faixa de frequência do acelerômetro.

O posicionamento do acelerômetro piezelétrico com imã permanente altera a frequência de ressonância para aproximadamente 7 kHz, consequentemente com este modo de fixação, não se recomenda medições acima de 2 kHz.

O transdutor transforma um sinal de vibração mecânica em um sinal elétrico que é transmitido ao instrumento de medição, através do cabo que liga o transdutor ao instrumento. O cabo para uso com acelerômetro não deve ficar tracionado ou flexionado, para evitar ruído tribo-elétrico (eletrização por atrito). Não há problema com o cabo arrumado linearmente e bem apoiado.

Apesar de o acelerômetro piezoelétrico gerar o seu próprio sinal, este tem uma impedância muito alta, não sendo compatível com os instrumentos de indicação em painéis, instrumentos de análise e monitoração. Para resolver esse problema são utilizados equipamentos eletrônicos para converter de alta para baixa impedância.

As vantagens de uso do acelerômetro são: ampla faixa de resposta em frequência, peso e dimensões reduzidas, boa resistência a temperaturas (pode atingir altas temperaturas sob encomenda) e preços relativamente módicos e as desvantagens são: peça sensível (exige cuidados na montagem) e ressonância pode ser excitada no sensor frequentemente exigindo instalação de filtro passa-baixa.

4.3.4 Identificação de frequências

O primeiro passo em identificar a fonte de vibração em uma máquina é calcular as frequências esperadas de vibração quando a máquina estiver operando numa determinada rotação.

A análise espectral revela as frequências nas quais os níveis de vibração variam significativamente. Estas frequências são correlacionadas com fenômenos mecânicos característicos, tais como: rotação de eixos (desbalanceamento, desalinhamento), engrenamento, correias, ressonâncias etc. Ver figura 33.

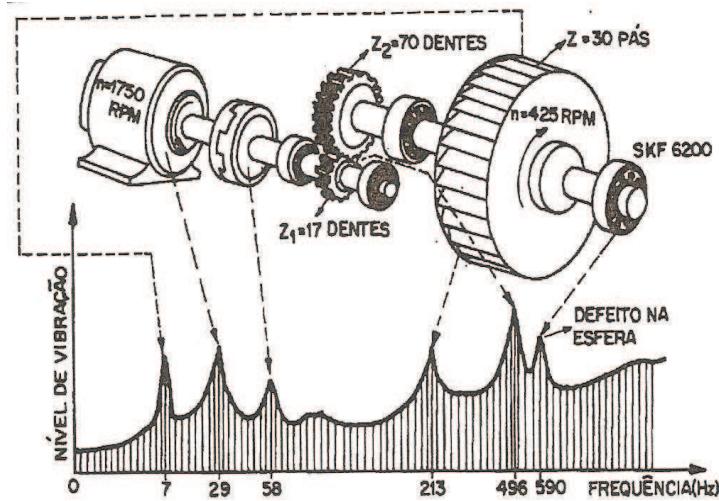


Figura 33 - Espectro de Vibrações Mostrando as Frequências Correlacionadas com Cada Parte da Máquina [2]

Depois de colhidas as informações das máquinas, o analista deverá acompanhar os níveis de vibração nos diversos componentes de frequência. Geralmente, os defeitos aparecerão em determinadas faixas dentro do espectro a ser analisado. Ver figura 34, mostrando de uma maneira geral as faixas e os respectivos defeitos.

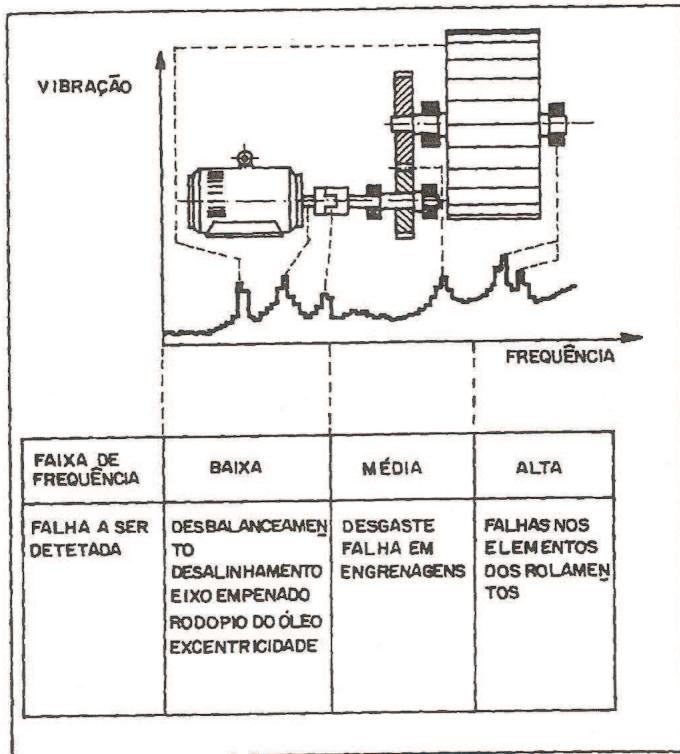


Figura 34 - Espectro Mostrando Diversas Faixas de Frequência e Defeitos Contidos em Cada Faixa [2]

4.3.5 Como medir vibração

Algumas considerações básicas devem estar presentes no momento em que se decide fazer a medição de vibração em uma máquina ou numa estrutura. Cada equipamento ou estrutura tem suas particularidades que devem ser levadas em consideração, de modo que as medições sejam adequadas para fornecer resultados confiáveis.

Em primeiro lugar alguns aspectos devem ser levados em consideração: qual é o tipo de máquina? Como é sua construção? Qual o propósito da medição? O que queremos “ver”? Qual a faixa de frequência?

Estas perguntas permitirão, primeiramente, que façamos a escolha correta do sensor a ser utilizado. O tipo de máquina e/ou como é sua construção particular são muito importantes para a definição de como medir.

Máquinas rotativas com conjunto rotativo leve e carcaças robustas e pesadas têm a maioria das forças geradas pelo rotor, como o movimento relativo entre o eixo e o mancal. Em outras palavras, a carcaça da máquina funciona como um grande amortecimento, e desse

modo a medição de vibração na carcaça não é adequada. Deve-se fazer medição, diretamente no eixo, com probes sem contato. Este é o caso típico de compressores centrífugos de alta pressão onde a relação de pesos entre a carcaça e o rotor é de 30:1 ou maior.

De modo oposto, se a máquina tem conjunto rotativo pesado, apoiado em mancais rígidos suportados em estrutura flexível, as forças geradas pelo rotor são dissipadas através da estrutura flexível, e desse modo a melhor maneira de medir é na carcaça. A máquina que melhor representa esse tipo são os ventiladores industriais, que têm uma carcaça e estrutura bastante leves, até porque as pressões desenvolvidas são extremamente baixas, e um conjunto rotativo bastante pesado.

Outro aspecto é a faixa de frequência de interesse, pois é sobre ela que serão feitas as medições. Ou seja, as medições de vibração serão feitas dentro de uma faixa de frequência de modo que se possa analisar as contribuições de cada valor típico de frequências para a vibração final. Isso nada mais é do que definir o ‘espectro’ de vibrações que é a ‘assinatura’ de valores de velocidade ou deslocamento para as diversas frequências, num dado momento.

Os valores de frequência, para os diversos tipos de sensores, estão mostrados a seguir:

Probe de deslocamento sem contato	Límite superior 2.000 Hz
Pick-up de velocidade	10 Hz a 1.500 Hz
Acelerômetros	Abaixo de 1 Hz até 50 kHz

Esses fatores são apenas alguns poucos e básicos nas considerações sobre a medição de vibração em equipamentos e estruturas. Para cada sensor e sistema a utilizar, uma série de detalhes deve ser observada de modo que as medições tenham confiabilidade necessária. O leitor deve consultar livros específicos sobre o assunto, catálogos de fabricantes e normas pertinentes, particularmente as do API e da ISO.

4.3.5.1 Medição de vibração no eixo

Usualmente os fabricantes desses sistemas fornecem a monitoração completa consistindo de:

- Medições de vibração por intermédio de probes instalados radialmente;

- Medição de deslocamento axial por intermédio de probes instalados axialmente, no disco de escora e/ou na ponta do eixo;
- Medição da fase e rotação através de um probe radial que ‘vê’ um rasgo praticado no eixo;
- Monitoração de temperatura dos mancais – radiais e de escora – através de RTDs;
- Proximitors – osciladores – demoduladores, que cada probe instalado;
- Cabos específicos para ligação probe-proximitor;
- Painel composto de fonte, indicador de vibração radial para cada mancal, indicador de deslocamento axial do eixo, rotação e temperatura de mancais.

4.3.5.2 Medição de vibração na carcaça

A medição de vibração na carcaça utiliza pick-ups de velocidade ou acelerômetros. Independente de o sensor estar conectado a um vibrômetro, a um analisador ou um coletor de dados, é importante observar o seguinte:

- As medições efetuadas na carcaça devem, sempre, ser feitas sobre um mesmo ponto de modo que haja compatibilidade entre os dados colhidos. A colocação do sensor em locais diferentes pode fornecer medidas desiguais.
- Os pontos recomendados para verificação da vibração são as caixas de mancais ou locais mais próximos possíveis destes. Escolher locais rígidos, de modo que a medição não seja influenciada pela vibração do elemento onde está se apoiando o sensor. Evite tampas com pequena espessura, parafusos e porcas.
- A fixação de *pick-up* pode ser feita como a recomendada para acelerômetros, ou seja, através do parafuso-estojos rosado na carcaça, ou por intermédio de base magnética, como mostrada na figura 36.
- Os acelerômetros devem ser fixados em furos de acordo com a recomendação do fabricante.

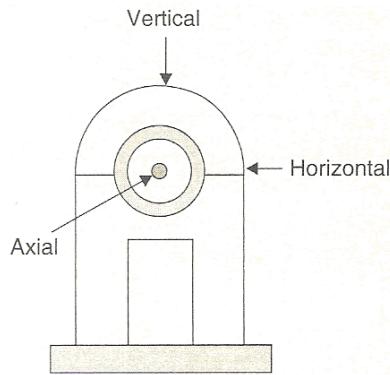


Figura 35 – Pontos de medição de vibração na carcaça da caixa de mancal [5]

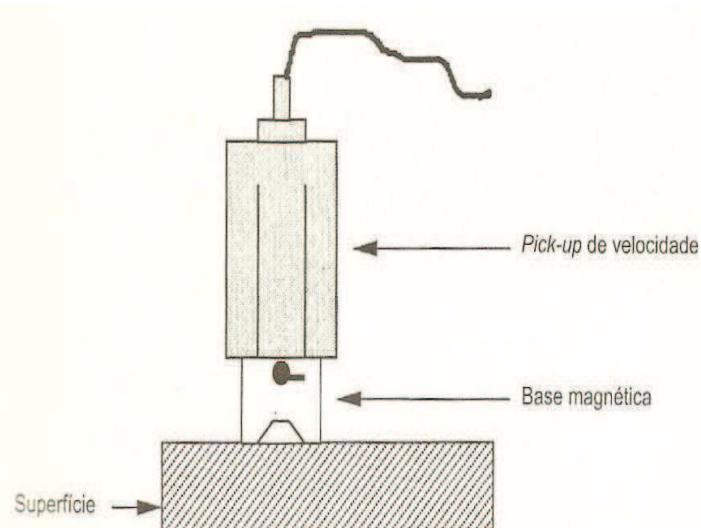


Figura 36 – Fixação do *pick-up* com base magnética [5]

4.3.6 Avaliações das vibrações

A avaliação das vibrações pode ser feita em dois níveis:

- **Medição de nível global:** determinação do estado geral de um equipamento. É a somatória do modo de vibração de todos os componentes, a partir dos valores de crista, pico a pico, eficaz e médio.
- **Análise de Espectros:** cada componente da máquina possui seu próprio trem de frequências. A estratificação das frequências elementares que compõem todo o sinal complexo permite a identificação de cada componente. Esta estratificação é normalmente feita por meio de tratamentos matemáticos. Os instrumentos atuais executam este trabalho automaticamente utilizando a Transformada Rápida de Fourier (FFT – Fast Fourier Transform).

4.3.6.1 Curvas de tendência

Como já visto, nível global de vibração é a somatória de todas as frequências de um determinado intervalo definido pelo usuário e assim, podem-se registrar estes valores ao longo do tempo através da curva de tendência.

A curva de tendência é utilizada para observação da evolução do nível global de vibração. Assim é possível verificar o comportamento vibratório da máquina ao longo das diversas inspeções.

4.3.6.2 Mapas Espectrais

O espectro de frequências é uma das técnicas mais comuns para a detecção e diagnósticos das avarias mais frequentes.

Os mapas espectrais são a conjugação de um conjunto de espectros que permitem verificar qual tem sido o comportamento do ponto em análise, ao longo das sucessivas inspeções e em condições idênticas de velocidade e rotação e carga.

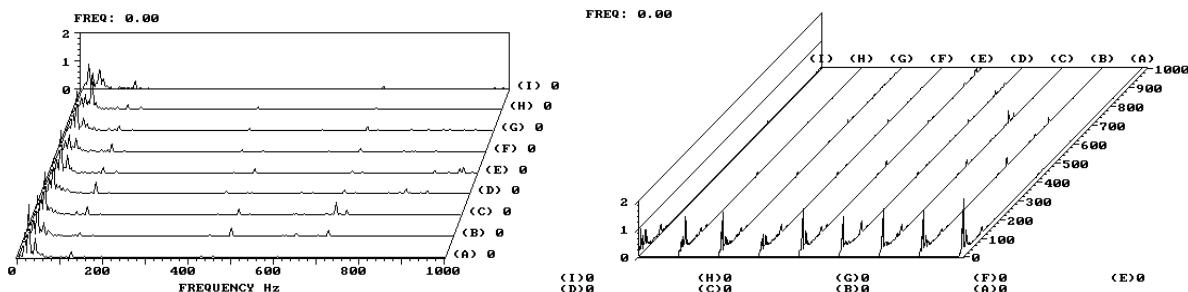


Figura 37 - Exemplos de Mapa Espectral [31]

4.3.6.3 Critérios de avaliação de condição

Para todos os pontos de medição, é registrado o nível global, que representa a composição de várias fontes de vibração. Estes níveis avaliados devem permanecer dentro de faixas admissíveis. A partir de uma tendência de evolução desses níveis de vibração, é feita uma análise de frequência para identificação da origem do problema.

As metodologias associadas à avaliação da condição de um equipamento envolvem um conjunto de procedimentos de onde se destaca:

- Comparação com normas internacionais ou recomendações do fabricante do equipamento.
- Comparações com leituras anteriores ou leituras consideradas padrão.
- Comparações estatísticas com a variação do nível global entre diversas inspeções (desvio-padrão) ou bandas de frequências pré-definidas.

O principal critério da avaliação de máquina rotativa em velocidade RMS é a norma ISO 2372 de 1974, tabela 3, que especificam limites que dependem somente da potência da máquina e do tipo de fundação. Indicações confiáveis das condições de uma máquina são baseadas na alteração das medidas relativas, isto é, a especificação de um espectro de referência, ou nível a acompanhar a sua evolução.

SEVERIDADE DA VIBRAÇÃO		Limites de vibração (Vel.) e classes das máquinas ISO - 2372				
Vrms/mm/s	CMVP10 rms mm/s CMVP20 eq. Pico in/s	Máquinas pequenas Classe I	Máquinas Médias Classe II	Máquinas grandes suporte rígido Classe III	suporte flexível Classe IV	Severidade
0.28	0.02					
0.45	0.03					
0.71	0.04					
1.12	0.06					
1.80	0.10					
2.80	0.16					
4.50	0.25					
7.10	0.39					
11.20	0.62					
18.00	1.00					
28.00	1.56					
45.00	2.50					
71.00	3.95					
BOM ESTADO						A
ALARME 1						B
ALARME 2						C
ALTO RISCO						D

Tabela 3 - Limites de Vibração Baseado na ISO 2372 [31]

4.3.7 Principais causas de vibração em máquinas

4.3.7.1 Desbalanceamento

É uma das fontes mais comuns de vibração em máquina rotativa. O desbalanceamento existe quando a distribuição de massas de um rotor não é uniforme em relação a um eixo de inércia.

Na maioria dos casos se detecta uma alta amplitude no espectro exatamente na frequência de rotação do equipamento, sendo que nas direções radiais a sensibilidade é maior. Como a amplitude de vibração é diretamente proporcional ao grau de desbalanceamento, se dobrar o valor da massa desbalanceadora, automaticamente também dobra a amplitude de vibração. Esse fato é importante, pois permite que a atividade de balanceamento de rotores seja possível, a partir de instrumento de vibração.

Outro fato importante para que se possa ter certeza se uma alta vibração é ou não provocada por um desbalanceamento, é o fato de que sua amplitude é diretamente proporcional ao quadrado da velocidade do rotor. Então quando se varia a rotação do mesmo até parar por completo, tem-se que obter uma curva de amplitude de vibração do tipo exponencial inversa.

O balanceamento pode ser feito de duas formas:

- **Estático:** neste tipo de balanceamento a compensação de massas é feita num mesmo plano. É comumente usado em rotores em forma de disco e rotores montados externamente aos seus dois mancais. No balanceamento estático a linha de centro do rotor e a linha de centro de rotação devem estar paralelas e excêntricas para que o equipamento esteja balanceado.
- **Dinâmico:** neste caso a compensação das massas é feita em planos distintos. A característica principal do balanceamento dinâmico é que a linha de centro do rotor não é paralela a linha de centro de rotação, podendo ou não interceptar-se. Existem dois tipos de equipamentos para este tipo de balanceamento: um deles é instalado em oficinas onde o rotor é balanceado fora do conjunto; o outro é portátil e próprio para execução desse trabalho em campo, onde as máquinas encontram-se instaladas, evitando a necessidade de desmontá-las, deixando um residual mínimo (Rezende, 1987 apud Fabiano Vieira [43]).

A figura 38 apresenta um exemplo prático de um espectro mostrando um caso de desbalanceamento. Nela pode-se verificar uma alta amplitude de vibração exatamente na frequência de rotação do equipamento.

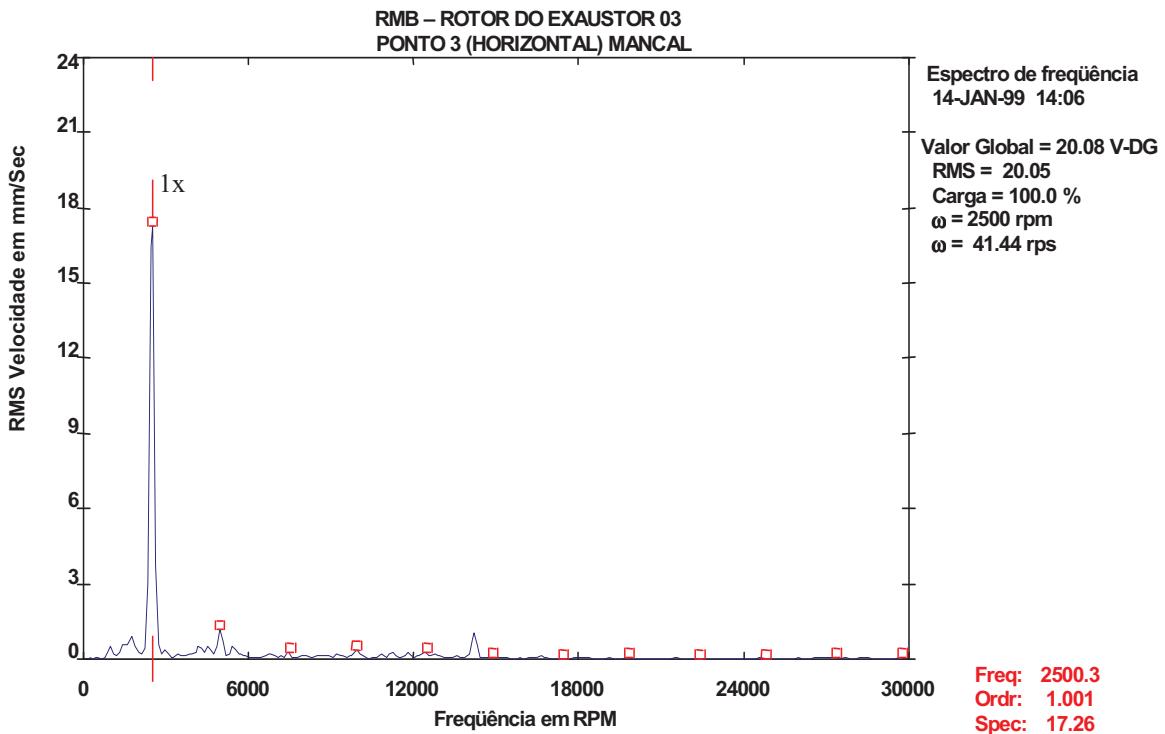


Figura 38 - Espectro Mostrando Caso de Desbalanceamento no Rotor de um Exaustor [43]

4.3.7.2 Desalinhamento

O desalinhamento é outra grande causa de desgastes prematuros nos componentes das máquinas. Fisicamente corresponde a não linearidade nas linhas de centro de giro de dois eixos acoplados. Então podemos detectar alta vibração na frequência de rotação do equipamento e suas harmônicas, evidenciando o tipo de desalinhamento: angular e/ou paralelo.

- **Desalinhamento angular:** as linhas de centro dos eixos formam um ângulo e se interceptam, figura 39. Esse tipo de desalinhamento se caracteriza por apresentar alta vibração axial na rotação do eixo, como também apresentar altas vibrações nas frequências múltiplas (1X RPM, 2X RPM etc.).

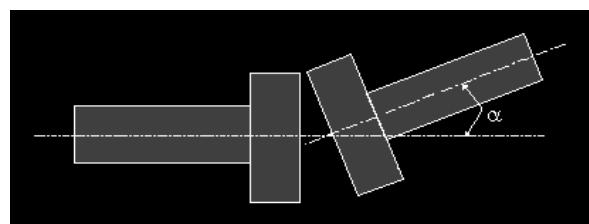


Figura 39 - Esquema de Desalinhamento Angular, Mostrando Dois eixos que se Interceptam Formando um Ângulo [43]

A figura 40 ilustra um exemplo de um espectro, mostrando o ‘*time history*’ de um ponto axial de um motor elétrico, enfatizando os picos de frequência harmônicos da rotação do motor.

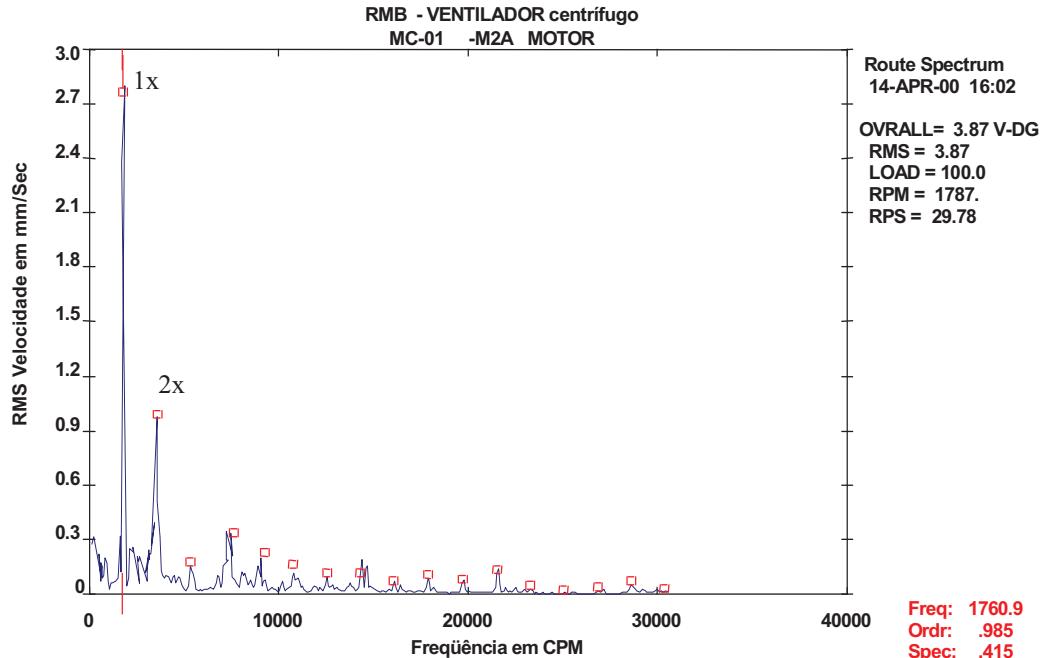


Figura 40 – Espectro Mostrando um Caso de Desbalanceamento Angular entre Dois Eixos Acoplados [43]

- **Desalinhamento paralelo:** neste caso as linhas de centro são paralelas e não se interceptam, figura 41. A vibração dominante aparece na direção radial a 2X frequência de rotação do eixo, sendo que na direção axial poderá apresentar alta vibração exatamente na frequência de rotação, figura 42.

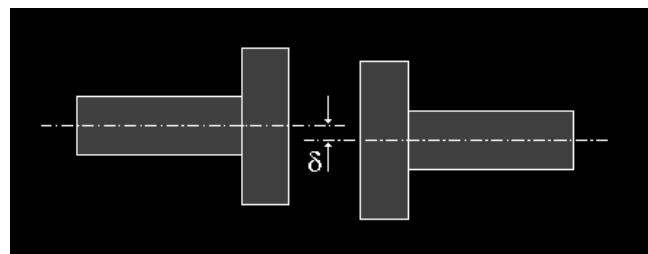


Figura 41 - Esquema de Desalinhamento Paralelo [43]

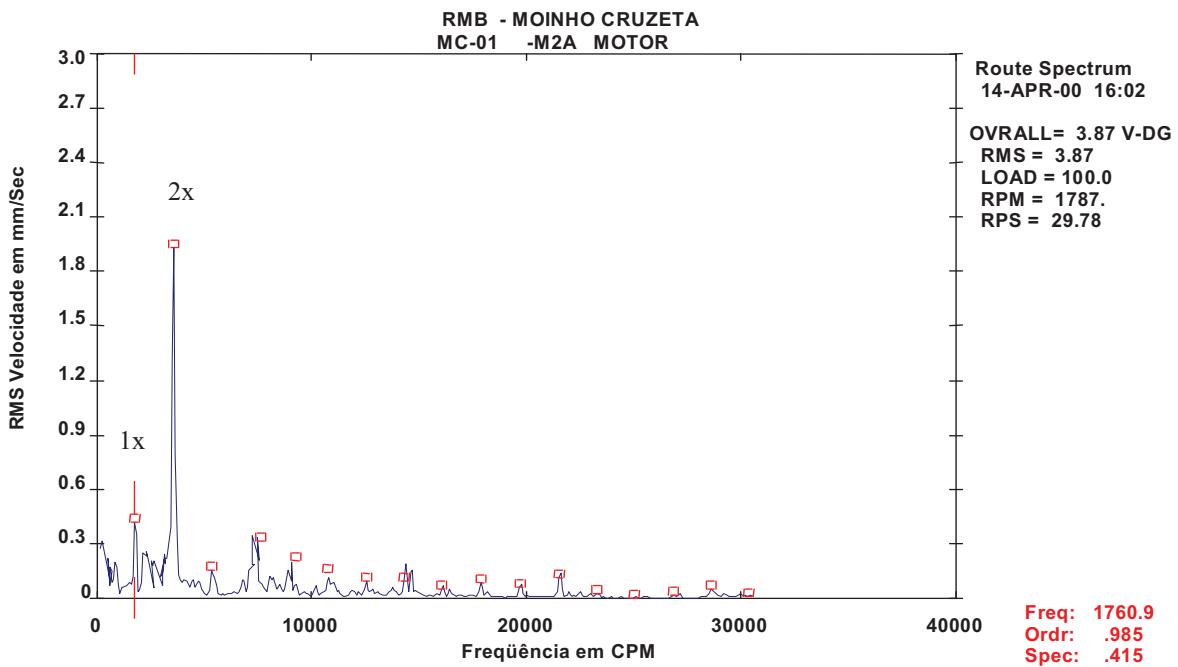


Figura 42 – Espectro Mostrando um Caso de Desbalanceamento Paralelo entre Dois Eixos Acoplados [43]

4.3.7.3 Excentricidade

A excentricidade é outra fonte comum de vibração em máquinas. A excentricidade significa que a linha de centro do eixo (em rotação) não é a mesma linha de centro geométrico do rotor. A excentricidade, embora seja uma fonte de desbalanceamento, dá origem a forças reativas que não podem ser corrigidas por um simples balanceamento de massa.

Por exemplo, no caso da figura 43, a maior vibração acontecerá evidentemente na frequência de rotação da polia excêntrica, ou seja, 1x N1. A direção predominante da força de excitação será na direção da linha de centro das duas polias. Comparativamente, as leituras de fases nas direções horizontais e vertical normalmente diferem-se entre si de 0° ou 180° . Tentando balancear o rotor excêntrico, frequentemente consegue-se reduzir a vibração em uma direção, porém haverá um aumento no outra direção radial (dependendo do grau de severidade).

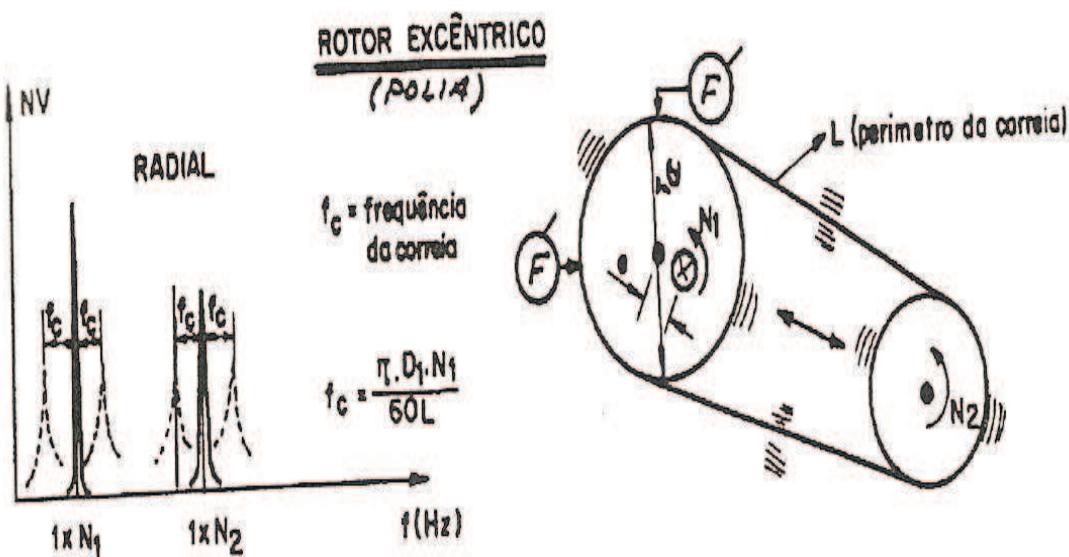


Figura 43 – Excentricidade de Polias [2]

Portanto, a excentricidade da polia com correias, resultará na direção da correia tencionada, em uma frequência igual a 1X RPM da polia excêntrica. A vibração tem o mesmo aspecto de desbalanceamento, e não será corrigida com a aplicação de pesos corretivos (balanceamento).

A figura 44 mostra várias possibilidades de ocorrência excentricidades. Cada uma delas tem aspectos característicos que serão detalhados a seguir.

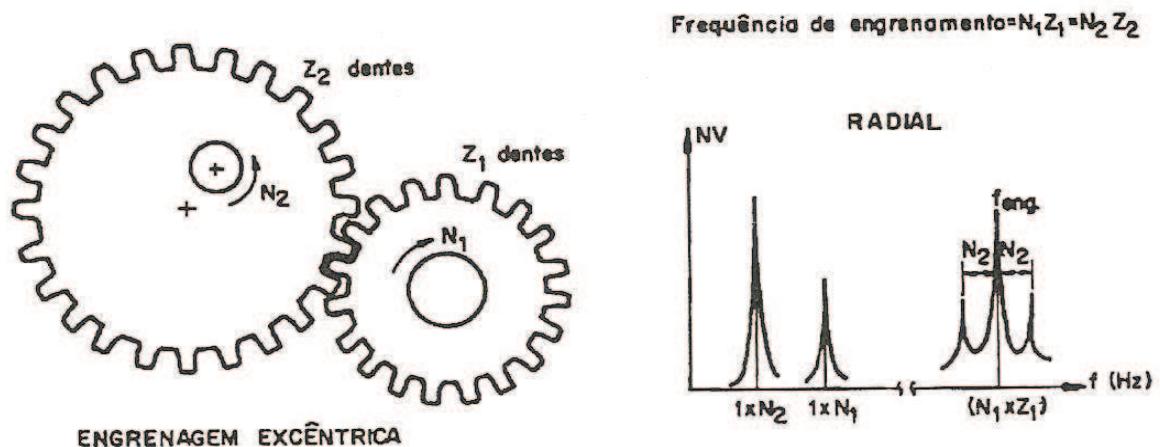
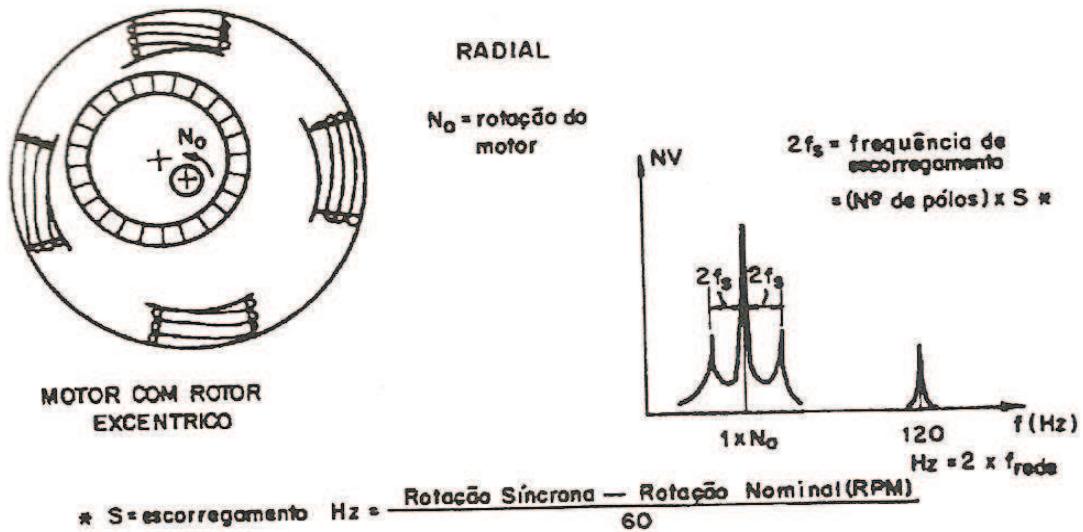


Figura 44 – Engrenagem e Rotor de Motor Elétrico Excêntricos [2]

Uma engrenagem excêntrica produz forças reativas por causa da ação tipo *cam* sobre o engrenamento. A maior vibração ocorrerá na direção da linha que passa pelos centros das duas engrenagens, em frequência natural igual a 1X RPM da engrenagem excêntrica, como o mesmo aspecto de um desbalanceamento. Neste caso também haverá vibração em amplitude modulada, onde a portadora será a frequência de engrenamento (números de dentes x rotação) e a moduladora será a rotação da engrenagem excêntrica, figura 44.

No caso de motores elétricos, a excentricidade do rotor provocará variações na atração magnética entre o rotor excêntrico e os pólos do estator causando uma força em 1X RPM entre o rotor e o estator. Aumentando a carga no motor, o campo magnético é intensificado e com isto o nível de vibração também aumenta.

Para checar a condição de excentricidade, basta medir a vibração em banda larga com o motor sob carga, desligar a alimentação elétrica e observar como se comporta a amplitude de vibração. Se a amplitude diminuir gradualmente enquanto o motor desacelera, o problema é mecânico, talvez desbalanceamento. Porém, se a amplitude de vibração diminuir bruscamente a partir do instante do corte de energia, o problema é elétrico e possivelmente devido à excentricidade do rotor dentro do estator.

Em ventiladores, sopradores, bombas e compressores, rotores excêntricos geram forças que provocam vibrações. Nestes casos, as forças dinâmicas são diferentes daquelas aerodinâmicas e hidráulicas, que ocorrem dentro dos rotores. As forças devido às excentricidades são maiores no lado alto do rotor criando vibrações análogas ao desbalanceamento de massa. Para ventiladores, sopradores, bombas e compressores não há um teste eficaz para detectar a excentricidade. Normalmente é tentado um balanceamento. Se o resultado não for bom ou for necessário aplicar massas corretivas muito grandes, então se deve inspecionar a excentricidade do rotor em relação ao eixo.

4.3.7.4 Ressonância

A ressonância ocorre quando a frequência de excitação coincide com uma das frequências naturais da máquina. A frequência natural é definida como aquela na qual uma determinada massa vibra, após sofrer um deslocamento do seu ponto de equilíbrio.

Há várias maneiras de corrigir um problema de ressonância. Uma delas é variar a frequência da força excitadora de modo a afastá-la das frequências naturais da estrutura da máquina. Isto pode ser feito variando a RPM da máquina.

Se a força de excitação não pode ser variada, o problema poderá ser corrigido alterando a frequência natural da estrutura, isto é feito alterando a rigidez ou a massa do sistema. Aumentar a quantidade de amortecimento do sistema reduz as amplitudes da vibração, porém não resolve o problema.

É possível determinar as frequências naturais de uma estrutura por meio de teste de impactos. A idéia do teste é a de que quando um objeto sofre um impacto, as frequências naturais ou ressonantes são excitadas. Se um espectro é levantado enquanto o objeto está

vibrando devido ao impacto, picos espectrais aparecem definindo as frequências naturais do objeto.

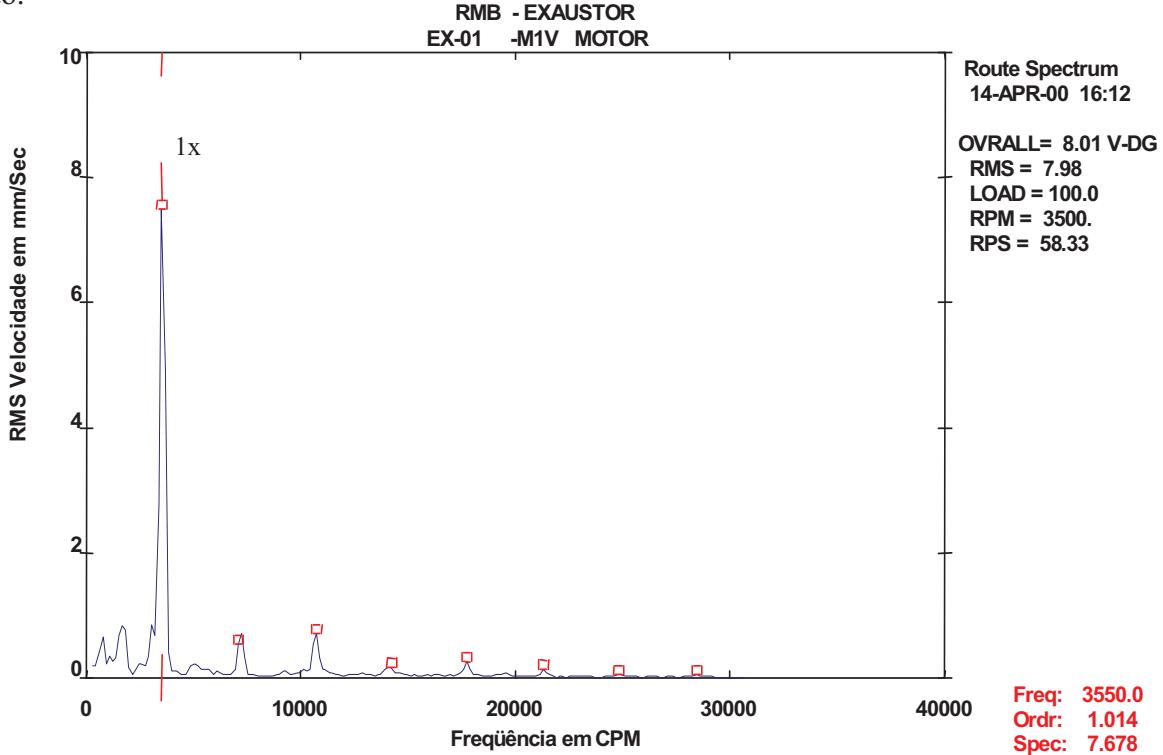


Figura 45 – Espectro Mostrando um Caso de Ressonância Estrutural, que se torna evidente devido ocorrer alta vibração apenas na radial [43]

4.3.7.5 Folgas mecânicas

As folgas mecânicas causam vibrações geralmente em frequências múltiplas e pares da rotação do eixo e também de altas ordens (vibrações 1x RPM, 2x RPM, 3x RPM etc.), figura 46. A característica mais importante é o aumento da vibração na direção de fixação, quase sempre na vertical, seguida do aparecimento de uma vibração em 1/2x RPM. As folgas mecânicas podem ser classificadas em três tipos:

- **Tipo A:** estas são folgas estruturais ou falta rigidez na fundação, na placa de base ou no pé da máquina. Também as distorções de base e pedestais, folgas nos chumbadores ou recalque do solo. As vibrações verticais no pé da máquina e na base são defasadas de 180°.
- **Tipo B:** são folgas devido a parafusos frouxos, trincas nos pedestais ou no próprio mancal, figura 47.
- **Tipo C:** são folgas geradas por fixação inadequada entre as partes da máquina. Com ação das forças dinâmicas do rotor surgem efeitos não lineares, alterando periodicamente a rigidez do sistema. Assim, as vibrações terão características idênticas ao batimento truncado. Aparecerão componentes sub-harmônicas e inter-

harmônicas. Também são deste grupo as folgas entre a bucha e a capa do mancal, entre o anel interno do rolamento e o eixo, ou entre o anel externo e a capa do mancal. As medidas de fase são geralmente instáveis, e podem variar bastante de um ponto de medida para outro.

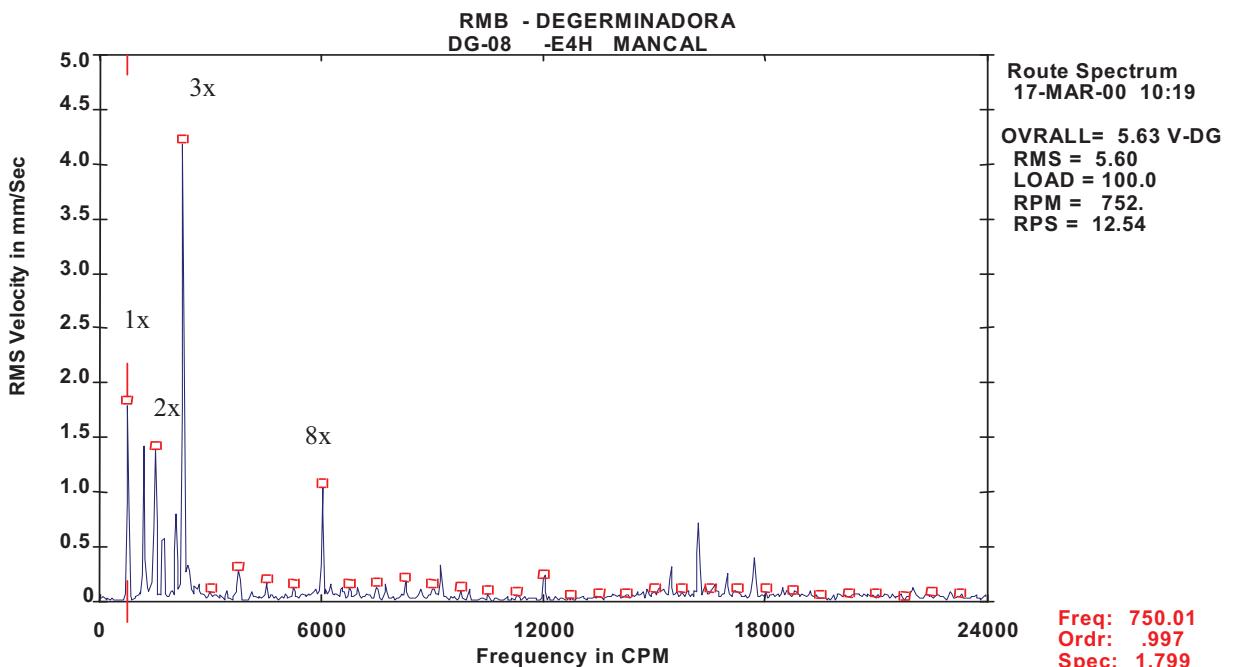


Figura 46 – Espectro Característico de Folga Mecânica no Mancal do Equipamento, evidenciando os vários picos harmônicos [43]

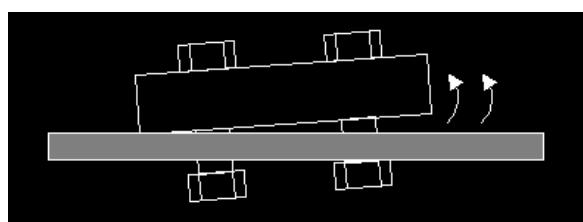


Figura 47 – Desenho Esquemático de uma Base com Parafusos Folgados gerando Folga – Tipo B [43]

4.3.7.6 Defeitos em rolamentos

Mancais de rolamentos com defeitos sobre pistas, esferas ou rolos, usualmente causam vibrações em altas frequências. Estas frequências são várias vezes a velocidade de rotação do eixo, porém não um múltiplo inteiro desta rotação.

A razão para as altas frequências e as instabilidades ocasionadas normalmente encontradas em mancais de rolamentos defeituosos, pode ser explicada, analisando a natureza das forças de excitação geradas pelos elementos do rolamento.

Por exemplo, considere a vibração gerada por um rolamento com um defeito localizado em uma esfera. Quando a esfera rola, o defeito entra sequencialmente em contato com as pistas interna e externa, resultando uma vibração com frequência duas vezes a frequência de giro da esfera em torno do seu centro (spin). Como a rotação (spin) da esfera é muito maior que a rotação do eixo de montagem do rolamento, a vibração resultante terá alta frequência quando comparada com a frequência de rotação deste eixo. A amplitude da vibração dependerá da extensão da falha no rolamento. Já os defeitos na gaiola do rolamento, gerarão vibrações em frequências bem mais baixas do que aquelas correspondentes aos defeitos das esferas, e das pistas interna ou externa.

Os impactos dos elementos rolantes defeituosos com as pistas, podem também excitar vibrações bem parecidas com aquelas que aparecem quando batemos em um sino ou campainha. Ou seja, aparecem no espectro frequências naturais inerentes aos elementos do rolamento ou mesmo da carcaça do mancal.

1. Frequências típicas de defeitos

Um rolamento novo e perfeito praticamente não apresenta vibrações. Ao longo da vida do rolamento vão surgindo desgastes e com eles as vibrações nas frequências típicas de cada um dos elementos internos do rolamento. Com as técnicas atuais é possível verificar a extensão e a causa da deterioração de rolamentos, tais como: defeitos de fabricação, desgastes, lubrificação deficiente, manuseio ou operação inadequada do rolamento, acompanhando os níveis de vibração nos componentes das frequências correspondentes aos defeitos.

O primeiro passo é apresentar as partes básicas constituintes de rolamentos na figura 48.

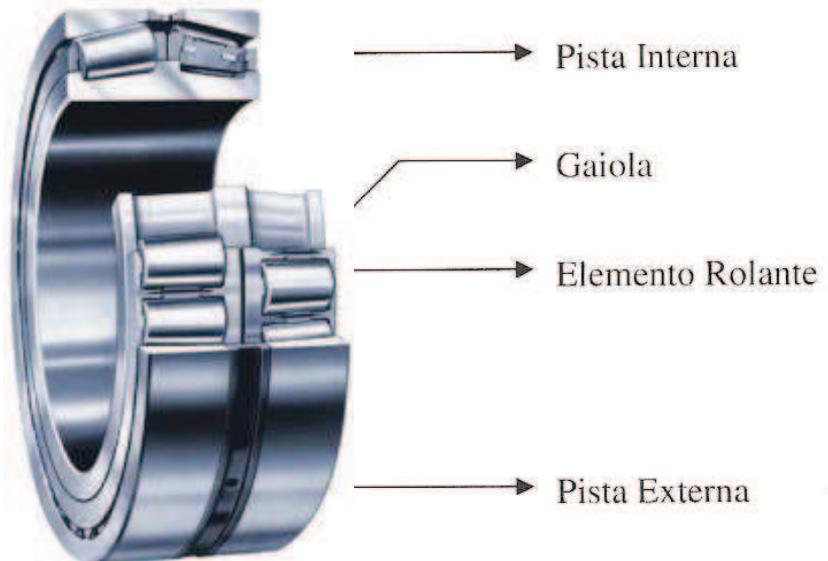


Figura 48 - Partes Constituintes de Rolamentos [23]

A terminologia dos elementos da figura 48 dados por:

- Frequência de rotação do motor (Fr).
- Frequência da pista externa do rolamento (BPFO).
- Frequência da pista interna do rolamento (BPFI).
- Frequência do elemento rolante (BSF).
- Frequência da gaiola (FTF).

Para determinar as frequências típicas dos rolamentos, é necessário conhecer as dimensões internas mostradas na figura 49, que são:

β = ângulo de contato do elemento rolante com a gaiola;

BD = Diâmetro do elemento rolante;

PD = Diâmetro primitivo do rolamento.

f_o – frequência de rotação da pista interna (eixo), se a pista externa estiver fixa.

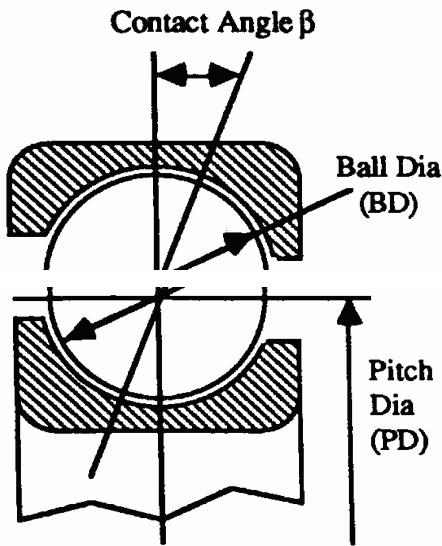


Figura 49 - Dimensões Comuns em Rolamentos [7]

Assim, Bonaldi [7] traz também as fórmulas que fornecem as frequências características do rolamento, que caracterizam os padrões de falha:

$$f_{BPFO} = \frac{n}{2} f_1 \left(1 - \frac{BD}{PD} \cos \beta \right)$$

$$f_{BPFI} = \frac{n}{2} f_1 \left(1 + \frac{BD}{PD} \cos \beta \right)$$

$$f_{BSF} = \frac{PD}{BD} f_1 \left(1 - \left(\frac{BD}{PD} \cos \beta \right)^2 \right)$$

$$f_{BPFO} = \frac{f_1}{2} \left(1 - \frac{BD}{PD} \cos \beta \right)$$

Tendo-se em vista que f_1 é a frequência de rotação do sistema, podem-se ver pelas fórmulas acima, que as frequências associadas aos rolamentos são múltiplas diretas da fundamental e dependente das dimensões dos rolamentos. As frequências, além da frequência de rotação, devem ser encontradas, portanto com o auxílio de catálogos e softwares específicos dos fabricantes de rolamentos.

A evolução dos defeitos nos rolamentos pode ser dividida em quatro etapas, descritas a seguir e ilustradas na figura 50.

- **Estágio 1:** os primeiros sinais aparecem em frequências ultra-sônicas – 20 a 60 kHz. Os sinais nestas frequências podem ser avaliados por envelope de aceleração.

- **Estágio 2:** com o surgimento de pequenos defeitos, ocorrem impactos nos elementos internos do rolamento excitando frequências naturais na faixa de 500 a 2.000 Hz. No espectro, as frequências naturais aparecem acompanhadas de bandas laterais. O valor do envelope de aceleração cresce.
- **Estágio 3:** as frequências fundamentais de defeitos e/ou suas harmônicas começam a aparecer no espectro. Com o aumento do desgaste, cresce o número de harmônicas e de bandas laterais, tanto em torno das frequências naturais como em torno das frequências de defeitos. Os valores de envelope de aceleração continuam a crescer. O desgaste é agora visível e quando se estender por toda pista do rolamento, existirão muitas bandas laterais com grandes amplitudes. Neste estágio, o rolamento deve ser substituído.
- **Estágio 4:** já tendendo ao colapso, a amplitude em 1x RPM cresce muito e com ela, as muitas harmônicas da rotação do eixo. Neste estágio, os componentes correspondentes as frequências naturais começam a desaparecer e são substituídos por uma faixa larga de frequências correspondentes a vibração aleatória.

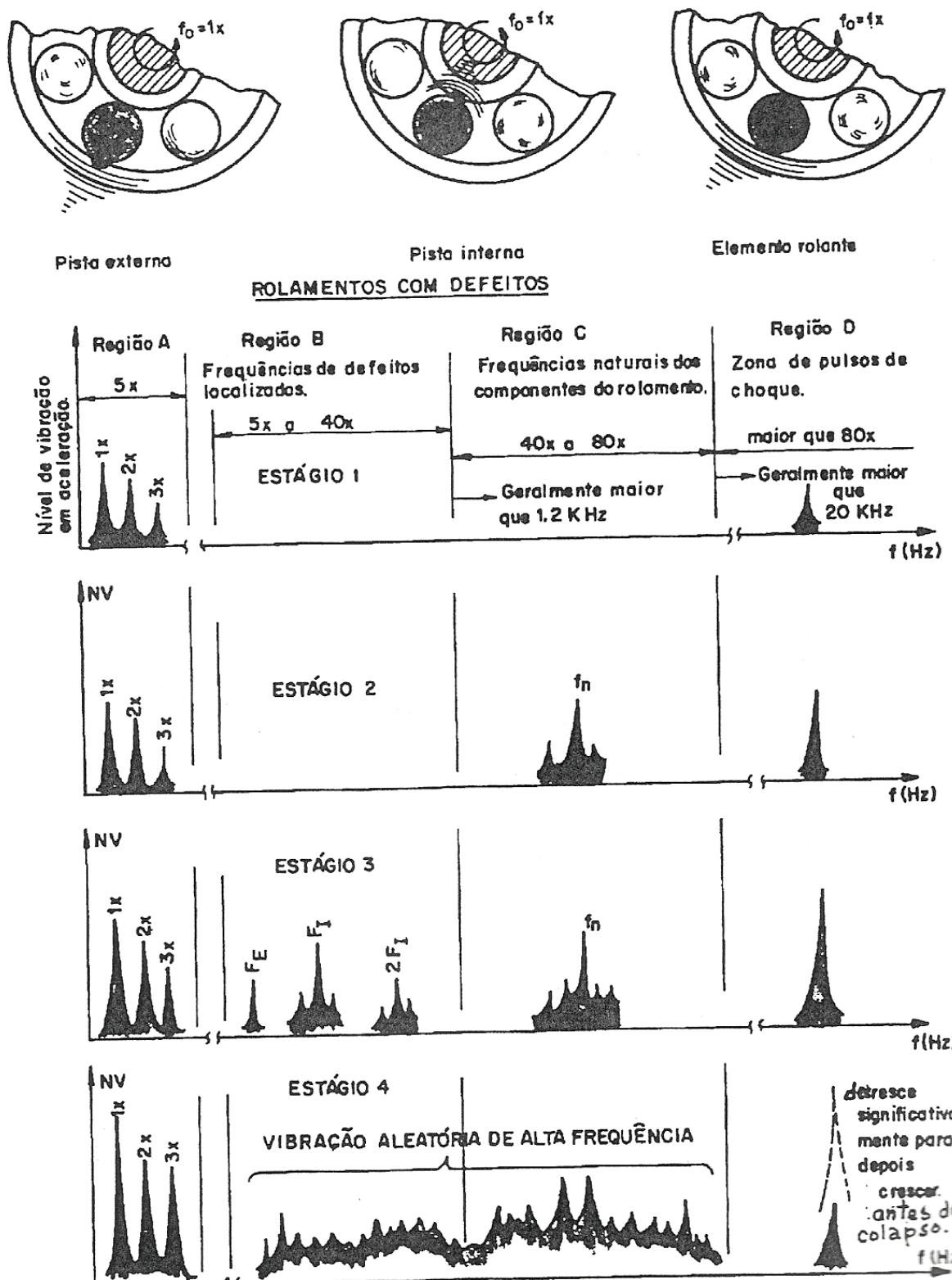


Figura 50 – Espectros de Vibração de um Mancal de Rolamento com Falha – 4º estágio de falha [2]

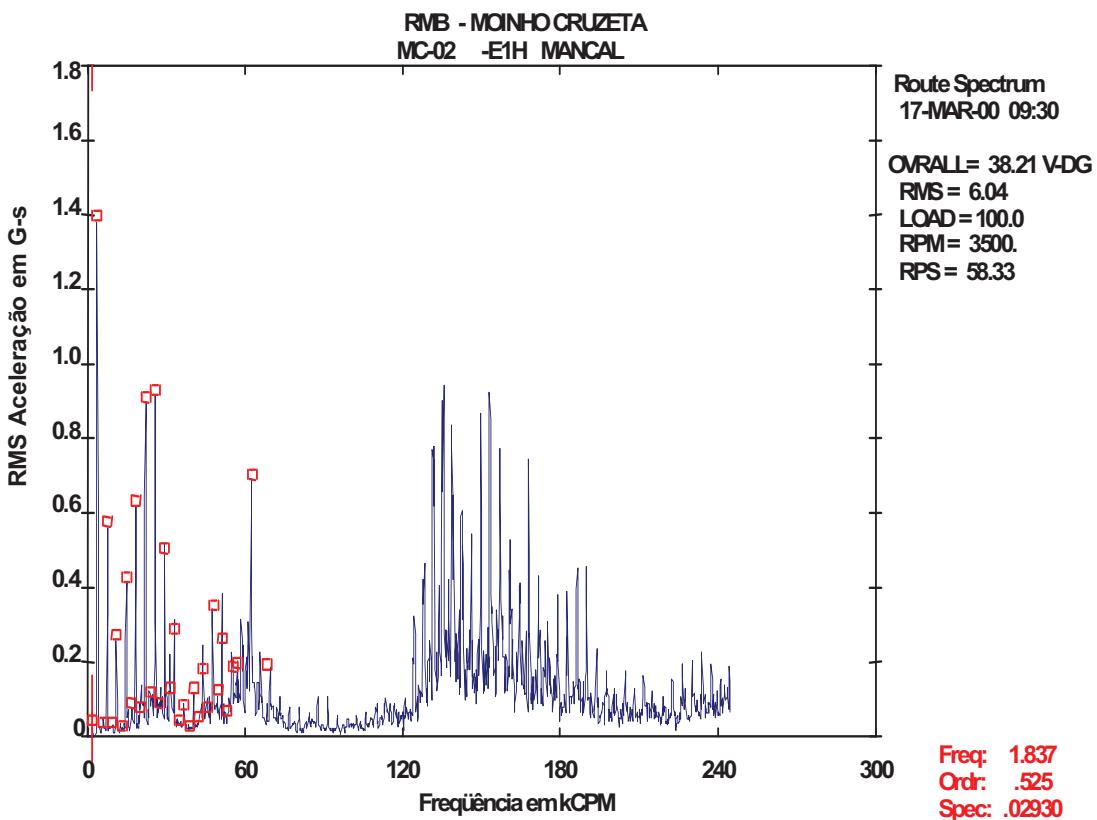


Figura 51 – Espectro Característico de Falha de Rolamento, evidenciando os picos harmônicos da frequência [43]

4.3.7.7 Falha de engrenamento

As vibrações produzidas nos dentes de engrenagens, devido a imperfeições de contato ou ações dinâmicas associadas, produzem frequências múltiplas da fundamental, que é dada como sendo a frequência de rotação do eixo vezes o número de dentes das engrenagens, ainda podendo surgir no espectro frequências harmônicas da rotação (Coelho & Hansen 1993 apud Fabiano Vieira [43]).

Os problemas de vibrações em engrenagens são identificados por sua frequência característica: número de dentes vezes a rotação da engrenagem defeituosa. Quando o arranjo de engrenagens é complexo, com presença de várias frequências de engrenamento, é bom esquematizar o arranjo e testar todos os produtos a fim de identificar onde está o problema.

Os problemas relacionados com a frequência de engrenamento incluem: desgaste excessivo dos dentes, dentes sem precisão, falhas localizadas nos dentes, material estranho entre os dentes, etc.

Também as outras vibrações da máquina, tais como: desalinhamento ou eixo empenado, influem no nível de vibração no componente correspondente à frequência de engrenamento, bem como suas respectivas harmônicas.

De uma maneira geral, as principais irregularidades em engrenagens, referem-se às seguintes causas: engrenamento inadequado entre os dentes das engrenagens paralelas; irregularidades localizadas: trincas ou fissuras nos dentes, rebarbas nos dentes, dentes quebrados ou machucados; engrenagens excêntricas ou com erro no módulo; desalinhamento entre engrenagens.

Nos complexos industriais de porte, com máquinas de grande responsabilidade, importantes à produção e com significativo custo de manutenção, a equipe de inspeção deve medir o nível de vibração na frequência de engrenamento, que geralmente indica desgaste, e construir uma curva de tendência do redutor. Medindo nas mesmas condições de carga, uma evolução nesta curva significa aumento de desgaste.

De posse da curva de tendência, a equipe de manutenção preditiva, tem elementos para identificar as falhas em uma ou mais engrenagens, programar paradas e providenciar os reparos ou substituições necessárias.

Às vezes o que é mais importante é o percentual do aumento do nível de vibração com relação ao valor de referência, e não o valor absoluto do nível. Por isso, fica difícil estabelecer normas ou critérios de severidades (ou níveis de alarme) para sistemas com engrenagens. Cada caso deve ser acompanhado e analisado. Somente assim poderemos estabelecer níveis de alarme e atenção para cada redutor.

O parâmetro para identificar problemas de engrenamento é aceleração e a modulação pode ser confirmada através de Envelope. Para identificar qual eixo contém a engrenagem com defeito (pinhão ou engrenagem), observa-se a modulação, por meio de bandas laterais em torno da frequência de engrenamento.

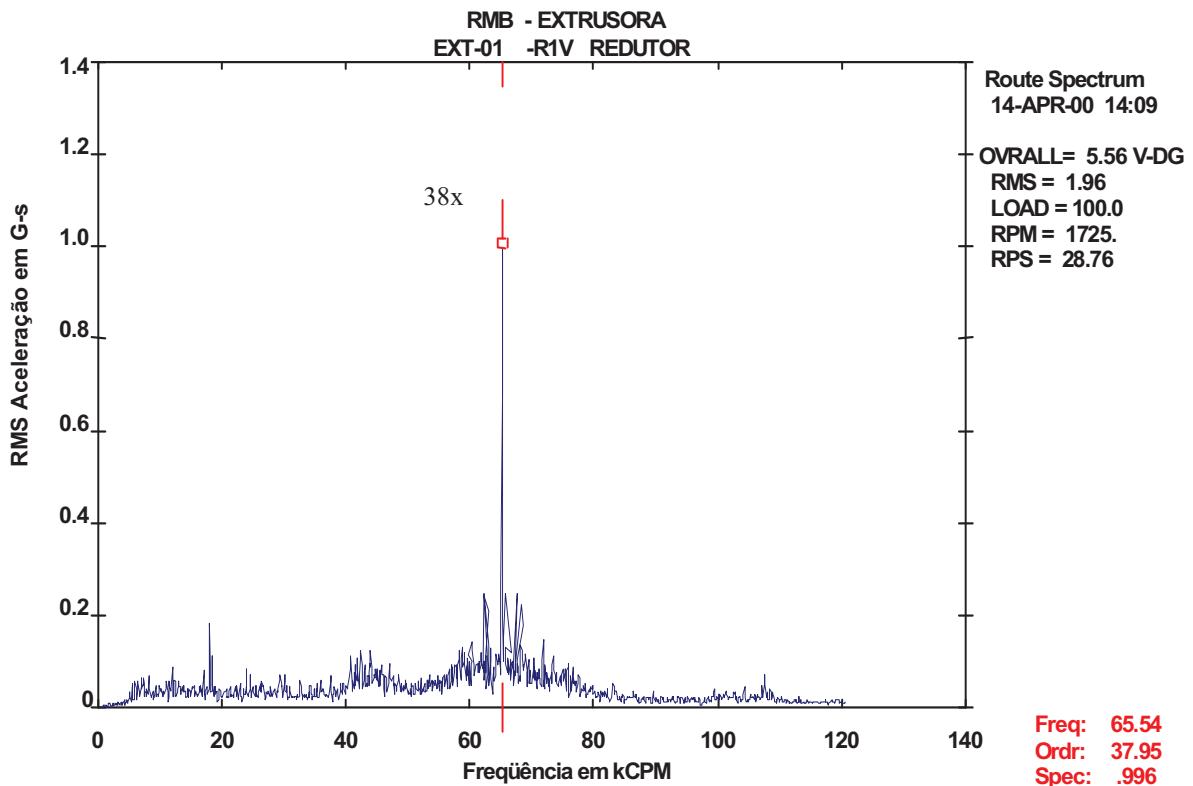


Figura 52 – Espectro Característico de Falha de Engrenamento, evidenciando o pico de nível maior correspondente ao de 38 vezes a rotação de seu eixo, que também corresponde ao número total de dentes da engrenagem menor do redutor de velocidade [43]

1. Frequências típicas de defeitos e modulações

É muito importante observar que uma engrenagem sempre apresenta vibrações. O importante é verificar as frequências de engrenagens e como os níveis nestas frequências variam com o funcionamento normal da máquina.

Quando uma engrenagem apresenta dentes irregulares, seja devido ao desgaste não uniforme, seja por erro de usinagem ou de desalinhamento de montagem, a amplitude na frequência de engrenamento aumenta. A figura 53 ilustra a variação temporal nesta frequência de engrenamento acarretada pelos dentes desgastados ou com *pitting*.

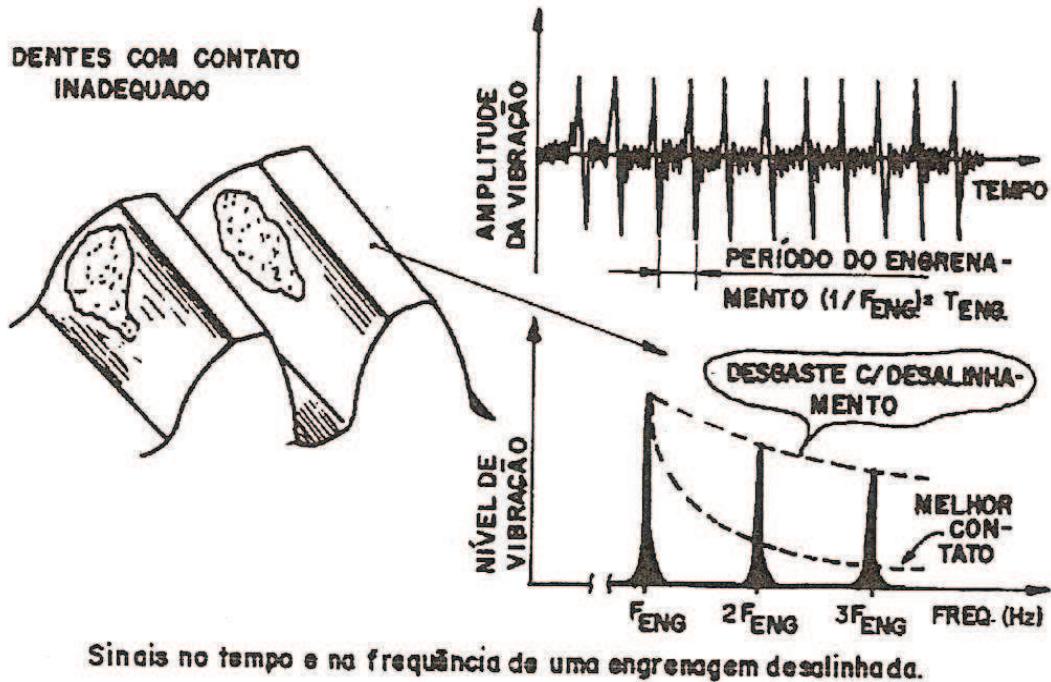
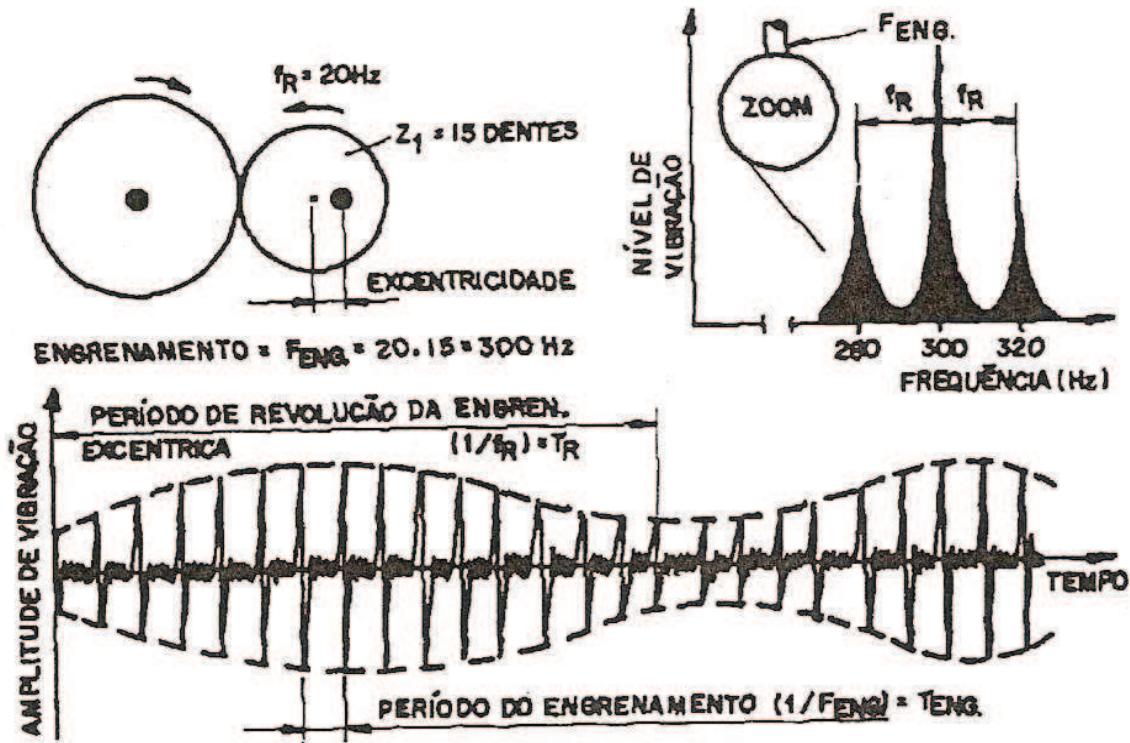


Figura 53 – Espectro de uma Engrenagem com Desalinhamento ou Desgaste Parcial [2]

É muito comum a usinagem de engrenagens com excentricidade entre o eixo e o centro geométrico da engrenagem. No caso das duas engrenagens operaram excentricamente, a força de contato entre os dentes variará conforme o grau de excentricidade, gerando vibrações com amplitude variando regularmente com a rotação das engrenagens. Quando uma das engrenagens tem um erro de passo, as vibrações geradas são semelhantes. Esta característica de variação de amplitude com a rotação é o caso típico de **amplitude modulada**. O ruído gerado pelas engrenagens indica claramente esta forma de modulação. A figura 54 mostra este caso.



Sinais no tempo e na frequência de um engrenamento excêntrico.

Figura 54 – Modulação em AM – Engrenagem Excêntrica [2]

Sistemas com engrenagens têm assinaturas de vibração com características que indicam tanto o funcionamento normal quanto o anormal. A característica de assinatura de vibração de um redutor deve ser feita com bastante cuidado, pois esta análise é uma poderosa ferramenta na diagnose de problemas, figura 55. As principais dificuldades em obter estas assinaturas são:

- Muitas vezes os trens de engrenagens situam-se dentro da máquina dificultando ou até impedindo a instalação do acelerômetro em um bom ponto de medida, que capte com clareza os sinais emitidos por estas engrenagens.
- As várias fontes de vibrações em sistemas com muitas engrenagens geram uma complexa combinação de frequências de engrenamento, modulações e frequências de rotação dos eixos. Neste caso, um instrumento com zoom ajudará bastante.

Uma vibração severa em redutor pode ser causada por ressonâncias de eixos ou da carcaça do conjunto. Elas podem ser excitadas tanto pelas pequenas flutuações periódicas da

velocidade tangencial no raio primitivo (que causam variações na rotação gerando vibrações com **frequência modulada** - FM) como pelas imperfeições nos dentes das engrenagens.

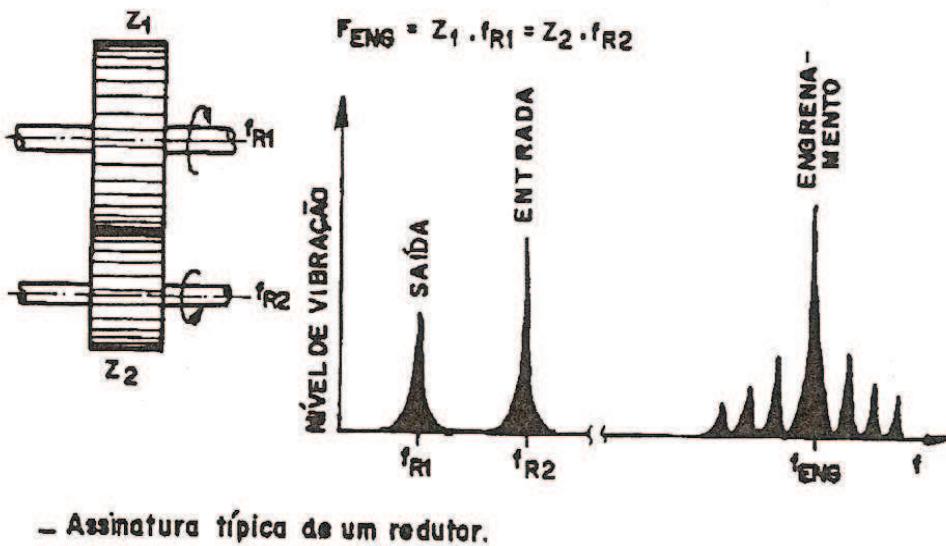


Figura 55 – Espectro Típico de um Redutor com a Engrenagem com Dentes Desgastados (Modulação em FM) [2]

Máquinas mais complexas possuem muitas frequências naturais dentro de seus intervalos de operação. Na ressonância, as excitações cíclicas podem causar grandes vibrações e tensões. O torque forçante gerado pelas imperfeições das engrenagens é normalmente pequeno, mas em condições resonantes, a amplitude torcional cresce e é limitada somente pelo amortecimento inerente ao modo de vibração do conjunto. Normalmente o amortecimento em redutores é pequeno e as engrenagens excitadas geram grandes níveis de vibração e ruído.

Outro fato importante em sistemas com engrenagens é que eles possuem suas cargas normais de serviço, mas as cargas de desbalanceamento, de desalinhamento, distorções térmicas etc., que atuam nas condições de operação do conjunto. As direções e intensidades destas forças variam dependendo dos tipos das engrenagens e da geometria da carcaça que abriga o trem.

A figura 56 mostra este e uma série de possíveis defeitos em engrenagens e seus espectros típicos. Os principais espectros típicos de defeitos são: pinhão excêntricos / folgas excessivas, pinhão com dente quebrado, pinhão e coroa com dentes quebrados, engrenagens

montadas em eixos desalinhados, engrenamento com mancal roçando e desgaste em parafuso sem-fim com coroa helicoidal.

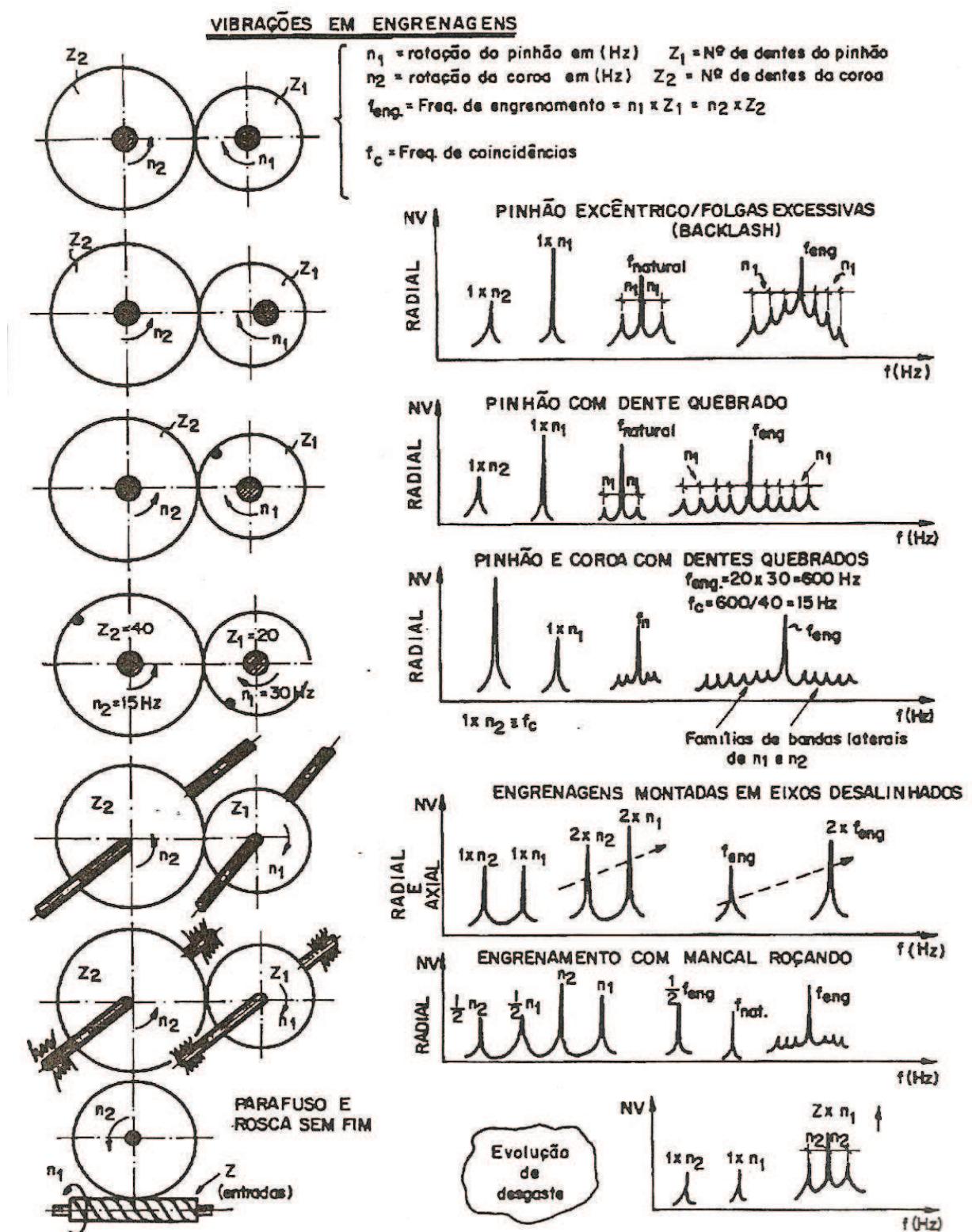


Figura 56 – Tabela de Diagnósticos para Engrenagens [2]

4.3.7.8 Altas vibrações devido ao fluxo hidrodinâmico

Bombas, turbinas, compressores, ventiladores e outras máquinas de fluxo apresentam vibrações e ruídos devido às reações do fluxo nas partes fixas e móveis da máquina. Estas vibrações podem se apresentar de duas maneiras, figura 57:

- Em componente discreta na frequência de passagem (número de pás do rotor vezes a rotação do rotor, ou com a frequência de interação das pás do rotor com as pás diretrizes).
- Com energia vibratória espalhada na região de alta frequência provocada por cavitação, recirculação e turbulência do fluxo, fenômenos aleatórios que podem ter valores estatísticos estáveis no tempo e que geram vibrações de características parecidas.

As vibrações aerodinâmicas e hidráulicas raramente geram problemas sérios, exceto quando excitam, ou até mesmo ressonam as partes da estrutura: carcaça, tubulações, pás etc. Quando as forças hidráulicas ou aerodinâmicas geram vibrações excessivas sem ressonância aparente no sistema, o problema pode estar no projeto inadequado do conjunto rotor estator pás ou da tubulação.

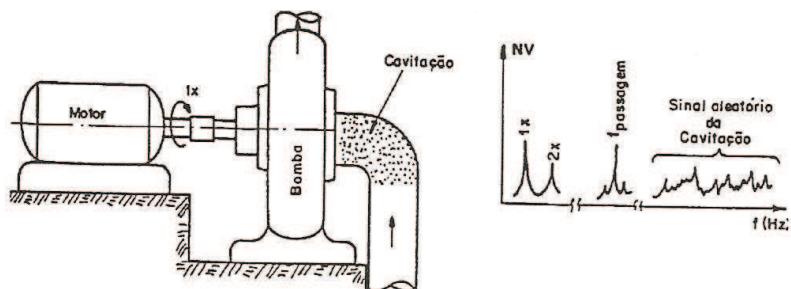


Figura 57 – Vibração Típica de uma Bomba Cavitando [2]

A cavitação geralmente ocorre quando a máquina está trabalhando fora de seu ponto de operação (a bomba com carga excessiva e a turbina com pouca carga). No processo de cavitação, as bolhas de ar implodem violentemente criando ondas de pressão que chegam às estruturas gerando vibrações. Como as implosões, as vibrações são aleatórias e localizadas na faixa de altas frequências no espectro, figura 57. Algumas vezes o componente discreto da passagem das pás se superpõe à região aleatória das turbulências.

Um exemplo de aumento das vibrações devido ao processo hidrodinâmico em uma bomba é mostrado na figura 58.

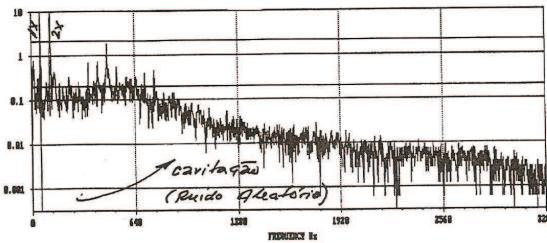


Figura 58 – Vibração de uma Bomba Centrífuga Cavitando [2]

A recirculação normalmente ocorre quando a bomba está operando com baixa capacidade ou alta pressão de succão. Nesse caso, o fluido retorna da espiral de saída para o rotor. No retorno há uma mistura do fluido que vai com o que vem o que resulta em vibração e ruído aleatórios semelhantes à cavitação.

O fluxo turbulento aparece em circulações de fluido com altos números de Reynolds ou quando se misturam fluxos de alta e baixa velocidade. Em ventiladores, pode ocorrer turbulência nas variações da pressão ou de velocidade da passagem do ar através da caixa espiral ou do duto de saída. Esta desorganização do fluido causa turbulência que gerará vibração aleatória na estrutura da máquina. Este fenômeno é geralmente acontece em baixa frequência.

Normalmente, máquinas que usam pás no rotor, ou no distribuidor têm uma frequência típica, a frequência de passagem das pás, que deve ser monitorada. Ela representa a passagem das pás por um ponto fixo, geralmente onde ocorre uma variação de pressão, por exemplo: uma pá fixa ou o ponto de *cutoff*.

A amplitude da vibração no componente da frequência de passagem das pás varia com a carga. Portanto, toda medida de vibração nesse componente deve ser feita na mesma condição de carga. Numa condição de funcionamento normal da máquina geralmente o nível neste componente é baixo. Se o processo induzir instabilidade, imediatamente a vibração neste componente aumenta, e aparecem bandas laterais.

Picos altos na frequência de passagem das pás podem ser inerentes às: folgas desiguais entre as pás rotativas e os difusores estacionários (bombas); coincidência da frequência de

passagem das pás com frequências naturais das próprias pás ou de componentes estruturais da máquina; posicionamento excêntrico do rotor dentro da carcaça; fluxo com variações abruptas de direção (tubulação com curvas acentuadas); obstruções do fluxo; coincidência do comprimento de onda da frequência de pulsação acústica com o comprimento da tubulação (ressonância acústica).

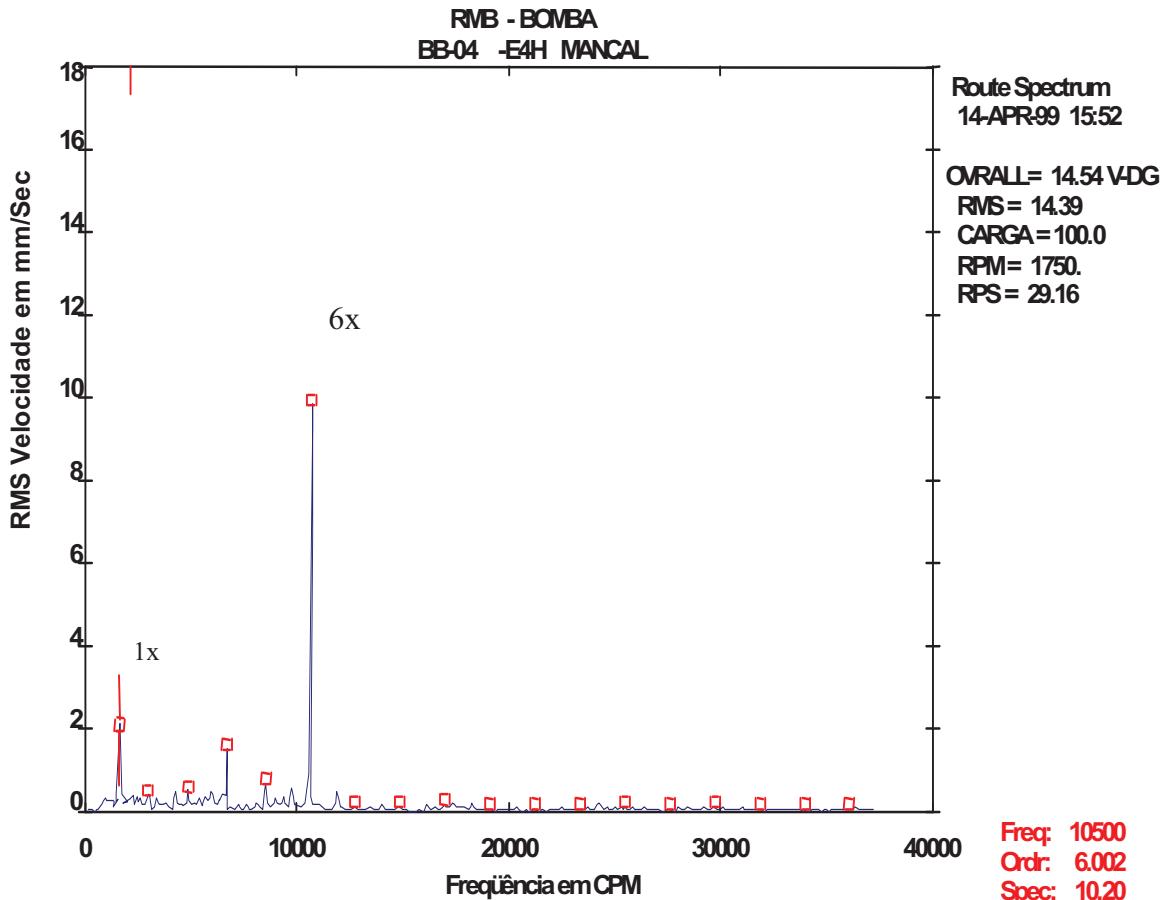


Figura 59 – Espectro Característico de Falha devido Fluxo Hidrodinâmico, onde pode ser constatado alto nível exatamente a seis vezes a rotação do rotor, que por sua vez também possui 6 pás [43]

4.3.7.9 Diagnose de vibrações causadas por roçamento

O roçamento entre partes estacionárias e rotativas pode causar aumento dos níveis de vibrações nas frequências 1x e 2x RPM. Se o atrito for contínuo poderão aparecer vibrações numa faixa larga em altas frequências. Quando o roçamento for parcial, aparecem no espectro picos correspondentes às frequências naturais do sistema. Durante o período de contato, o eixo aumenta sua rigidez temporariamente e após ser liberado a sua rigidez volta ao valor nominal. Desta maneira, durante o processo a rigidez do eixo varia periodicamente, e o sistema comporta-se de maneira não linear.

Este tipo de vibração é muito comum em selos de máquinas rotativas. O roçamento quando causa vibração, é usualmente o resultado de eixos empenados, partes quebradas ou danificadas, ou distorção do eixo por temperaturas elevadas; muitas vezes roçando o metal dos mancais.

O roçamento produz espectros semelhantes aos das folgas mecânicas. O roçamento pode ser parcial ou em toda resolução (pleno). Usualmente gera uma série de frequências excitando uma ou mais ressonâncias. Frequentemente excita subharmônicas inteiras da velocidade do eixo ($1/2$, $1/3$, $1/4$, $1/5x$ RPM) dependendo da localização das frequências naturais do rotor no espectro. O roçamento, também pode excitar interharmônicas da rotação do rotor, ou seja, ($3/2$, $5/2$, $7/2x$ RPM). Também podem ser excitadas vibrações em altas frequências (semelhante ao ruído da banda larga), figura 60.

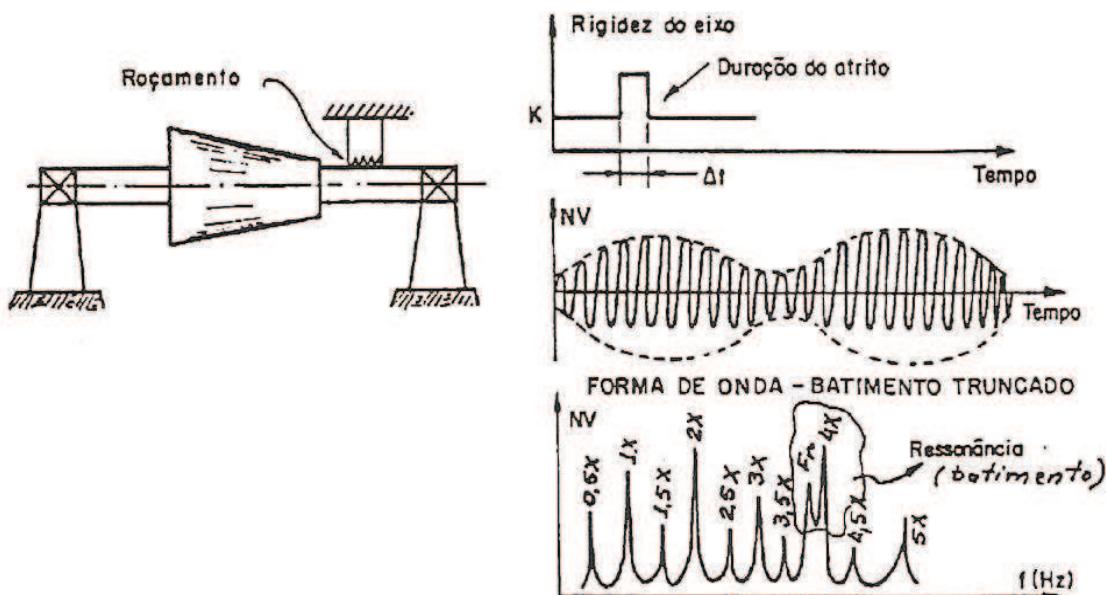


Figura 60 – Espectro Típico do Roçamento [2]

O roçamento é muito comum entre pás de agitadores ou misturadores nas paredes do tanque, em máquinas de fluxo do tipo axial onde também as pás do rotor podem roçar as pás do estator etc.

4.3.7.10 Diagnose de vibrações causadas por correias

A transmissão de potência por correias do tipo V é muito usada nas máquinas. As correias têm boa capacidade de absorver choques e vibrações da transmissão, mas podem

gerar ruídos e vibrações em toda a estrutura da máquina. Os problemas associados com as correias são de dois tipos: reação da correia às excitações dinâmicas do sistema e vibrações devido realmente à correia.

As correias poderão estar reagindo contra forças excitadoras geradas em outras partes da máquina, tais como desalinhamento, desbalanceamento excessivo, folgas e polias excêntricas. Como as correias são as partes mais visíveis da máquina, a atenção é dirigida primeiramente a elas. As correias se comportam como indicadores de distúrbios no equipamento. Logo, antes de decidir pela substituição das correias, é bom fazer uma análise geral no equipamento.

A frequência de vibração é fator chave para determinar a natureza da vibração das correias. Se elas estão simplesmente reagindo a outras forças, a vibração terá a frequência da força excitadora. As correias atuam neste caso com um amplificador de outros distúrbios. Para ajudar a identificação do elemento gerador da excitação, pode-se utilizar um analisador com lâmpada estroboscópica.

Com correias múltiplas, é importante que todas as correias tenham a mesma tensão. Se uma ou mais correias estão frouxas, enquanto outras estão tensas, as frouxas causarão vibrações excessivas, além de acelerar o desgaste da polia e correias pelo escorregamento causando pela carga concentrada em algumas das correias.

A vibração realmente causada pelas correias ocorrerá em frequências múltiplas da rotação da correia, geralmente 1x, 2x, 3x, 4x RPM da correia. A frequência específica encontrada dependerá da natureza da correia e dos diâmetros das polias. A frequência de rotação da correia pode ser calculada por:

$$f_{correia} = i * \left(\frac{\pi * \text{diâmetro da polia}}{\text{comprimento da correia}} \right) * \left(\frac{\text{rotação da polia em RPM}}{60} \right)$$

em Hertz. Onde $i = 1, 2, 3, \dots$

Os defeitos em correias que causam vibrações em frequências iguais ou em múltiplos diretos da rotação da correia são: rachaduras ou fendas, pontos pesados (emendas), lóbulos sobre a superfície da correia etc. Outros defeitos de correia são: tensão não apropriada, polias desalinhadas, cargas excessivas etc.

Em alguns casos, a amplitude de vibração de correias defeituosas é instável. Se há, por exemplo, deslizamento em algumas correias, frequentemente a amplitude aumenta e diminui num período cíclico. Isto pode ser observado fazendo uma marca de giz na correia problemática e sintonizando o filtro do analisador em 1x RPM da correia, podemos observar com lâmpada estroboscópica se a marca fica parada ou desliza.

Quando as correias ressonam, as vibrações são grandes na frequência natural da correia, que geralmente coincide com a rotação ou da polia motora ou da acionada. As frequências naturais da correia podem ser alteradas pela variação da tensão das correias. Para tal, mede-se a vibração no mancal da polia, enquanto é alterada a tensão nas correias para mais ou para menos (tencionando ou afrouxando). Outra solução é usar correias mais longas.

Correias gastas, frouxas, com emendas ou jogo não uniforme de correias (tensões diferentes – correias novas com velhas), a vibração resultante pode ocorrer em 3x e 4x fcorreia. Frequentemente em 2x fcorreia está o pico dominante. As amplitudes são normalmente instáveis e podem pulsar com a frequência de rotação ou da polia motora ou da acionada. Um espectro típico de vibração em correias é mostrado na figura 61.

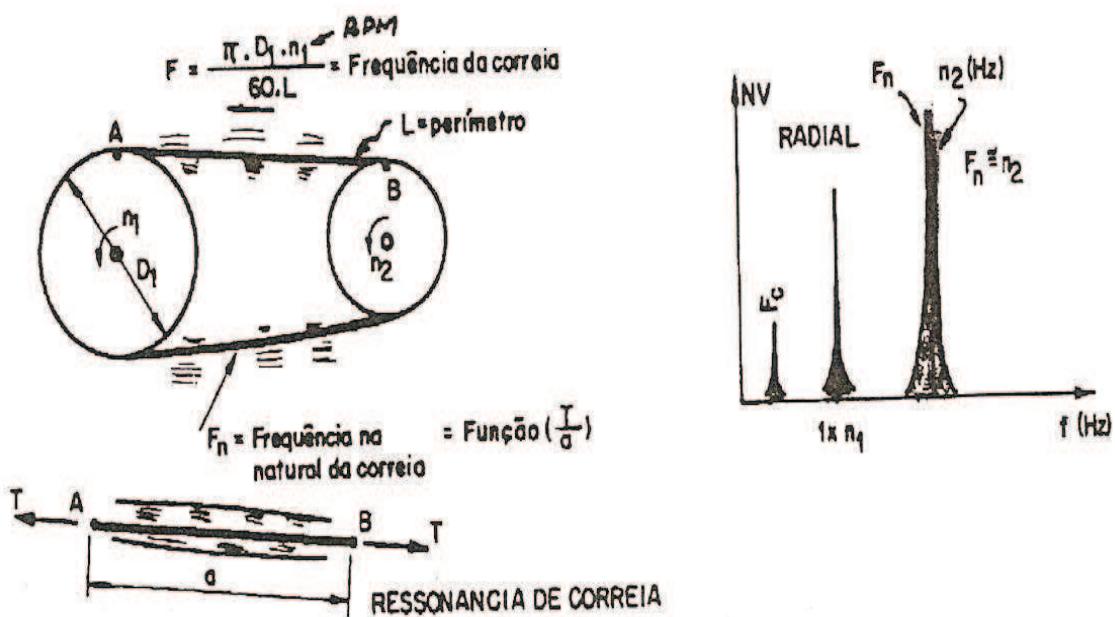


Figura 61 – Vibrações da Correia em Ressonância [2]

A figura 62 mostra a comparação de dois espectros – um com as correias em perfeitas condições de serviço (linha de base), e outro com as correias gastas e vibrando. Note que os picos em 2x, 4x, 6x fcorreia predominam no espectro.

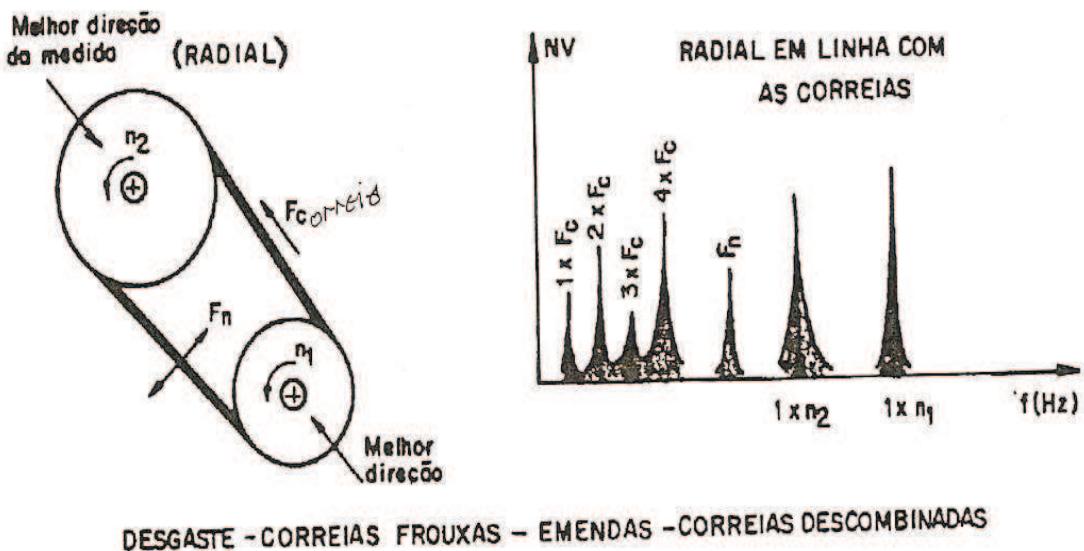


Figura 62 – Vibrações em Correias Induzidas por Desgaste [2]

4.3.7.11 Diagnose de problemas em motores

A vibração em máquinas elétricas tais como motores, geradores e alternadores podem ter origem mecânica ou elétrica. Os problemas mecânicos mais comuns são desbalanceamento, desalinhamento e folgas, que já foram discutidos anteriormente.

A vibração causada por problemas elétricos é normalmente o resultado de forças magnéticas desequilibradas, que agem sobre o rotor ou estator. Este desbalanceamento das forças magnéticas pode ser devido a:

- Mancais do eixo do rotor excêntricos.
- Rotor não centrado dentro do estator.
- Furo do estator elíptico.
- Barras da gaiola trincadas ou quebradas.
- Ventoinhas quebradas ou defeituosas.

Geralmente, a frequência de vibração relacionada com os problemas do rotor é $1x$ rotação do rotor, e quase sempre ladeada por bandas laterais com um espaçamento igual a $2x$ frequência de escorregamento do rotor. Já os problemas relacionados com o estator geram vibração na frequência de $2x$ frequência da rede, ou seja, em 120 Hz.

$2 \times F_s = F_p = 2x$ frequência de escorregamento = número de pólos x escorregamento em Hz, e escorregamento em Hz = (rotação síncrona RPM – rotação nominal)/60.

Para verificar se a vibração é de origem elétrica é observar se a medida em banda larga desaparece imediatamente após o corte da energia elétrica. Se confirmado, devem-se aplicar os testes elétricos no equipamento com o intuito de confirmar o problema. Porém, se após o corte de energia, a vibração for diminuindo gradualmente, o problema deve ser mecânico.

Redução de carga no equipamento acionado causa redução das vibrações mecânicas, porém se houver problema elétrico, a redução será muito mais significativa. Modulações de amplitude podem indicar combinações de problemas elétricos e mecânicos. Frequências muito próximas podem causar este tipo de problema, se somando e se subtraindo, de acordo com a fase de cada onda.

Os problemas elétricos com motores de indução causarão frequentemente uma oscilação ou pulsação no medidor de amplitude analógico. Este ruído e vibração pulsantes são causados pelo escorregamento, característica desse tipo de motor. O escorregamento é simplesmente a diferença entre o RPM do rotor e a frequência elétrica ou síncrona do campo girante. A frequência síncrona do campo girante é sempre igual ou um submúltiplo exato da frequência da rede (60 Hz) que alimenta o motor. Contudo a rotação do motor será sempre levemente menor que a síncrona devido à carga inerte sobre o motor.

Portanto, se o motor tiver problemas elétricos juntamente mecânicos, tal como desbalanceamento, haverá realmente vibrações em duas frequências diferentes. Se essas frequências forem relativamente próximas, as suas amplitudes ora somarão ora subtrairão, e o resultado será um batimento estável, correspondendo, portanto uma oscilação periódica no ponteiro do medidor de vibração.

Os motores elétricos têm vibrações inerentes devido ao torque pulsante. Esses pulsos de torques são gerados quando o campo magnético girante energiza os pólos do estator. A frequência de vibração resultante dos pulsos de torque será o dobro da frequência da rede (120 Hz). Essa vibração não é sempre problema sério, a não ser no caso em que ela excite outras partes da estrutura do sistema, podendo até causar ressonância.

1. Princípio de funcionamento de motores elétricos

A corrente é induzida nos condutores do rotor, sendo proporcional à diferença de velocidade entre o campo girante produzido pela corrente no enrolamento do estator e o próprio rotor. Esta corrente produz um campo no rotor, o qual interage com o campo do estator para gerar força no rotor.

O campo induzido no rotor gira com sincronismo com o campo girante do estator, formando duas polaridades relativas ao estator. Portanto, a denominação de velocidade síncrona é devido à rotação dos campos magnéticos girantes, que possuem mesma velocidade.

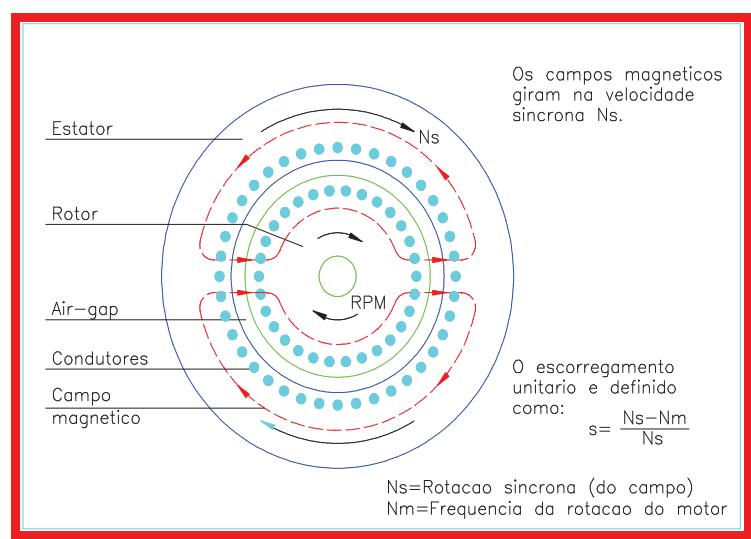


Figura 63 – Esquema de Formação do Campo [30]

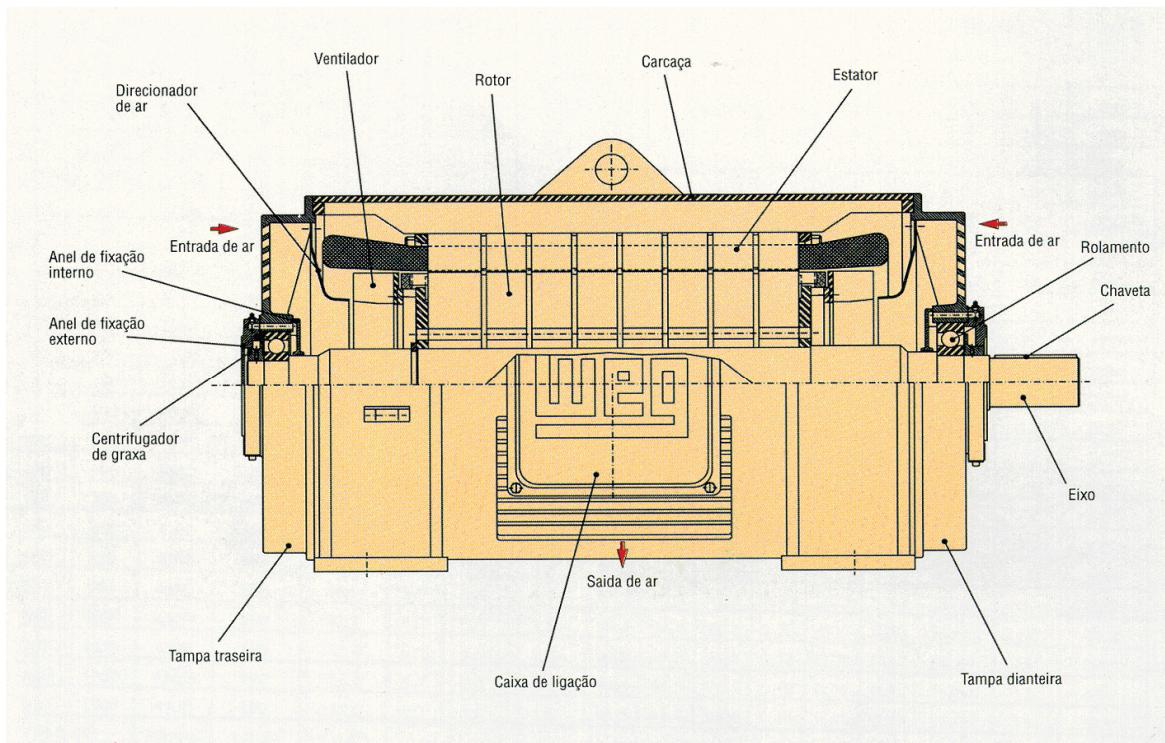


Figura 64 – Principais Componentes de um Motor Elétrico [45]

O rotor do motor não gira com velocidade síncrona, mas escorrega para trás no campo girante. A frequência de escorregamento é a diferença entre velocidade síncrona e a velocidade do rotor. Se o rotor tivesse de acompanhar a velocidade do campo girante, os condutores do rotor não seriam cortados por qualquer fluxo, não haveria corrente induzida e, portanto, nenhum esforço de rotação.

Para que haja corrente induzida no rotor é necessário que suas espiras cortem as linhas de força do campo, necessitando de uma diferença (atraso) de velocidade entre o rotor e campo girante. A velocidade síncrona depende da alimentação e do número de pólos do motor.

A frequência esperada de escorregamento pode ser definida como sendo o escorregamento unitário vezes a frequência da linha (alimentação): $s = \frac{N_s - N_m}{N_s} f_r$.

$$\frac{N_s - N_m}{N_s} f_r$$

Os campos girantes avançam em relação ao rotor por duas polaridades para cada ciclo da frequência de escorregamento. O torque é produzido quando existem forças balanceadas

dos dois lados do rotor. Forças de atração desbalanceadas resultam em vibração. Forças desbalanceadas podem ter como fonte variações de corrente ou do *air gap*.

2. Variações de corrente devidas a falhas no estator ou no rotor

A força sobre uma corrente que atravessa um condutor num campo magnético é obtida através de um produto vetorial: vetor corrente vezes vetor densidade de fluxo.

Existe outra expressão mais geral que dá a força sobre a espira em qualquer direção arbitrária x: $F_x = N / \delta\Phi$. Isto mostra que a força é proporcional à corrente na espira e à

$$\delta x$$

relação de mudança do fluxo magnético na direção da força (e não na direção do próprio fluxo). O termo N é a F.M.M - Força Magneto Motriz e o campo girante num motor de indução pode ser definido como uma alternação da força F.M.M. nos condutores, dando início a uma onda no *air gap*.

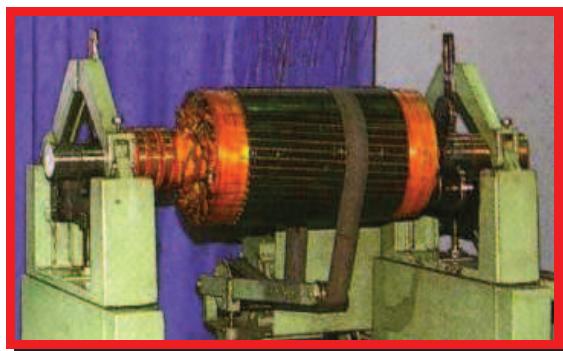


Figura 65 – Rotor de Motor em Máquina Estacionária de Balanceamento [30]

Comparando-se os condutores de cada lado do rotor do motor com os dois lados da espira, algumas barras rompidas podem ser consideradas como introdutoras de uma força desbalanceadora F.M.M. Esta força desbalanceadora gira com o rotor.

Se o problema for simplificado, isto é, se forem desprezadas as harmônicas superiores da onda F.M.M., então a força desbalanceadora poderá ser extraída através do produto de dois termos alternados da frequência fundamental (não necessariamente em fase).

$$F = K * \text{sen}(s.\omega t) * \text{sen}(s.\omega t + \theta) \text{ ou}$$

$$F = \frac{K}{2} (\cos \theta - \cos(2.s.\omega t + \theta))$$

Onde: ω = frequência de linha, s = escorregamento unitário, K = valor de amplitude e θ = ângulo de fase.

Isto mostra que a vibração tem duas partes: uma constante e a outra alternada em duas vezes a frequência de escorregamento.

Se um transdutor estacionário for utilizado, por exemplo, sobre a carcaça do mancal do eixo do rotor do motor, este medirá uma vibração com componentes de 1x RPM e 2x frequência de escorregamento em bandas laterais, em torno da frequência de 1x RPM.

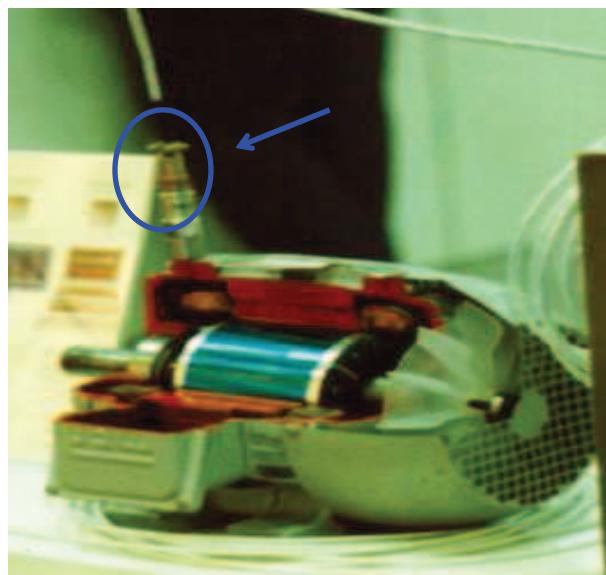


Figura 66– Posicionamento do Acelerômetro na Tampa Dianteira do Motor [30]

3. Variações do ‘Air Gap’ devido à Excentricidade

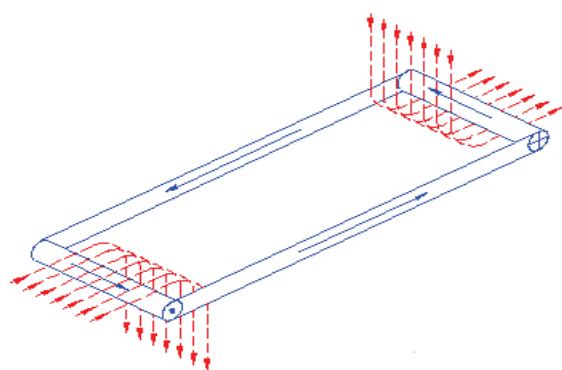


Figura 67 – Ilustração da Espira [30]

Considerando a relação dada na ilustração da espira, levando em conta variações no ‘air gap’, o fluxo é gerado pela F.M.M. total do circuito magnético, sendo, então o fluxo dado por: $\Phi = F_m/R_m$, onde F_m = F.M.M. total

$$R_m = \text{Relutância magnética total do circuito}$$

Excentricidade no ‘air gap’ resulta em variação da relutância magnética, a qual depende do comprimento do radical do ‘air gap’. Por necessitarem de um ‘air gap’ reduzido, os motores de indução evidenciam este efeito, se comparados com os motores de corrente contínua ou síncrona.

Pequenos defeitos podem resultar em variações significativas na relutância de motores de indução. Por exemplo, se o ‘air gap’ estreitar-se, a relutância decresce, portanto, a mesma força magneto motriz produzirá um fluxo maior.

O deslocamento do fluxo de onda senoidal experimentará grande taxa de mudança toda vez que passar por esta região de ‘air gap’. Os efeitos da variação do ‘air gap’ podem ser comparados aos efeitos da variação da corrente.

O problema poderá ser classificado como estacionário ou rotativo, dependendo de como a vibração é produzida. A tabela abaixo relaciona e compara os problemas e suas causas:

Tabela 4 – Problemas X Causas [30]

TIPO DE PROBLEMA	FREQUÊNCIA SINTOMÁTICA DE VIBRAÇÃO	CAUSAS TÍPICAS	
ESTACIONÁRIO	2X FREQUÊNCIA DA REDE	VARIAÇÃO NO “AIR-GAP” EXCENTRICIDADE ESTÁTICA, FALTA DE RIGIDEZ DO SUPORTE DO ESTATOR	VARIAÇÃO DE CORRENTE FALHA DO ENROLAMENTO DO ESTATOR
ROTATIVO	1X RPM, COM 2X FREQUÊNCIA DE ESCORREGAMENTO EM BANDAS LATERAIS	EXCENTRICIDADE DINÂMICA, BARRA(S) SOLTA(S) DO ROTOR.	BARRA(S) DO ROTOR ROMPIDA(S) OU QUEBRADA(S). LAMINADOS DO ROTOR EM CURTO.

- **Excentricidade estática:** refere-se à excentricidade que não se move, por exemplo, devido ao desgaste de um rolamento, folga entre uma tampa e a pista externa de um rolamento, estator deformado etc. Estas situações produzirão vibração em 2x frequência da rede (2x 60 Hz, para alimentação padrão, no Brasil).
- **Excentricidade dinâmica:** move-se com o rotor (por exemplo, devido a um rotor empenado, lâmina solta, trincada ou quebrada, problemas com a ranhura do rotor). Isto produzirá uma vibração forçada em 1x RPM (portadora) e 2x frequência de escorregamento em bandas laterais em torno de 1x RPM (modulante), além de produzir picos em 2x escorregamento em análise de envelope do espectro de corrente ou número de ranhuras x RPM do motor em função de problemas com o verniz.

Deve-se ter em mente que em alguns casos práticos temos os dois defeitos e apenas uma causa, sendo que a verdadeira origem da vibração será identificada após a análise de todos os espectros.

4. Modulações devidas às variações na velocidade

Descontinuidades de forças magnéticas de atração também causam variação no torque do equipamento (motor). Dependendo da inércia do conjunto motor, variações de velocidade podem ser esperadas. Variações são maiores para baixa inércia, podendo, então, surgir modulações de 1x rotação do motor, devidas ao menor torque gerado em locais onde há variações.

Motores de maior inércia permitem menores vibrações de torque, portanto modulações com menores intensidades. Estas vibrações podem induzir ao analista a diagnosticar como sendo desbalanceamento do rotor do motor, portanto, valem aqui a metodologia de se analisar todos os espectros anteriormente.

5. Frequênciа de ranhuras

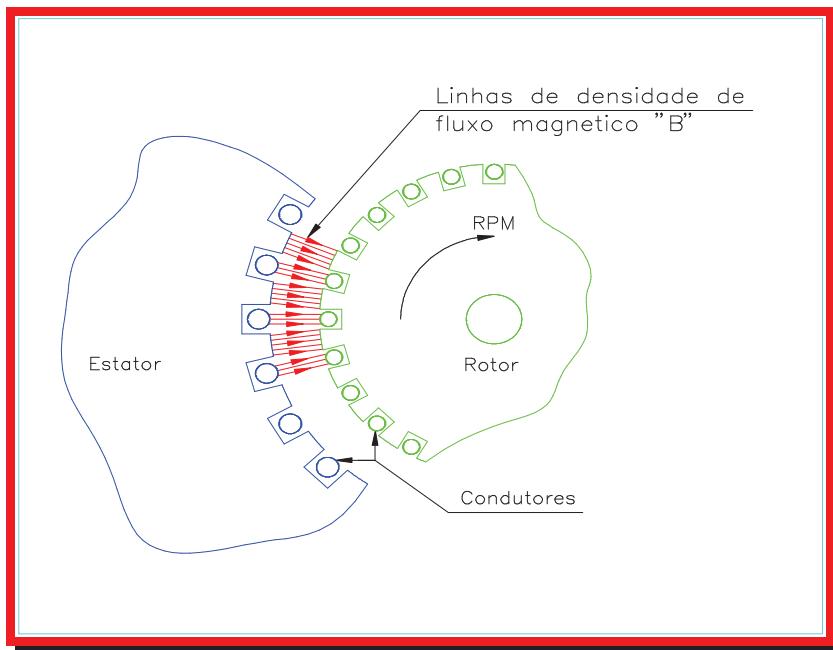


Figura 68 – Fluxo Magnético B [30]

Ranhuras (que alojam nos condutores) geram vibração, pois criam desbalanceamento de forças magnéticas de atração, consequência da variação da relutância do circuito, em função da taxa de passagem pelas ranhuras do estator e rotor.

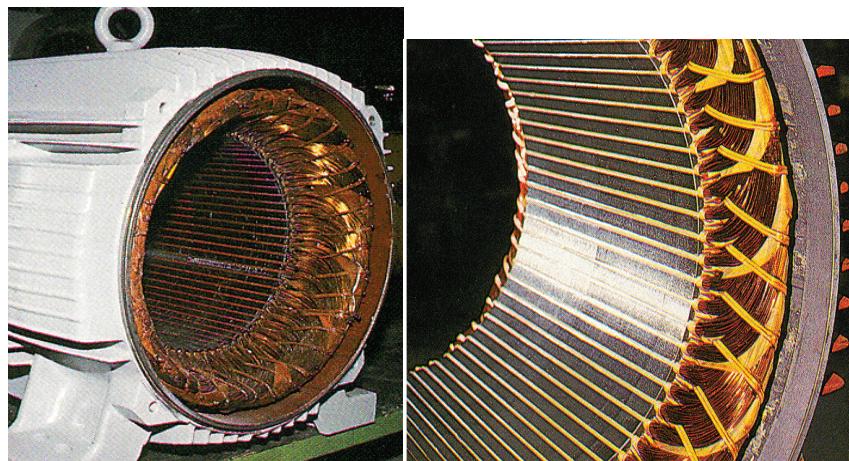


Figura 69 – Estator em Boas Condições [30]

Estes componentes estarão presentes em um motor saudável, com certeza, já que as ranhuras fazem parte do projeto. A tendência é o campo magnético se concentrar no dente da ranhura, devido a mais alta permeabilidade magnética do material do dente.

A vibração ocorre na frequência dada por uma equação, a qual representa o valor da harmônica fundamental:

$$f = \omega [Rs.(1-s)/\rho \pm K1]$$

Onde: ω = frequência da rede, RS – número de ranhuras do rotor, s = escorregamento unitário, ρ = número de pares de pólos e K1 = zero ou nº par (2, 4, 6, 8 ...).

6. Componentes não-fundamentais

Existe uma forte descontinuidade na corrente em barras adjacentes de uma barra rompida de um rotor, ou na região de uma variação de ‘air gap’. A resultante F.M.M. é a forte em harmônicos. Componentes de frequência de ranhuras também estarão presentes.

Desta maneira, sabemos que a vibração resultante conterá todos os componentes vindos do produto do cruzamento da onda fundamental com ela mesma e suas harmônicas, e com componentes da frequência de ranhuras.

Frequências de vibrações esperadas são dadas por:

$$f = \omega \{[(n.Rs \pm Ke).(1-s)/\rho] \pm K1\}$$

Onde: ω = frequência da rede, n = número inteiro qualquer, RS = número de ranhuras do rotor, Ke = grau de excentricidade (zero para excentricidade estática e um valor baixo de números inteiros para excentricidade dinâmica), ρ = número de pares de pólos, s = escorregamento unitário e K1 = zero ou nº par (2, 4, 6, 8 ...).

7. Outras frequências

Além das componentes apresentadas anteriormente, temos os seguintes cálculos, que são úteis na execução das análises de motores elétricos:

- **Rotação Síncrona (Ns):** utilizada para o cálculo de frequência de escorregamento. É a rotação do campo magnético girante pelas bobinas do estator.

$$Ns = \underline{120 \times freq. linha (Hz)}$$

$$60 \times n^o \text{ de pólos}$$

Obs: Note que é importante confirmar a frequência de alimentação.

- **Frequência de Escorregamento (e):** é dada pelo escorregamento unitário vezes a frequência da rede.

$$e = s \times freq. linha$$

$$s = \frac{Ns - Nr}{Ns}, \text{ portanto: } e = \frac{Ns - Nr}{Ns} \times \text{freq. linha}$$

Ns = rotação síncrona

Nr = rotação real do rotor. Deve ser tomada via zoom do sinal de vibração instantâneo, ou mesmo com o uso de tacômetro.

8. Como monitorar Motores

a) Motor AC

É certo que todos os mancais e direções do motor merecem atenção, porém, para que possamos ter uma rotina que favoreça a segurança no acompanhamento e também seja executada no menor tempo possível, tornam-se necessário ‘enxugar’ ao máximo as medições, realizando-as apenas na direção de maior amplitude.

A programação para a medição inclui várias medições com parâmetros diferentes, inclusive com um espectro ‘zoom’ para a detecção da rotação exata, além de bandas laterais de frequências de escorregamento em torno de 1x RPM.

Além dos sintomas elétricos, há a monitoração também de problemas mecânicos. Em espectros de corrente monitora-se a quantidade de energia existente na frequência de rede, com espectros plotados tanto FFT, como no domínio de tempo. Nestas medições são acompanhados também os harmônicos superiores (harmônicos ímpares).

Os envelopes de espectros de corrente também são utilizados na detecção de anomalias elétricas, principalmente frequência de escorregamento. Estes servirão para detectar quais frequências aparecem como modulantes das frequências contidas no filtro.

Vibrações de motores elétricos de indução estão relacionadas a problemas mecânicos e magnéticos. Problemas de desbalanceamento, desalinhamento, falta de rigidez mecânica, entre outros, podem alterar o comportamento dinâmico do conjunto, afetando o campo magnético e provocando perturbações elétricas variando o ‘air gap’. Problemas elétricos, como por exemplo, variações da resistência ôhmicas das bobinas do estator, causam a mudança de giro do rotor, se manifestando como um sintoma de desbalanceamento do rotor. E mais, a vibração encontrada no motor é influenciada pelas partes acionadas, como engrenagens, rolamentos, rotores etc. que são transmitidos ao rotor, figura 70.

VIBRAÇÕES EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

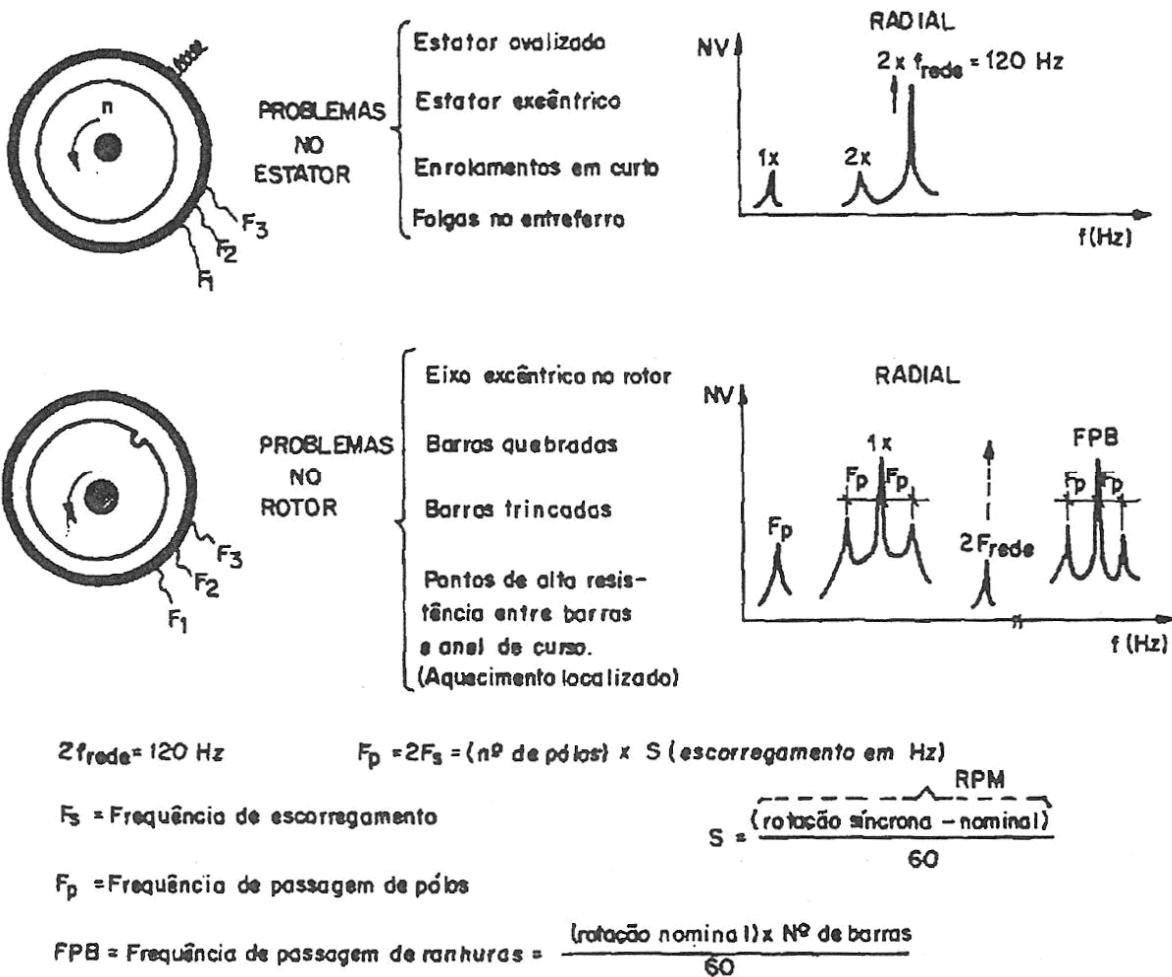


Figura 70 – Principais Fontes de Vibração em Motores Elétricos [2]

Motores Síncronos com bobinas do estator soltas gerarão altas vibrações estáveis na frequência de passagem pelas bobinas (CPF), é que = número de bobinas do estator x RPM do motor (bobinas do estator = pólos x bobinas/pólos). Geralmente o componente de vibração na frequência CPF tem bandas laterais (modulação) da frequência de rotação do rotor.

- Aceleração pico a pico real – fundo de escala 7.000 Hz

A medição de aceleração com valor pico a pico real é feita em função do tempo. Este espectro é bastante interessante para analisar impactos anormais de qualquer natureza, identificando falhas localizadas relevantes, que ainda não estão generalizadas, não sendo ainda percebidas nas medições com valor RMS, mas que podem ser de alta gravidade e de processo de devolução muito rápido, que podemos evitar atuando antecipadamente.

Falha localizada grave pode ser encontrada, como falta de material em apenas uma esfera ou rolete de rolamento, pequena cratera ou trinca em pista de rolamento, elemento estranho presente no lubrificante do rolamento, folga em chaveta, ou seja, qualquer falha que provoque efeito transiente do tipo impacto pode ser detectada com esta técnica.

A periodicidade dos impactos no espectro define a localização e identificação da origem da falha e a amplitude revela a gravidade do problema. É uma medição direta do efeito.

O filtro de 500 Hz a 10.000 Hz realça falha em rolamento (pista interna, pista externa, elementos girantes e gaiola), problema de origem magnética (componentes de 120 Hz e múltiplos). Quando se tem combinação de mais de um tipo de falha, este filtro auxilia na análise. Diferencia o problema quando há folga entre o anel externo de um rolamento e seu alojamento.

O filtro de 50 Hz a 1.000 Hz realça falha em rolamento, principalmente localizado na gaiola.

Define bem sobre vibração de 1x RPM entre desbalanceamento e desalinhamento (sistemas pouco rígidos quando desalinhados não vibram em 2x RPM), Neste caso, no espectro de velocidade RMS o componente maior é 1x RPM e, no envelope, o componente principal é 2x RPM (maior que 1x RPM), confirmando desalinhamento em sistemas pouco rígidos. Também confirma falta de rigidez mecânica, desalinhamento ou falha em correias de transmissão, batimento periódico por aproximação de dois componentes com problemas.

O filtro de 5 Hz a 100 Hz é especialista em identificar problema de barra rompida em rotor de motor elétrico. Como as frequências e amplitudes são baixas, este filtro seleciona de forma bastante clara as frequências de interesse.

- **Velocidade RMS até 250 Hz**

Analisamos várias possibilidades de falhas neste espectro: desbalanceamento (1x RPM), desalinhamento (1x RPM ou 2x RPM), folgas (múltiplos e submúltiplos de 1x RPM), alteração do “GAP” (2 x frequência da rede – 120 Hz e múltiplos), acoplamento com folga ou afrouxamento dos pinos de transmissão (harmônicos de 1x RPM com amplitudes maiores que

do componente fundamental 1x RPM), falta de rigidez na base ou afrouxamento da fixação, deterioração de isoladores (aparecimento e crescimento de múltiplos e submúltiplos de 1x RPM, principalmente na direção radial vertical), influência de vibração externa de baixa frequência - por exemplo, entrada em operação de compressores alternativos com frequência de pulsação do ar em 15 Hz, montados próximos ao motor analisado.

Não procuramos neste espectro de velocidade RMS componentes fundamentais de falhas em rolamentos.

Esta ‘lente de análise’ ficou obsoleta depois que a técnica de análise de envelope se tornou aplicável como rotina, há cerca de 10 anos, porém não é proibido procurar frequências de rolamentos nesta medição.

Menos de 2% dos diagnósticos sobre rolamentos são baseados em dados deste tipo de espectro.

- **Velocidade RMS até 35, 45 ou 75 Hz**

Este espectro confirma com precisão a rotação exata do acionamento e, a partir desta frequência, todas as demais serão calculadas. Em se tratando do motor elétrico de indução, conhecendo-se a rotação exata, podemos calcular a frequência de escorregamento (frequência da corrente elétrica induzida que passa pelo rotor do motor), conforme cálculos vistos anteriormente.

Quando o rotor do motor apresentar barra rompida ou trincada, cresce em amplitude o componente 1x RPM, acompanhado de bandas laterais 2 x frequência de escorregamento. Portanto, teríamos 1x RPM com bandas de fe (picos de equidistantes de ‘fe’ de 1 RPM).

Neste espectro é interessante a plotação do eixo que representa a amplitude em escala logarítmica, realçando a presença de bandas laterais, quando houver.

- **Aceleração RMS até 7.000 Hz**

Este espectro mostra a generalização da evolução de falhas nos rolamentos do motor bem como falha de lubrificação.

Realça também com clareza componentes de frequência de passagem de ranhuras do rotor com seus múltiplos e bandas laterais de 120 Hz.

A presença de vibração externa de médias e altas frequências também será registrada neste espectro. Não se tem observado componentes superiores aos limites de 7.000 Hz, daí o ‘range’ abranger frequências de 7 kHz.

- **Espectros de Corrente – Amper**

O diagnóstico de um problema em estator ou rotor de motor elétrico pode ser feito por medição de vibração, no entanto, entendemos que a monitoração da corrente elétrica permite avaliação com maior definição e clareza, uma vez que analisa a condição magnética diretamente na fonte geradora de eventual problema.

É utilizado um alicate amperímetro que abraça um cabo de cada fase por medição, sendo o sinal armazenado no mesmo coletor que monitora a vibração.

São feitas medições diretas do sinal de amperagem em função da frequência e em função do tempo. A corrente deve estar equilibrada nas três fases. Se houver desequilíbrio relevante (4% = alarme 1, 12% = alarme 2), sem alteração de carga, deverá ser verificado o equilíbrio de tensão nas fases.

Tensão equilibrada, carga estável, com amperagem desequilibrada, provocará o aparecimento de harmônicos ímpares da frequência fundamental em 60 Hz da rede, indicando problema no estator.

O componente em 60 Hz pode aparecer com bandas laterais de 2x frequência de escorregamento (indica barra do rotor rompida ou trincada) ou com bandas de 1x comprimento mecânico (identifica irregularidade de 1x RPM do componente mecânico em questão).

Se tivermos amperagens diferentes nos três cabos, devemos levar em consideração a seguinte equação: $i = R / U$.

Onde: U = tensão, R = resistência do circuito e i = amperagem do circuito.

Com isto se temos uma variação da tensão ou na resistência dos cabos, é esperada a variação de amperagem entre os cabos.

Em sistemas com torque final de saída baixíssima frequência, esta pode ser confundida com 2x frequência de escorregamento. Neste caso, a análise de envelope do espectro de corrente define entre um problema e outro.

Um pacote de senóides em função do tempo é coletado (cerca de 500 senóides), para avaliar modulação de baixa frequência e a estabilidade ou variação da carga. Uma senóide simples é coletada para avaliar sua formação com contorno preciso ou com deformação devida a harmônicas superiores.

Tabela 5 – Severidade e Recomendações [30]

Análise de Vibração de Motores Elétricos Tabela - Severidade e Recomendações		
I linha / I 2fs	Avaliação Condição	Ações
60 dB ou mais	Excelente	Nenhuma
50 - 60 dB	Boa	Nenhuma
48 - 54 dB	Moderada	Acompanhar tendência
42 - 48 dB	Início de trinca na barra do rotor ou juntas com altas resistências	Reducir periodicidade das medições e acompanhar tendências
36 - 42 db	Provavelmente 2 barras trincadas ou quebradas. Provavelmente juntas de alta resistência	Realizar análise detalhada para confirmação do problema
30 - 36 dB	Muitas barras trincadas ou quebradas. Podem indicar falhas (trincas nos anéis de curto)	Realizar inspeção no rotor
< que 30 dB	Muitas barras trincadas ou quebradas ou várias trincas nos anéis de curto. Falhas severas por toda gaiola.	Reparar ou substituir o rotor.

Fonte: Liberty Technologies, Inc, Conshohocken, Pensilvânia

b) Análise de Vibração em Motores de Corrente Contínua

A análise de vibração tem a capacidade de identificar as frequências provenientes de excitações e então relacioná-las aos componentes específicos da máquina. Portanto, tanto os defeitos mecânicos ou elétricos de componentes de máquinas podem ser identificados pela

análise em frequência. Uma vez identificado o defeito, a severidade do problema e sua condição podem ser determinados pela amplitude da vibração naquela frequência específica. Portanto, conhecimento de detalhes sobre os componentes rotativos internos de uma máquina ou equipamento, tais como; mancais, engrenagens, correia, polias, correntes, acoplamentos etc. é de suma importância para ajudar no diagnóstico do defeito. Para diagnosticar problemas relacionados com motores elétricos é importante que o analista além de conhecer as fontes de vibrações de origem eletromagnéticas dos motores, conheça também detalhes tanto do equipamento que este motor está acionando, bem como da fonte de alimentação elétrica do motor.

Os motores podem ser alimentados usando corrente alternada (AC), corrente contínua (DC). Estas formas de fornecimento de energia elétrica e como elas são geradas tornam-se uma importante parte para o diagnóstico de máquinas com rotação variável.

Os defeitos em motores de corrente contínua podem ser detectados pelas vibrações de grandes amplitudes (mais altas que as normais) na frequência de disparo do retificador de corrente (SCR), que geralmente é um múltiplo da frequência da rede (60 Hz) e suas harmônicas. Os problemas detectáveis por vibrações incluem: enrolamentos de campo quebrados – SCR defeituosos – conectores folgados etc. Outros problemas, tais como: fusíveis soltos e cartões de controle em curto-circuito, podem causar picos de vibração em 1x a 5x frede (60 a 300 Hz). A figura 71 mostra o espectro de motor CC em curto no cartão de disparo – ver os múltiplos da frequência da rede elétrica (60 Hz) predominando as vibrações. Após a troca do cartão de disparo, praticamente só temos as vibrações de origem mecânica.

Cartão em curto-circuito.

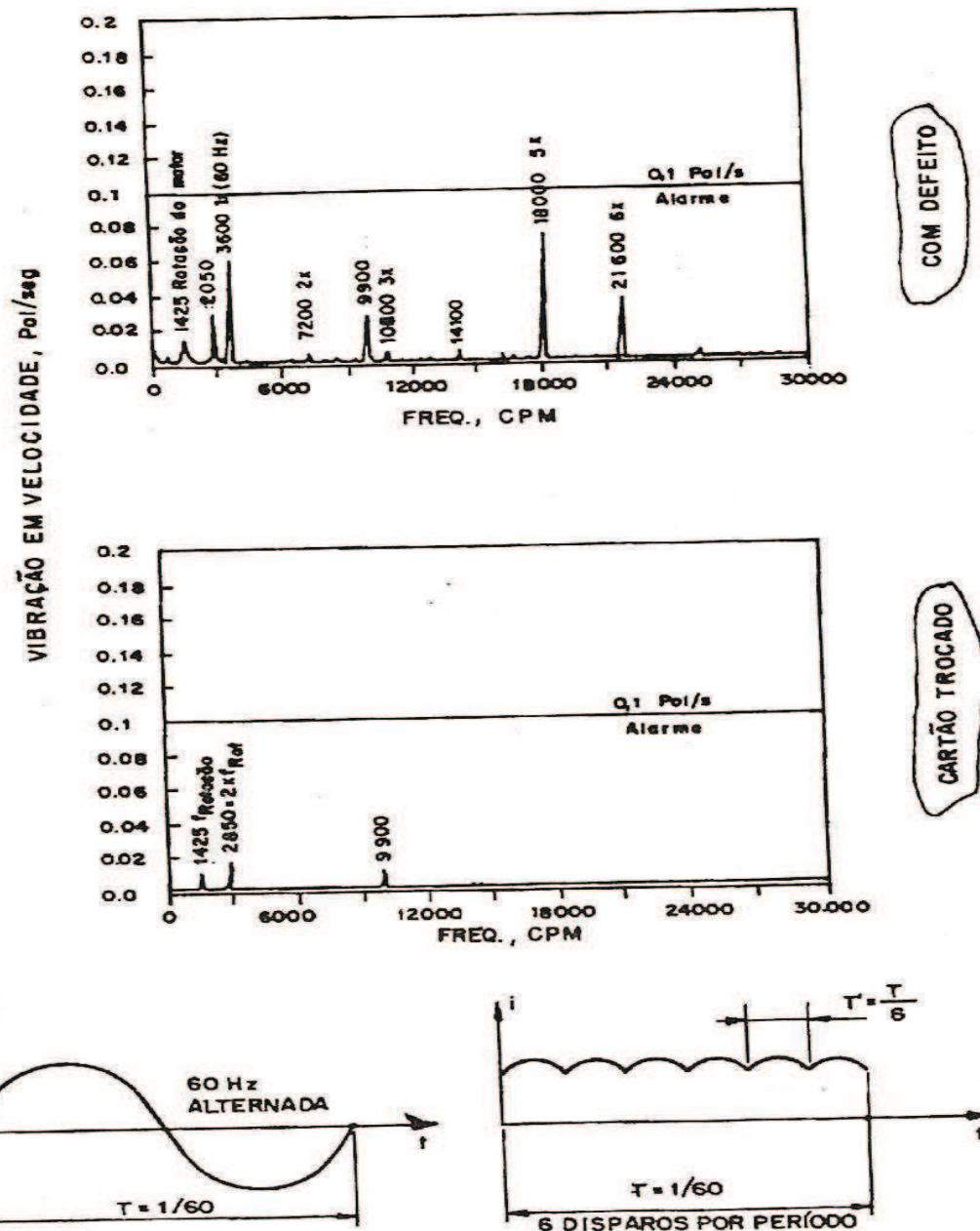


Figura 71 – Espectro de Vibração de Motor CC com Defeito no Cartão de Disparo [2]

Os principais problemas associados com análise espectral de vibrações em motores de corrente contínua acionando máquinas de rotação variável são:

- Os tipos de sistemas geradores de DC para velocidade variável.
- Importância da rotação do motor exata para a análise da vibração em frequência.
- Técnicas para distinguir as frequências de origem mecânica e elétrica.

A corrente contínua é gerada tomando as três fases da corrente alternada e convertendo-as através de um banco de tiristores (SCRs- Retificadores controlados de Silício) em corrente direta ou contínua. A corrente alternada no Brasil tem frequência de 60 Hz. Isto significa que há três formas individuais de ondas, todas com frequência de 60 Hz alimentando o sistema, porém defasadas de 120°. As três formas de onda são idênticas em amplitude e duração, então, em um período correspondente a 60 Hz as três fases AC revelarão 360 picos de amplitudes positivas e negativas (figura 72). Quando a corrente alternada é retificada para DC, estes picos são eletronicamente processados para permitir somente picos positivos na nova forma de onda. Estas ondas, embora não sejam totalmente alternadas, criam uma pulsação que é detectável através da análise de vibração.

Quando três SCRs (meia onda retificada) são usadas para converter AC para DC então uma onda pulsante com frequência de 180 Hz (3x frequência da rede) é gerada no sistema retificador de corrente. Quando seis SCRs são usados para converter AC em DC (onda plena retificada, ou sistema de alta eficiência) então uma onda pulsante de frequência 360 Hz (6x frequência de rede) é gerada no sistema retificador de corrente. Usando CPM (ciclos por minuto) ao invés de Hertz, teremos então frequências 10.800 CPM (180 Hz) para sistemas com 3 SCRs e 21.600 CPM (360 Hz) para sistemas com 6 SCRs.

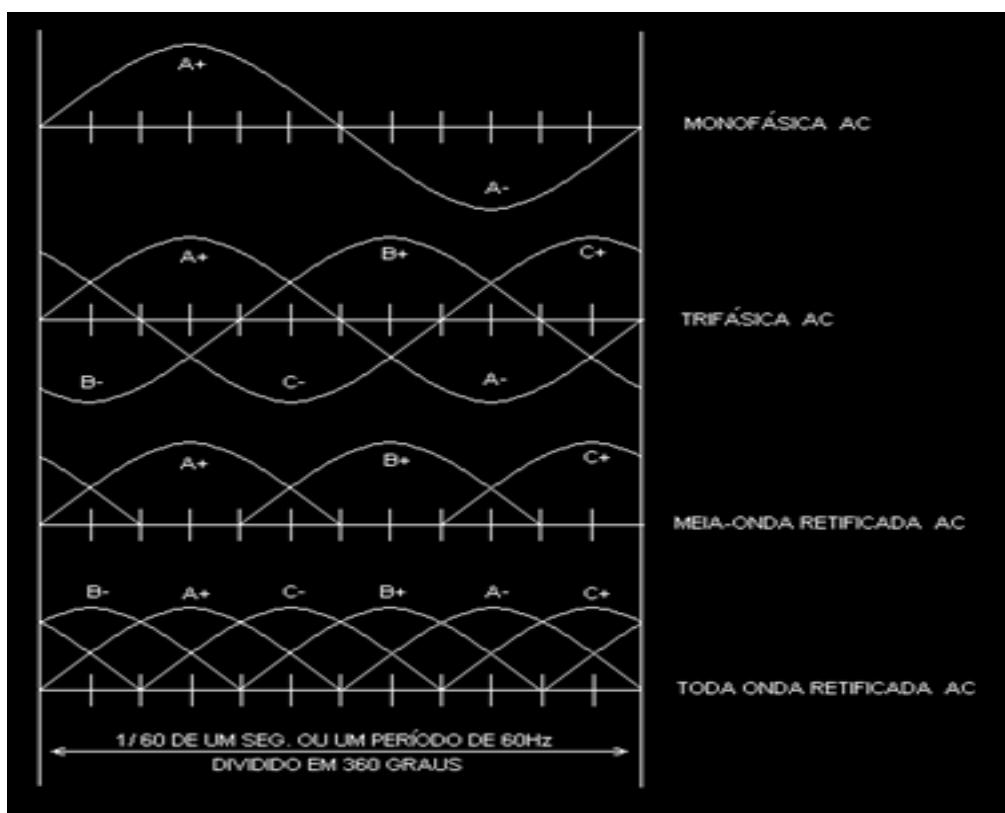


Figura 72 – Conversão de Corrente AC para DC [30]

O sistema retificador de meia onda retificada terá um componente em frequência dominante relacionado com a parte elétrica na frequência de 10.800 CPM, e o sistema com onda total retificada terá um componente elétrico dominante na frequência de 21.600 CPM. Quando as vibrações nestas frequências existirem dentro de seus respectivos sistemas, elas serão consideradas normais se suas amplitudes forem menores que 2,5 mm/s – pico. Se as amplitudes forem maiores, então isto usualmente significa que há um sistema que há um problema no sistema elétrica retificador.

- **Sistemas Retificadores de Corrente e Controles**

Geralmente os motores de corrente contínua que são alimentados por pontes retificadoras de corrente AC para DC, podem variar suas velocidades através de sistemas de controle. Estas velocidades podem ser controladas manualmente ou ser ajustadas automaticamente através de um sistema de controle para monitorar a velocidade de rotação do motor. O sistema é realimentado através de um tacômetro e de um auto-ajuste da fonte de potência que ajuda o sistema para alcançar a velocidade desejada. Os sistemas autocontrolados ou sistemas de malha-fechada usam componentes de controle de baixa tensão para disparar ou abrir os SCRs da ponte retificadora da corrente que irá alimentar o motor. Isto permite que o motor gire em uma velocidade desejada, para atender as necessidades de velocidade do equipamento acionado pelo motor. Os problemas elétricos associados com estes sistemas são: a fonte de alimentação AC, os componentes dos sistemas retificadores de AC para DC, os componentes de controle DC e as falhas no próprio motor de corrente contínua.

O sistema gerador de DC alimenta o motor, que gera um campo magnético nos pólos, que faz gerar a armadura do motor numa rotação proporcional a potência DC fornecida. Quando o motor gira, o tacômetro também gira, e cria um sinal de baixa tensão proporcional a sua velocidade. O sinal de baixa tensão do tacômetro é comparado com uma tensão constante ou predeterminado (sinal de referência) pelo cartão comparador. O cartão comparador baseado no diferencial entre o sinal de referência e o sinal enviado pelo tacômetro, sinaliza o cartão de disparo dos SCRS. Existe um cartão de disparo para cada SCR que controla o fluxo de potência através de SCR. Os disparos ou aberturas dos SCRs geram e fornecem potência DC ao motor regularizando sua velocidade, até chegar naquela desejada para o processo. Isto é uma explanação básica de um circuito alimentador de um motor de corrente contínua, porém

é suficiente para o analista de vibrações entender os conceitos de como os vários componentes interagem. Ver figura 73.

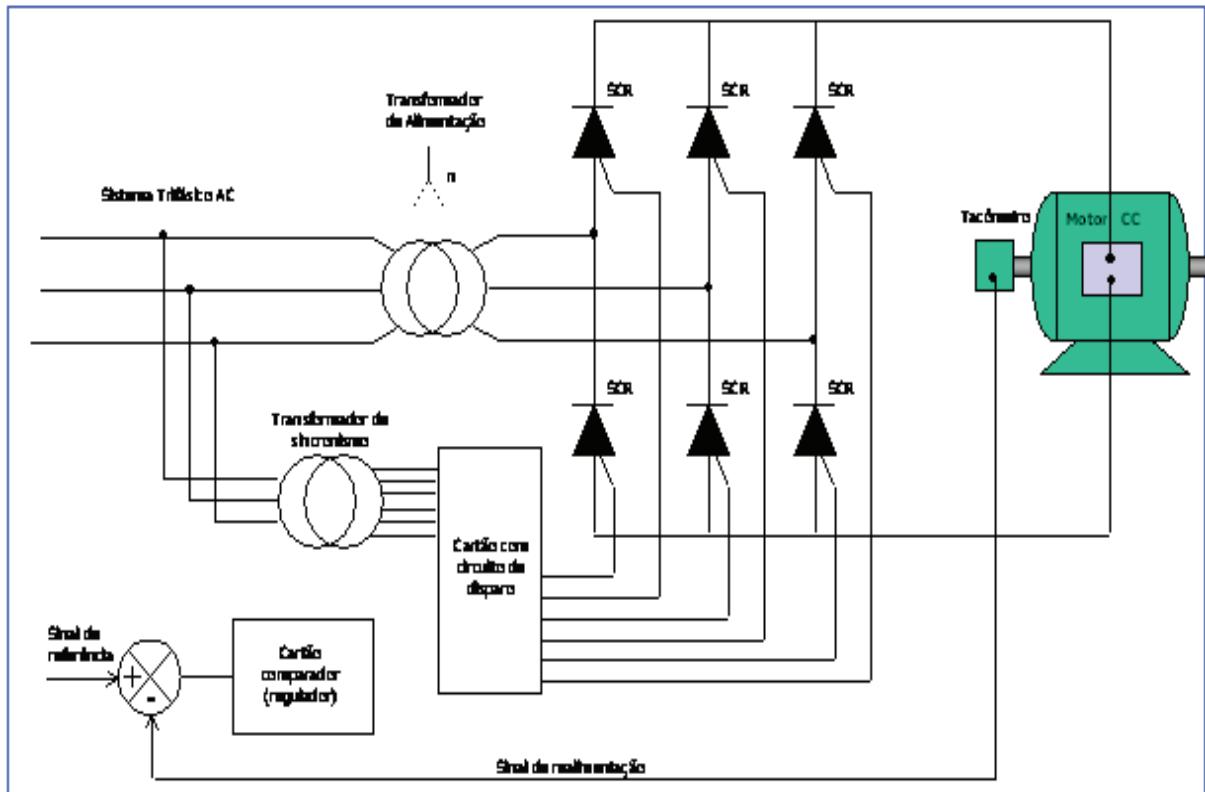


Figura 73 – Circuito Básico de um Sistema Fonte de Alimentação DC CPM 6 SCRS [30]

- **Cartões de Controle e Disparo**

Os cartões de disparo que controlam as aberturas e fechamentos dos SCRs devem atuar corretamente para permitir que o sistema opere suas funções em condições normais. Por isso, há uma ordem de disparo por SCR. Portanto, defeitos nos cartões de disparo podem causar desordens nos disparos dos SCRs, ou seja, disparos em uma ordem errática.



Figura 74 – Foto de um Cartão de Disparo com 6 SCRs [30]

A análise de vibração tem sido usada para determinar defeitos ou mau funcionamento destes cartões ou dos próprios SCRs, baseando-se nas frequências correspondentes dos submúltiplos da frequência dominante no sistema DC usado. Frequência em sistema DC com onda plena retificada possui sempre uma frequência predominante constante de 360 Hz (21.600 CPM), e simples com meia onda retificada possuem uma frequência predominante constante de 10.800 CPM. Se encontrarmos no espectro de vibração, picos com grandes amplitudes na frequência de 60 Hz (3.600 CPM) e/ou outros picos espaçados de 60 HZ (3.600 CPM) ou na frequência de 120 Hz (7.200 CPM) e/ou outros picos espaçados de 120 HZ (7.200 CPM), então a causa da vibração será defeitos no cartão de disparo ou nos SCRs.

- **Cartão Comparador DC**

O cartão comparador é outro componente do sistema em baixa pressão que é responsável pela determinação da diferença entre a velocidade atual do sistema e aquela predeterminada pelo sistema. Quando este componente funciona mal, tem sido observado que há bandas laterais presentes em torno das frequências fundamentais do sistema DC. Estas bandas laterais são sempre igualmente espaçadas das frequências DC. Também tem sido observado que estas bandas laterais crescem ou diminuem quando a rotação do motor varia, contudo, elas permanecerão igualmente espaçadas.

Ainda não existe uma certeza absoluta se estas bandas laterais estão relacionadas com a flutuação da rotação do motor ou flutuação no cartão comparador, procurando o ponto de rotação predeterminado; ou se uma constante correspondente à frequência com que o campo

magnético entre em colapso e regenera. Tudo isto precisa ser pesquisado. As bandas laterais, contudo, quando estão presentes no espectro pode ser considerado como um aviso que este componente não está funcionando bem. Estas bandas laterais podem ocorrer em pequenos incrementos de como mostrado na figura 75, e podem requerer uma alta resolução em FFT para diferenciá-las do domínio de frequências.

Para resolver bandas laterais relacionadas com mau funcionamento do cartão comparador uma resolução de 3.200 linhas no espectro de Fmax de 2.400 CPM é sugerido.

Outra razão possível para haver estas características no espectro de vibração, poderia ser falha ou má funcionamento do tacômetro que mascaria a tensão de saída para o cartão. Testando a tensão de saída do tacômetro pode-se confirmar esta situação.

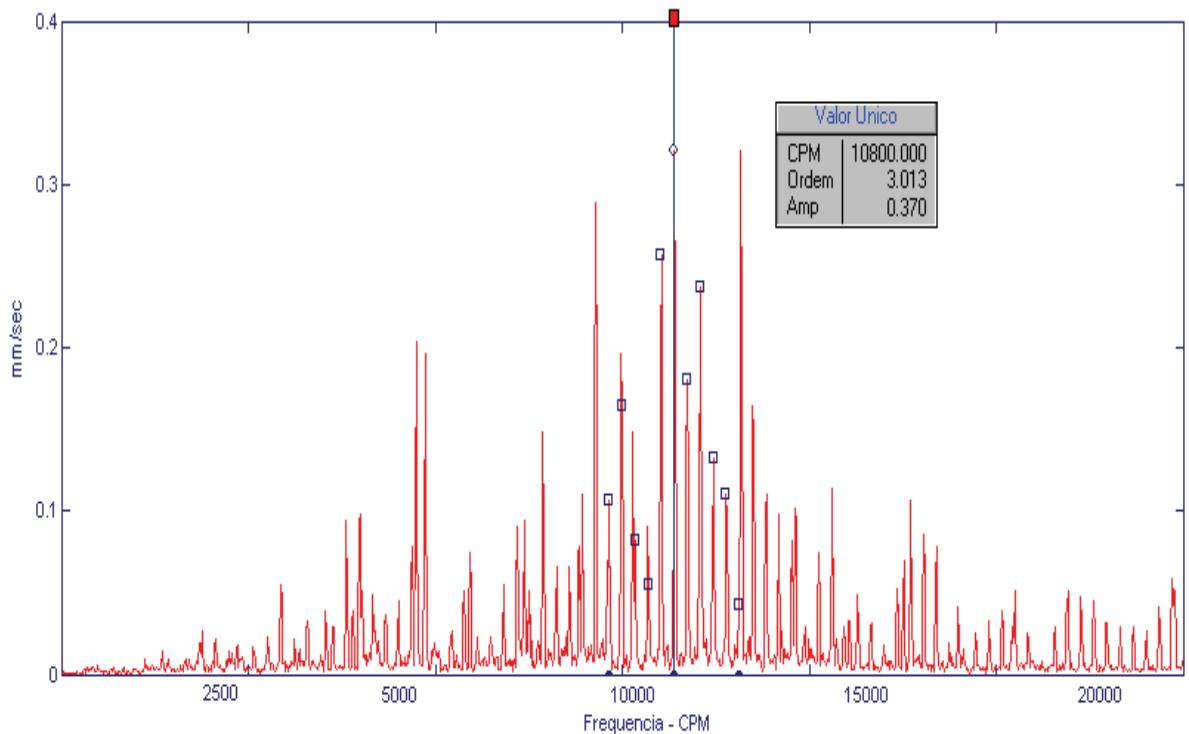


Figura 75 – Espectro Mostrando Bandas Laterais Relacionadas com o Cartão Comparador - apresenta bandas laterais – suspeita de defeito no cartão comparador [30]

- **Componentes do Motor DC**

Os motores DC são diferentes dos motores AC por causa de sua potência de alimentação, que é composto de diversos dispositivos eletrônicos. O mais aparente é o tacômetro que o estende, usualmente, na parte traseira do motor. Ver foto na figura 76.



Figura 76 – Motor de Corrente Contínua com o Tacômetro em sua Extremidade. Geralmente, estes motores têm pequenos mancais que podem ser monitorados na mesma maneira como qualquer mancal (técnica do envelope, por exemplo) [30]

Cuidado: nunca coloque uma montagem magnética do acelerômetro sobre o tacômetro.

Os tacômetros usam magnetos (imãs permanentes) para gerar a tensão que controla o sistema de regulagem de velocidade do motor. Colocando a base magnética do acelerômetro perto ou sobre o tacômetro, ele alterará ou destruirá a tensão de saída do taco para o cartão de controle, modificando literalmente a velocidade do motor.

O comutador é o dispositivo que transfere a potência de alimentação DC para a armadura do motor. As escovas, usualmente são feitas de uma liga de carbono, passeiam contra o comutador e alimentam com energia DC. Tem sido observado que quando estas escovas desgastam, leituras no componente em 1xRPM do motor aumentam em amplitude. Quando as escovas centelham, têm sido observadas que a amplitude de vibração na frequência de 1xRPM aumenta drasticamente, alcançando muitas vezes 7.5 mm/s de pico ou mais altos em casos extremos. Outra frequência associada com o comutador é o número de slots ou ranhuras sobre o comutador vezes a RPM do motor. Geralmente quando a amplitude nesta frequência começa a crescer, pode-se suspeitar do desgaste das escovas. A figura 77 mostra o comutador do motor de corrente DC e o suporte de escovas.

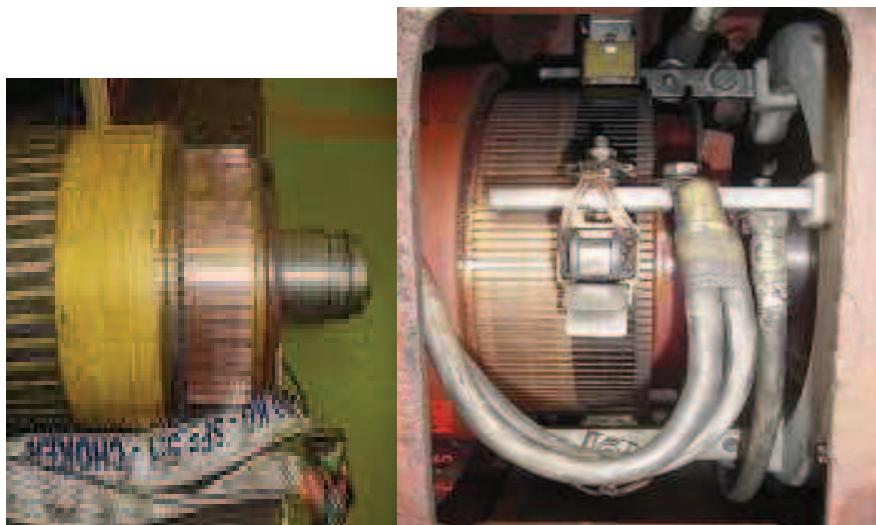


Figura 77 – Foto Mostrando Rotor e Suporte de Escovas do Motor de Corrente Contínua [30]

9. Importância da exata RPM do motor

Conhecendo a exata RPM de um sistema que opera com velocidade variável, é de suma importância para calcular as frequências de vibração de origem mecânica. Nunca se deve assumir a RPM do sistema é aquela indicada no display do painel, estes displays são muitas vezes imprecisos. O uso de uma boa lâmpada estroboscópica, ou um tacômetro digital com fita refletiva, dará uma melhor leitura da rotação do motor no momento da análise.

Sempre entre com a exata rotação como dado para o coletor ou para o software de análise, isto previne erros durante as análises para diagnósticos.

Quando determinamos a frequência relacionada com um componente do motor devemos ter a certeza que a resolução do espectro é suficiente para distinguir a diferença entre as frequências em posições bem próximas. Se necessário, tomar vários espectros em diferentes resoluções, para capturar e diferenciar todas as possíveis frequências. Lembrar que, nos problemas mecânicos as correspondentes frequências aumentam e diminuem proporcionalmente ao aumento ou diminuição da rotação do motor, já as frequências provenientes de defeitos elétricos permanecem sempre constantes.

10. Análise de Envelope

A técnica de envelope permite diferenciar entre eventos aleatórios e periódicos presentes nos espectros. É utilizado para a detecção de falhas em rolamentos, cavitações, engrenagens etc. Os defeitos provenientes dos rolamentos provocam impactos periódicos, que

excitam a estrutura dos mancais, provocando vibrações em altas frequências na faixa de 4 kHz a 6kHz. Outros tipos de problemas também são confirmados em análise de envelope, como desalinhamentos, desbalanceamentos, folgas, falta de rigidez mecânica etc.

Estas vibrações são percebidas através do parâmetro de aceleração. As frequências fundamentais de defeito são baixas e possuem valores de amplitudes baixos, ficando encobertas pela outras fontes de maior energia no sistema.

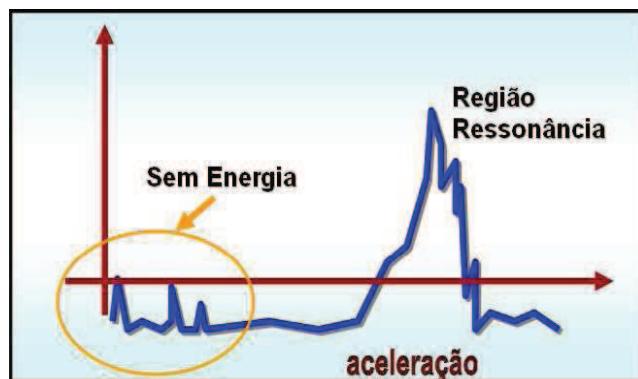


Figura 78 – Região de Ressonância dos Rolamentos [30]

A análise de envelope permite extrair do sinal excitado a fonte (frequência fundamental) de excitação e seus harmônicos, localizando o componente problemático (pista interna, pista externa, elemento girante, gaiola).

Portanto, o filtro serve para selecionar que frequências entrarão como portadoras dentro da faixa de ressonância do rolamento, ou seja, funciona como um amplificador das frequências de defeito por meio de sua faixa de ressonância.

Para escolha do melhor filtro deve-se procurar colocar dentro do filtro a partir da segunda harmônica, excluindo a primeira harmônica do componente de interesse e utilizar à maior frequência esperada. A escolha pelo *range* do espectro será feita com o objetivo de detectar-se pelo menos a terceira harmônica da maior frequência esperada (pista interna).

a) Funcionamento do Envelope

O Envelope Detector tem como objetivo separar altas frequências de rolamentos de baixas frequências de outras partes do equipamento, através de um filtro “passa banda”. Nesta etapa, torna-se difícil detectar baixas amplitudes. Um sinal de defeito em função do tempo é

muito baixo, sendo dissipado no *range* total de medição, consequentemente as amplitudes das harmônicas são quase que completamente escondidas no sinal.

O circuito para análise de envelope aproximadamente eleva ao quadrado o sinal no tempo filtrado. Desde que o sinal do defeito seja repetitivo, ele pode ser simulado por uma série de harmônicas de ondas senoidais que são múltiplos inteiros da frequência de defeito.

Quando uma série de harmônicas é multiplicada por ela mesma, a série resultante é a soma e a diferença entre as componentes desenvolvidas durante todo o processo de multiplicação. Todas as componentes somadas atingem valores fora da faixa de medição. Todas as componentes subtraídas que são equivalentes a 1x defeito são somadas vetorialmente e retomam à faixa de medição. As harmônicas superiores são realçadas deste mesmo modo.

A presença de harmônicos superiores indica a existência de problemas na componente do rolamento, sendo que apenas o aparecimento da primeira harmônica de um componente pode ser apenas devido à sobrecarga no rolamento, sem que este ainda esteja danificado. Analisar o surgimento de harmônicos e o aumento de suas amplitudes é interessante para saber o momento mais propício de realizar a intervenção.

Outra utilização da análise de envelope é para a detecção de bandas laterais. Por exemplo, vibrações de folgas entre mancais e pista externa de rolamentos ou entre eixo e pista interna de rolamentos podem ser diagnosticadas como sendo apenas de rolamentos defeituosos, utilizando as técnicas convencionais. O filtro de envelope extrai deste sinal de vibração as bandas laterais de 1x RPM do eixo em torno de um componente do rolamento, pois a frequência de rotação modula o sinal.

Problemas desta origem são comuns em tampas dianteiras de motores elétricos, onde às vezes trocam-se vários rolamentos sem a correção da causa do problema, devido não se trocar a tampa.

4.3.7.12 Erros cometidos na análise de vibração

Os erros mais frequentes cometidos na análise de vibração são:

- Escolha incorreta do ponto de medição.

- Não verificação das interferências ou influências provocadas pelo meio (estruturas, proximidade com outras máquinas etc.).
- Medição em condições diferentes de operação (carga e/ou rotação).
- Desconhecimento dos componentes internos (modelo dos rolamentos, números de dentes das engrenagens ou das palhetas de ventiladores etc.).
- Tentativa de medições em frequências que os sensores não podem captar (geralmente baixas frequências).
- Utilização de sensores inadequados.

4.3.7.13 Resumo de Diagnose de Falhas

Em geral, as frequências de vibração são usadas para determinar a localização de falhas em uma máquina.

O diagnóstico de falhas é principalmente realizado sobre o espectro; contudo a forma de onda, órbita, e a análise de fase fornecem informações adicionais para uma análise mais profunda.

A análise espectral inclui a identificação de ordens ou harmônicas da rotação do eixo ($1x$, $2x$, $3x$, ...); harmônicas da frequência de engrenamento, e frequência de passagem de pás, e frequências não-síncronas tais como frequências de defeito nos rolamentos, frequências de batimento, frequências naturais, bandas laterais, frequências centrais, e soma e diferença de frequências.

O eixo horizontal do espectro pode ser expresso em HZ ou CPM, ou ordens. O eixo vertical do espectro mostra o nível ou amplitude da vibração, podendo ser expresso em RMS, pico, ou pico a pico. O eixo vertical da forma de onda no tempo é expresso em unidades de pico.

As falhas nas máquinas que se manifestam na rotação de operação ou seus harmônicos (ordens) incluem velocidades críticas, desbalanceamento de massa, desalinhanamento, eixo empenado, folga ou desgaste excessivo no mancal, ressonância estrutural, excentricidade, acoplamentos presos ou travados, e distorção de carcaça ou pedestais.

O desbalanceamento de massa ocorre na frequência de rotação do rotor.

As rotações críticas ocorrem quando a rotação de operação, ou qualquer de seus harmônicos que contém energia, aproximam-se ou igualam com uma das frequências naturais.

O desalinhamento pode ocorrer na rotação de operação (1x), no segundo harmônico (2x), ou até no (3x), dependendo da natureza do desalinhamento ou mobilidade do acoplamento, eixo e mancais.

O eixo empenado pode reduzir significativamente a vibração em uma determinada velocidade em que a excitação (frequência) seja a mesma, porém com fase oposta a do desbalanceamento.

No caso de mancais de deslizamento, folgas excessivas e/ou desgaste em mancais com filme de óleo causarão vibrações semelhantes ao desbalanceamento de massa.

Ressonâncias estruturais amplificam o nível de vibração.

Folgas aparecem no espectro em 1x e seus harmônicos, e também podem aparecer em subharmônicas e inter-harmônicas ($1/4x$, $1/2x$, $1\ 1/2x$, $2\ 1/2x$, $3\ 1/2x$, ...).

Defeitos em rolamentos ocorrem nas frequências (FTF, BPFO, BPFI e BSF) e seus harmônicos. Bandas laterais da rotação do eixo (1x), frequência de giro da gaiola (1x FTF), e frequência de *Spin* (1x BSF) também podem ocorrer, dependendo do grau de severidade do defeito.

HFD, SPIKE, ENVELOPE, PEAK VUE são usados para detectar pulsos em rolamentos ou máquinas rotativas, quando os defeitos são incipientes.

Falhas em engrenagens são mostradas nos espectros na frequência de engrenamento e seus harmônicos.

Bandas laterais ocorrem quando as condições pioram.

Dente quebrado, trincado, ou com grande defeito localizado, são identificados com pulsos na forma de onda no tempo.

Engrenagens excêntricas são identificadas pelas bandas laterais na frequência de engrenamento, a frequência da banda representa a rotação da engrenagem com defeito.

Problemas em motores elétricos são identificados no espectro como bandas laterais de $2x F_s$ na rotação do motor. Grande amplitude em 120 Hz e seus harmônicos.

Barras do rotor em gaiola quebrada geram bandas laterais de $2x F_s$ em torno de 1x.

Problemas no estator e variação do *gap* de ar geram aumento dos níveis de vibração em 120 Hz e seus harmônicos.

Problemas comuns relacionados com bombas resultam de fluxo impróprio no sistema, incluindo recirculação (alta pressão) e cavitação (baixa pressão).

Vibrações na frequência de passagem de pás em bombas ocorrem se as folgas internas não são montadas corretamente.

Ventiladores podem exibir vibração na frequência de passagem de pás, se problemas aerodinâmicos ocorrem nos dutos, ou no projeto inadequado do *damper*.

Tabela 6 - Diagnósticos de Falhas Elétricas [2]

Falha	Frequência	Espectro, tempo e forma de onda órbita	Comentários
Variação no gap de ar (estática)	120 Hz	Pode haver batimento de 2x com 120 Hz (motor de 2 pólos)	Rotor fora de centro do estator. Distorção da carcaça. Folgas excessivas em mancais. Estator ovalizado.
Variação no gap de ar (dinâmica)	1x	1x e bandas laterais em 2 Fs	Eixo empenado. Eixo fora de centro do rotor.
Barras do rotor quebradas e/ou trincadas	1x	1x e bandas laterais em 2 Fs	Número de bandas aumenta com o agravamento do problema.
Rotor excêntrico	1x	1x, 2x, 120 Hz. Pode haver batimento	Causa variação no gap de ar.
Baixa rigidez do estator	120 Hz	No motor de 2 pólos pode haver batimento de 2 x com 120 Hz	Geralmente erro de projeto do motor.
Centro magnético fora da posição	1x, 2x, 120 Hz e harmônicas	Impactos na direção axial	Geralmente apresentam vibrações de altas ordens, harmônicas de 120 Hz, principalmente na direção axial.
Curtos entre espiras do estator	120 Hz e harmônicas	120 Hz e harmônicas	Geralmente há desequilíbrio entre as três fases do estator.

4.3.7.14 Uso das recomendações das normas técnicas e cartas de severidade

NORMA ISO 2372 – Vibrações Mecânicas de Máquinas com Rotação de 10 a 200 RPS, Base para Especificação de Critérios de Avaliação.

A ISO 2372 abrange máquinas de 600 a 12000 RPM e vibrações de 10 a 1000 Hz medidas em RMS e banda larga. Convém relacionar alguns pontos importantes estabelecidos pela norma:

1. A validade dos critérios mostrados é restrita às vibrações medidas na carcaça da máquina, nos mancais ou nos pontos de montagem, em uma banda de frequência de 10 a 1000 Hz e com instrumentos em consonância com normas afins.
2. As máquinas sob teste deverão estar montadas convenientemente, pois a vibração pode ser significantemente alterada. São classificadas as montagens:
 - **Montagem flexível:** permite melhor comparação entre os níveis de vibração de várias máquinas. A mais baixa frequência natural é menor do que $\frac{1}{4}$ da

menor frequência de rotação. A massa da suspensão é menor que 1/10 da massa da máquina.

- **Montagem com base rígida (base-plate):** as máquinas destinadas à montagem com base só podem ser medidas nesta situação. Existem 2 tipos de bases rígidas: mais leves que a máquina (menos que 1/4) – a base apenas enrijece a máquina e mais pesadas que a máquina (mais que 2x) – a base fixa os pés da máquina no espaço. O conjunto base- máquina é um corpo rígido que associado à suspensão deve dar a menor frequência natural 4 ou mais vezes menor que a frequência de excitação.
 - **Montagem em fundação estrutural:** usada quando as máquinas têm tamanho e tipo que não permite a montagem flexível. É importante saber que a comparação da vibração de máquina de um mesmo tipo somente é possível se as fundações tiverem características dinâmicas semelhantes. Se isto não for possível a severidade será definida para cada caso particular. Máquinas muito grandes só são testadas in situ, os princípios gerais deverão ser adequados.
3. Pela experiência, as vibrações com o mesmo valor RMS de velocidade em qualquer frequência (10 a 1000 Hz) é geralmente considerada de mesma severidade. Uma variação de 1:1.6 na vibração (4 dB) provoca um efeito significativo na resposta da máquina, daí surgiu os níveis de severidade da norma. Ver tabela 7.

Tabela 7 – Faixas de severidade de vibração (10 a 1000 Hz) [2]

Classificação	Faixa de Velocidade (RMS)		dB ref. 10 ^{exp(-6)}	
	acima de	até	acima de	até
0,11	0,071	0,112	97	101
0,18	0,112	0,18	101	105
0,28	0,18	0,28	105	109
0,45	0,28	0,45	109	113
0,71	0,45	0,71	113	117
1,12	0,71	1,12	117	121
1,8	1,12	1,8	121	125
2,8	1,8	2,8	125	129
4,5	2,8	4,5	129	133
7,1	4,5	7,1	133	137
11,2	7,1	11,2	137	141
18	11,2	18	141	145
28	18	28	145	149
45	28	45	149	153
71	45	71	153	157

A norma ISSO 2372 propõe a classificação das máquinas em 5 grupos, dispondo de muitas informações e experiência sobre os 4 primeiros. Os grupos são:

- GRUPO K – Classe I – Partes individuais de motores e máquinas integralmente conectadas à máquina completa em sua condição normal de operação. Motores elétricos de até 15 kW são exemplos típicos deste grupo.
- GRUPO M – Classe II – Máquinas médias (tipicamente motores elétricos de 15 kW a 75 kW) sem fundações especiais, motores rigidamente montados ou máquinas de até 300 kW em fundações especiais.
- GRUPO G – Classe III – Grandes motores de acionamento e outras máquinas grandes com massas rotativas em fundações pesadas e rígidas, as quais são relativamente rígidas na direção da medida da vibração.
- GRUPO T – Classe IV – Grandes motores de acionamento e outras máquinas grandes com massas rotativas montadas em fundações flexíveis, as quais são relativamente flexíveis na direção da medida da vibração (por exemplo, conjuntos turbo - geradores especialmente aqueles com estruturas leves).
- CLASSE V – Máquinas e sistemas de acionamento mecânico com esforços de inércia de desbalanceamento (partes alternativas) montado em fundações relativamente rígidas na direção da medida da vibração.
- CLASSE VI – Máquinas e sistemas de acionamento mecânico com esforços de inércia devido à partes alternativas, montadas em fundações relativamente flexíveis na direção da medida da vibração; máquinas com pêndulos rotativos tais como martelos de moinho; máquinas com desbalanceamento variável (tais com centrífugas) capazes de girar como unidade auto-contida sem componentes de conexão; calhas vibratórias, máquinas de teste de fadiga e excitadores de vibração usadas em processos industriais.

Os limites propostos pela ISO 2372, VD12056 e B54675.

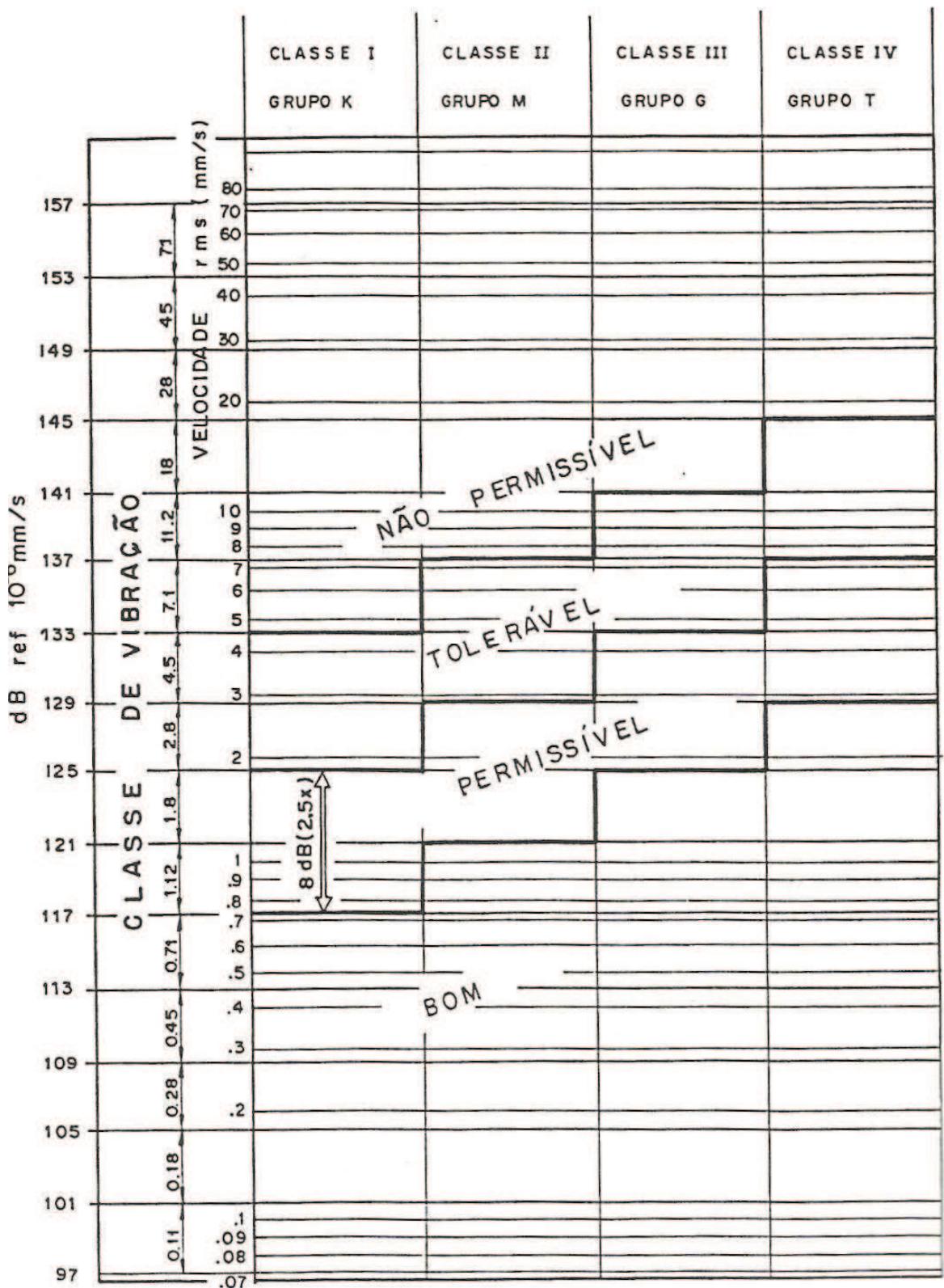


Figura 79 – Carta de Severidade Proposta pela ISO 2372, VD12056 e B54675 [2]

1. Gráfico de Severidade de Vibrações

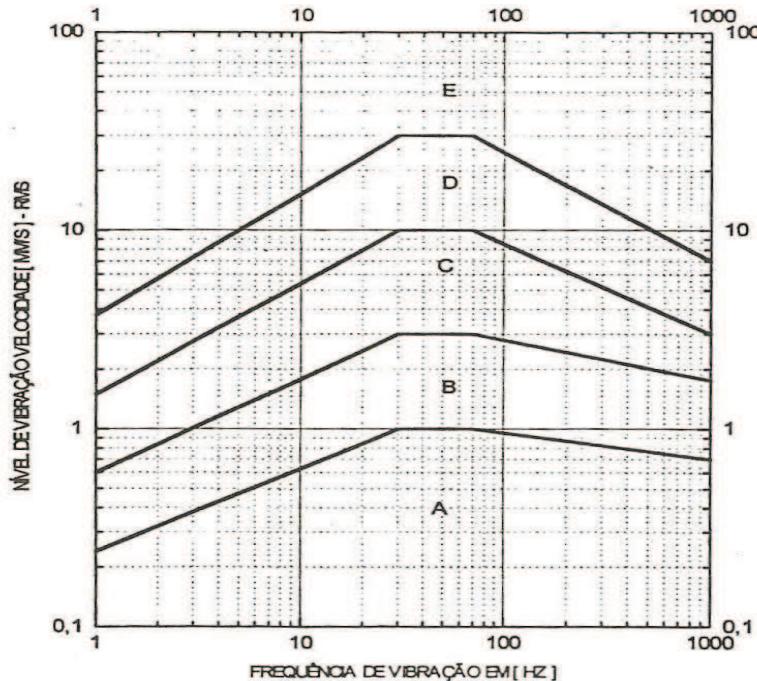


Figura 80 - Gráfico de Severidade de Vibrações [2]

Legenda:

- A – Máquinas Novas – Sem defeito
- B – Máquinas com pequenos problemas
- C – Máquinas com defeito – Corrigir
- D – A falha está próxima – Corrigir com frequência
- E – Perigo – Parada imediata

OBS: Severidade de vibrações para máquinas rotativas, tais como: motores elétricos; bombas, ventiladores, exaustores, compressores rotativos, turbinas etc. excitadas por desbalanceamento e/ou desalinhamento.

4.4 ENSAIOS DIELÉTRICOS

4.4.1 Resistência de isolamento

A técnica é a medição da corrente de fuga da isolação elétrica a partir da aplicação de tensão – V_{DC}, permitindo calcular a resistência do isolamento do equipamento. Permitem monitorar o estado de conservação da isolação, através da análise das características do

material isolante dos equipamentos elétricos – disjuntores, transformadores, motores, geradores, cabos etc.

Os fatores que afetam a resistência de isolamento:

- **Condições da Superfície do Isolamento** – sujeira, pó, poeiras abrasivas ou corrosivas etc.
- **Umidade** – se a temperatura do isolamento for menor que o ponto de condensação do vapor d'água presente no ar, a umidade é “carregada” para a superfície e vai ser um fator preponderante na queda do valor da resistência de isolamento.
- **Temperatura** – a resistência de isolamento cai se a temperatura de isolamento aumentar. O limite é a temperatura para operação de acordo com a classe do material isolante. Portanto, quando adotamos como técnica preditiva de manutenção elétrica a avaliação da resistência de isolamento, devemos usar tabelas para converter os resultados para uma temperatura de referência, e só então comparar os valores encontrados nos ensaios com aqueles recomendados pelas normas.
- **Tensão do Ensaio** – a resistência de isolamentos secos e em boas condições deve variar pouco com a variação da tensão de ensaio. Caso ela caia com o aumento da tensão, pode ser sinal de fratura do isolamento ou apenas presença de sujeira ou umidade.
- **Duração do Ensaio** – a resistência de isolamentos secos e em bom estado geralmente cresce com o aumento do tempo de aplicação da tensão de ensaio. As técnicas geralmente preconizam a aplicação da tensão por tempo suficiente para que a corrente de fuga se estabilize e possamos levantar os Índices de Absorção e Polarização.
- **Efeito da Carga Residual** – com sucessivos ensaios de tensão para determinar a resistência de isolamento, o efeito da carga residual vai afetando a real avaliação da corrente e fuga para a tensão aplicada. É recomendado, portanto, descarregar o isolamento, aterrando os terminais do isolamento ao cada fim de ensaio, tanto como medida de segurança como para minimizar esse efeito.

4.4.1.1 Ensaios de resistência de isolamento para avaliação da isolação

1. Resistência de isolamento a 1 minuto

Esse ensaio é preconizado por muitas normas e para muitas aplicações. Consiste em aplicar uma tensão VDC compatível com a classe de tensão da isolação e efetuar a medição da resistência de isolamento após 1 minuto. Seu resultado deve ser comparado pela tendência da curva de valores de sucessivos ensaios.

2. Resistência de isolamento x tempo

Esse ensaio é baseado no efeito da absorção do bom isolamento comparado com um isolamento que se desconfia estar úmido ou contaminado. Seu resultado independe da temperatura e, normalmente, é avaliado pelos Índices de Absorção Dielétrica e de Polarização.

O método consiste:

- Em aplicar a VDC constante, no valor adequado à classe de tensão da isolação, e fazer leituras aos 15, 30, 45 e 60 segundos e a cada minuto até completar-se 10 minutos.
- Plotar a curva das medições em papel log-log.
- Calcular o índice de Polarização

3. Ensaio de resistência de isolamento multitensão

Nesse método, aplicar ao isolamento 2 tensões diferentes com relação 1:5 (500 e 2.500 V, por exemplo). Cuidado com a seleção da tensão do ensaio para não ultrapassar o valor nominal da classe de tensão do isolamento do equipamento.

Para isolações estão em bom estado, às resistências de isolamentos deverão ter valores muito próximos nas duas tensões de ensaio. Uma diminuição na resistência de isolamento de 25% com a tensão mais elevada em relação a mais baixa pode ser sinal de presença de umidade e/ou contaminantes na isolação.

A relação entre as duas resistências também é conhecida como IAD - Índice de Absorção Dielétrica. Então, de modo geral, os valores adequados do Índice de Absorção são dados por:

$$I_{Ad} = \frac{R_{isolamento} 500V}{R_{isolamento} 2.500V} < 1,25$$

4. Ensaio com tensão acima da nominal

Esse ensaio deve ser realizado apenas se a resistência de isolamento ou o Índice de Polarização for maior que o mínimo esperado. O ensaio detecta isolamentos secos ou quebradiços e danos físicos em máquinas novas e recondicionadas operando sob regimes severos. A máxima tensão de ensaio deve ser:

- **Equipamentos novos:** Ensaio em fábrica - $(2 \text{ kV} + 1) \times 1,7$

Ensaio no local de operação - $(2 \text{ kV} + 1) \times 1,7 \times 0,8$

- **Equipamentos em uso:** Tensão de Ensaio – $1,25 \text{ a } 1,5 \times \text{kV} \times 1,7$

Onde, kV é a classe de tensão e 1,7 é o fator de conversão entre V_{CA} e V_{DC}

4.4.2 Índice de absorção dielétrica

A presença de umidade na isolação afeta sensivelmente o valor de sua resistência de isolamento e que esta pode ir se degenerando até o ponto de não mais conseguir deter a corrente de fuga e provocar um curto-circuito.

Uma indicação simples e eficiente do grau de umidade absorvida pela isolação é baseada na razão da variação da medida da resistência de isolamento durante o tempo de aplicação da tensão no período de ensaio.

Um isolamento com umidade ou com a isolação contaminada mostrará uma variação mínima do valor de resistência durante o período de ensaio, enquanto que uma isolação boa deverá apresentar uma variação acentuada do valor de resistência de isolamento durante o mesmo período do tempo.

Uma informação muito útil sobre o estado do isolamento fornecida pelo fator obtido pela razão das resistências de isolamento obtidas com 60 e 30 segundos de ensaio.

Esse fator é chamado de I_{AD} - Índice de Absorção Dielétrica deve ser sempre positivo e com valores crescentes na medida em que a isolação esteja em bom estado.

$$I_{Ad} = \frac{R_{\text{isolamento de 60 segundos}}}{R_{\text{isolamento de 30 segundos}}}$$

Exemplos de valores de I_{AD} para cabos elétricos:

I_{AD} < 1,1 – isolação pobre e fraca

I_{AD} > 1,6 – isolação em excelente estado

4.4.3 Índice de polarização

O IP - Índice de Polarização também é obtido a partir de cálculos efetuados com as leituras obtidas no ensaio de resistência de isolamento e é definido como:

$$Ip = \frac{R_{\text{isolamento de 10 minutos}}}{R_{\text{isolamento de 1 minuto}}}$$

No cálculo do Índice de Polarização, para a correção dos valores de resistências de isolamento para 70°C (ABNT), recorre-se a fórmula: $R_{\text{isolamento}(70^{\circ}C)} = R_{\text{isolamento}(\theta^{\circ}C)} \times (0,5)^a$

Onde: $a = \frac{70^{\circ}C - \theta^{\circ}C}{10}$ e $\theta^{\circ}C$ = temperatura do ensaio

Quanto maior o valor do IP melhor o estado da isolação. Valores do Índice de Polarização menores que 1 são perigosos e o limite superior varia com o tipo de equipamento.

Por exemplo, valores de IP para isolação em bom estado:

- Cabos Elétricos – IP > 4
- Máquinas Rotativas – IP > 3
- Motores Comuns – IP > 2
- Transformadores – IP > 2

4.4.4 Fator de potência da isolação

Ensaio que analisa a isolação elétrica a partir da avaliação das características do material isolante com aplicação de tensão alternada V_{CA} .

Pelo fator de perdas dielétricas – ou dissipação, da isolação podemos analisar a isolação elétrica a partir da avaliação das características do material isolante com aplicação de tensão V_{CA} .

O Fator de Potência ou Fator de Perdas é a relação entre as perdas de potência ativa (W) e a potência total (VA) ao qual o isolamento é submetido, calculado em %.

$$fp (\%) = (W / VA) \times 100$$

Quanto menor o valor do fp , em %, melhor o estado da isolação. Por exemplo, para transformadores o valor do fp deve ser < 1%.

4.5 ANÁLISE DE CORRENTE E ANÁLISE DE FLUXO MAGNÉTICO

4.5.1 Introdução

Quando uma máquina desenvolve uma falha, ela apresenta indícios de defeitos de várias formas: mudanças nos sinais de vibrações, variação na temperatura, ruídos e alterações no campo eletromagnético.

Os motores de indução trifásicos são largamente utilizados nos acionamentos de bombas, compressores, ventiladores, equipamentos para processamento e manuseio de cargas e em várias outras diferentes aplicações na indústria, devido à sua solidez e versatilidade. Embora as máquinas rotativas sejam usualmente bem construídas e robustas, a possibilidade de defeitos incipientes é inerente. Defeitos incipientes dentro das máquinas geralmente afetam o seu desempenho antes mesmo que falhas significativas ocorram. A detecção de defeitos quando estão ainda em fase de desenvolvimento, através da comparação de espectros de fluxo magnético, vibração e corrente elétrica, possibilita o planejamento de uma ação corretiva com relação ao defeito previsto.

A confiabilidade exigida para os motores elétricos crescem constantemente devido à importância de suas aplicações e do avanço tecnológico.

O diagnóstico de defeitos a partir da análise de fluxo magnético tem sido proposto por fabricantes de equipamentos da área de monitoramento de máquinas. Através de estudos preliminares já realizados, constataram-se algumas vantagens em relação às técnicas convencionais de análise de corrente, como por exemplo, a não necessidade do conhecimento da carga do motor e do número de barras e ranhuras para a detecção de curto-circuito entre espiras.

Segundo Timperley [36], por definição os motores elétricos produzem fluxo magnético. Qualquer desbalanceamento no fluxo magnético ou no circuito elétrico é refletido no fluxo transmitido axialmente. As principais causas da mudança de características da simetria são: barras quebradas do rotor, desequilíbrio de fases e anomalias nos enrolamentos do estator: curto entre espiras e curto entre as fases.

Segue abaixo descrição das técnicas preditivas em motores elétricos.

4.5.2 ESA - Electrical signature analysis – Análise da assinatura elétrica

Este serviço técnico consiste na aquisição de sinais de tensão e corrente de motores elétricos energizados e rodando com, no mínimo, 25% da carga nominal. Essa aquisição é feita a partir do painel elétrico de força do motor e um coletor que é utilizado para a gravação de dados. A análise desses sinais no domínio do tempo e de suas componentes em frequência e amplitude e é feito por meio de um *software*.

A Análise da Assinatura Elétrica possibilita o diagnóstico de defeitos ou falhas, tanto elétricos quanto mecânicos, em motores elétricos. Ela avalia a condição da energia de entrada, do motor e da carga/acoplamento podendo diagnosticar:

- **Energia de entrada:** sobrecorrente, variação de corrente entre fases, THDF (*Total Harmonic Derating Factor*), sobretensão, subtensão, variação de tensão entre fases, VDF (*Voltage Derating Factor*), fator de potência, impedância, potência ativa, potência reativa, potência aparente, distorção harmônica na corrente e na tensão (harmônicos pares, ímpares, positivos, negativos e nulos), distorção harmônica total e espectro harmônico.
- **Motor elétrico:** falhas no rotor (barras trincadas ou quebradas, juntas com alta resistência e trincas nos anéis de curto-circuito), estator (defeitos/falhas elétricos e mecânicos), excentricidade estática, excentricidade dinâmica, desalinhamento ou desbalanceamento e problemas nos rolamentos (pista interna, pista externa, trem/gaiola e esferas).
- **Carga/acoplamento:** polias e correias, caixas de engrenagens, ventiladores e rolamentos (pista interna, pista externa, trem/gaiola e esferas). Para o diagnóstico de problemas para esses componentes são necessários alguns dados básicos sobre os mesmos: diâmetro externo da polia motora e da polia movida, distância entre centros dessas polias, número de dentes de cada engrenagem, número de pás do ventilador e código dos rolamentos.

A ESA pode ser utilizada em motores de indução, acionados ou não por inversores de frequência (com rotor bobinado ou em gaiola de esquilo), de corrente contínua, síncronos e geradores. É importante frisar que a Análise de Assinatura Elétrica é uma técnica não-invasiva e pode monitorar motores instalados em áreas ou locais de difícil acesso, pois a coleta de dados é feita a partir do painel elétrico de força do motor com uso de alicates amperímetros.

4.5.3 MCA - Motor circuit analysis – Análise de circuito de motores

É uma técnica que utiliza as informações de resistência, impedância, ângulo de fase, resposta em frequência de corrente e isolação para a terra, tomados com o motor desligado para a detecção de avarias no motor.

A aquisição de dados é feita a partir do painel de força do motor elétrico ou no próprio motor (caso esteja em um almoxarifado ou oficina, por exemplo) e é utilizado um coletor para gravação de dados e a análise é feita por meio de *software*. Configura-se como uma técnica *off-line* e estática, sendo por vezes classificadas como técnica preventiva e não preditiva.

Utiliza a avaliação da tendência das grandezas medidas, ou seja, periodicamente são registrados os valores para, em seguida, fazer a avaliação das condições atuais e quando é necessária uma possível intervenção.

Faz-se a leitura do enrolamento de campo, caso seja um motor *compound* ou *shunt*, e posteriormente duas leituras da armadura, para que se elimine, ou pelo menos minimize o efeito da contaminação no motor, como por exemplo, por carbono, que pode se manifestar por capacidades instáveis entre as espiras, ou entre condutores e terra.

Na tendência, a resistência deve ser normalizada para valores condizentes com a temperatura ambiente e não deve mudar mais do que 3%. Mudanças na impedância e na indutância, as quais não necessitam de correção na temperatura, também não devem variar mais do que 3% entre leituras.

As leituras de ângulo de fase e de resposta em frequência da corrente não necessitam de correção em relação à temperatura, não sofrendo mudanças de mais do que um ou dois dígitos entre ensaios consecutivos. Caso isto esteja ocorrendo, é sinal de que há uma falha de isolação.

A análise de circuito de motores possibilita o diagnóstico de falhas elétricas nos cabos, nas conexões, no estator e no rotor de motores elétricos podendo diagnosticar:

- **Cabos:** diferenças nos comprimentos e rompimentos.
- **Conexões:** frouxas ou com mau contato.

- **Estator:** impregnação ou sobreaquecimento do bobinado, curtos-circuitos internos (entre espiras, entre bobinas de mesma fase e entre bobinas de fases diferentes) e curto-circuito de fase para terra.
- **Rotor:** barras trincadas ou quebradas, porosidade e excentricidade estática.

A análise de circuito de motores pode ser utilizada em motores de indução com rotor bobinado ou gaiola de esquilo, motores de corrente contínua, motores síncronos e geradores.

É importante frisar que a análise de circuito de motores é uma técnica não-destrutiva e pode monitorar motores instalados em áreas e locais de difícil acesso, pois a coleta de dados pode ser feita a partir do painel elétrico de força do motor.

Essa técnica é bastante difundida e consolidada no mercado, sendo atualmente a principal ferramenta de avaliação da parte elétrica dos motores existentes no parque industrial. Exige que se faça acompanhamento de histórico e comparação de assinaturas, não sendo possível a tomada de decisões somente baseada em poucas leituras.

Uma desvantagem é que não permite avaliação do motor em operação. Necessita-se programar a sua realização em manutenções com o motor desligado sendo, por isso, chamada de ensaio estático da máquina.

4.5.4 Técnica de MCSA - *Motor current signature analysis* - análise de assinatura de corrente do motor

MCSA é a técnica de comparação de assinaturas, usada para analisar e acompanhar a tendência de sistemas energizados dinâmicos, sendo, por isso, também chamado de ensaio dinâmico, em contrapartida ao MCA, que é um teste estático.

A análise apropriada dos resultados da aplicação da técnica auxiliará a equipe de manutenção preditiva na identificação de diversos problemas relacionados a componentes eletromecânicos do motor, de sua forma de transmissão e até de sua carga.

Assim, a MCSA mesma é definida de acordo com Bonaldi [7] como:

Uma técnica não-invasiva de diagnóstico de problemas em motores de indução trifásicos, que consiste da utilização da análise espectral do sinal de corrente de uma das fases do estator. Quando

um defeito ou falha está em desenvolvimento, o espectro de frequência da corrente se torna diferente do espectro do motor quando em boas condições de operação. Tais ocorrências modulam o air-gap e produzem frequências harmônicas na auto-indutância e indutâncias mútuas da máquina. Uma vez que o fluxo oscila somente na frequência de alimentação, estas indutâncias harmônicas resultam em bandas laterais da frequência de linha.

Penrose [25] explica que esta técnica utiliza o motor como um transdutor, permitindo que o usuário avalie a condição elétrica e mecânica a partir de alimentação, consistindo basicamente na monitoração da corrente de alimentação do motor. Um sistema simples e suficiente para a implementação da técnica apresentado na figura 81.



Figura 81 - Sistema Básico para Análise Espectral da Corrente [7]

Como mostra a figura 81 o sinal de corrente do motor é analisado para produzir o espectro de corrente, normalmente referenciado como ‘assinatura de corrente do motor’. De acordo com Penrose [25] o objetivo é obter tal assinatura para se identificar a magnitude e frequência de cada componente individual que constitui o sinal de corrente do motor. Isso permite que padrões na assinatura da corrente sejam identificados para diferenciar motores saudáveis de motores em defeito/falha e ainda detectar em que parte da máquina o defeito/falha deve ocorrer.

As frequências características das falhas, que permitem diferenciar um motor saudável de um com uma avaria em desenvolvimento, são conhecidas e muitas estão bem documentadas em diversos trabalhos e em especial nos trabalhos desenvolvidos em Bonaldi [7] e Penrose [25]. De posse das frequências a serem investigadas na análise, procede-se com a mesma, conforme o fluxograma apresentado na figura 82.

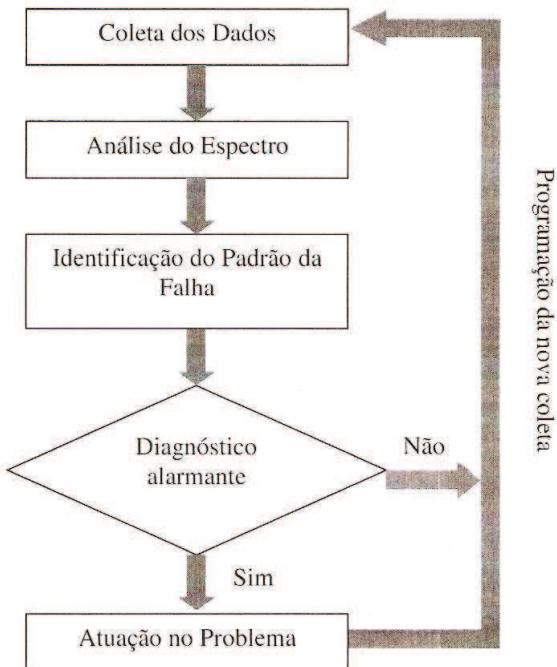


Figura 82 - Fluxograma da Análise [7]

Entretanto, é importante ressaltar que o diagnóstico é algo que envolve decisões por vezes de parar o processo produtivo para realizar a atuação (manutenção corretiva). Conforme é explicado em Bonaldi [7], esse processo decisório exige experiência do analista que faz um histórico do comportamento do conjunto (motor, sistema de transmissão e carga). Por esta razão, um sistema de diagnóstico automático que alie o histórico do motor ao conhecimento do especialista encontra um nicho de mercado bastante promissor. Desta forma, o sistema de análise e diagnóstico automático já não é tão simples como o modelo apresentado na figura 81, e pode ser apresentado da seguinte forma:

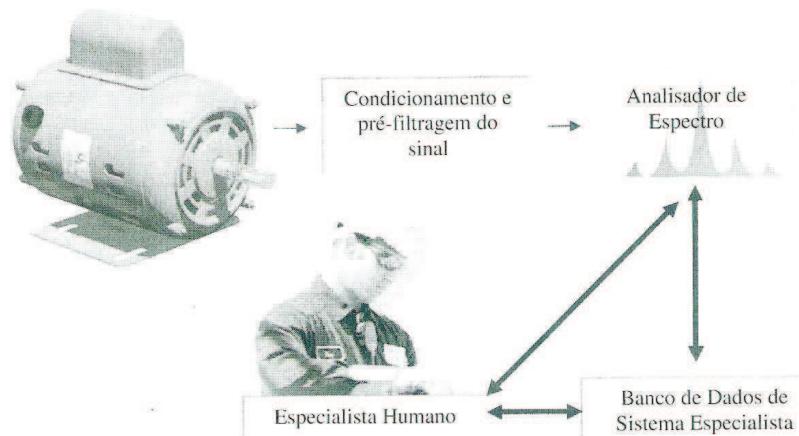


Figura 83 - Integração de um Sistema de Diagnóstico Automático [7]

Uma vez feita à coleta do sinal, o mesmo passa por um condicionamento e pré-filtragem, para que então possa ser analisado em sua forma espectral por um especialista humano e também alimentar o 'banco de dados' que será utilizado por um sistema especialista, que fará o diagnóstico automático.

4.5.4.1 Aplicação de MCSA em motores de corrente contínua

De acordo com Penrose [25], o que se avalia com a análise da assinatura de corrente em equipamentos de corrente contínua não é o sinal completo, mas sim o *ripple* resultante da retificação AC, constituindo dessa forma uma análise AC sobre um sinal DC. A fundamentação que justifica isso é, conforme explicitado em Penrose [25]:

"A conversão de corrente contínua alternada para corrente contínua resulta em um valor constante com corrente alternada em seu topo, formando o fator de potência. No mesmo, devem existir dois sinais primários: harmônicos de baixo nível, dados pela frequência de linha (60 Hz), e a frequência dos SCR, geralmente em número de 6 em um sistema trifásico, multiplicados pela frequência de linha, resultando geralmente em 360 HZ".

O *ripple* da onda é a componente remanescente do sinal AC, apresentando-se em todas as componentes em frequência do sinal original, inclusive nas de interesse para a caracterização das falhas em motores de corrente contínua, sendo seu uso, desta forma, justificado para se visualizar a 'assinatura de corrente' nesses motores.

A figura 84, obtida a partir dos dados coletados em campo, explicita o que foi levantado por Penrose [25]: a utilização do *ripple* para se colher a assinatura de corrente do motor e que sustenta a sua utilização para caracterização de falhas por meio da técnica de MCSA. A figura 84 mostra a presença das componentes de 60 Hz (da linha) e de 360 Hz (do retificador), além de outras componentes no espectro de frequências que poderão caracterizar as assinaturas de falhas de motores, como será visto adiante.

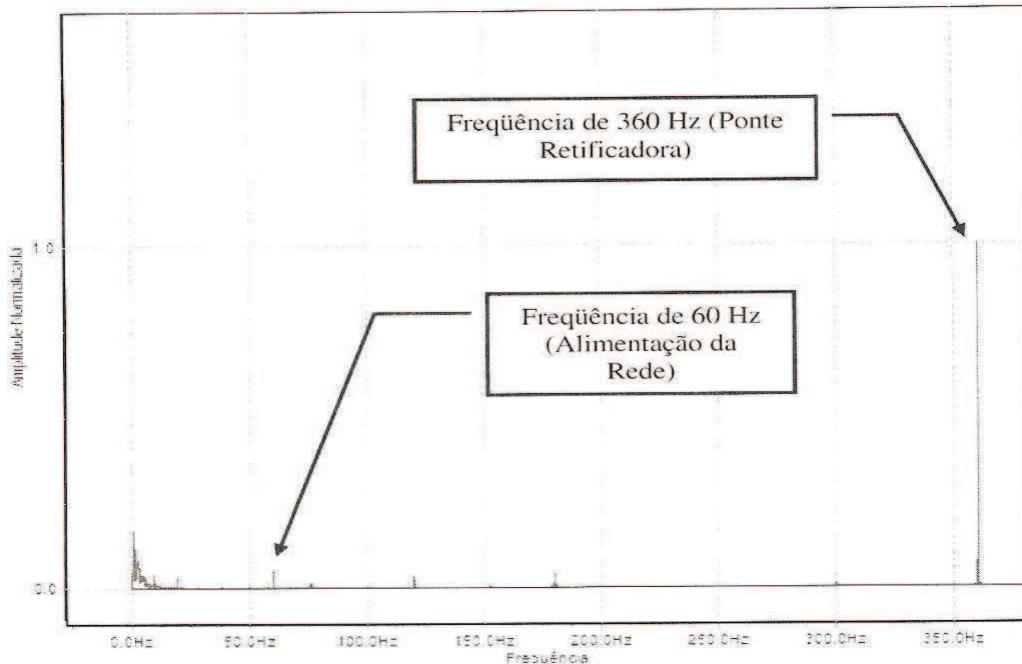


Figura 84 - FFT do Ripple de um Sinal de Corrente para Motor DC [23]

Embora se tenha a presença das harmônicas do sistema de alimentação, vê-se que o sinal apresentado é bastante semelhante ao normalmente utilizado em motores de indução trifásicos para a análise de MCSA.

4.5.4.2 Padrões e características das falhas

De forma análoga à análise de vibrações, grande parte dos esforços hoje desenvolvidos em MCSA é na determinação de padrões de falhas que auxiliem os especialistas na análise de determinados equipamentos.

Esses padrões auxiliam na interpretação de assinaturas, tanto no caso da utilização para acompanhamento de tendência de históricos onde pode se acompanhar o degradamento de um determinado sistema, como também em *troubleshooting*, onde o mesmo tem que tomar decisões baseadas somente na avaliação de uma só coleta do equipamento - devendo-se para isso avaliar o mesmo equipamento por outras técnicas que não MCSA.

Com o intuito de se organizar a apresentação dos padrões de falha, propomos a divisão das falhas em três grupos principais: falhas no motor, falhas no sistema de transmissão e na carga acoplada. Dessa forma, utilizando-se o motor como transdutor, pode-se monitorar o conjunto completo, motor mais carga acoplada.

Viu-se que a aplicação da técnica MCSA é bastante ampla, sendo, por exemplo, suficiente para realizar a manutenção preditiva em sistemas baseados em motores assíncronos, pois pode detectar tanto falhas mecânicas como também elétricas relacionadas.

Entretanto, ao se analisar os padrões de falhas existentes em máquinas de indução vê-se que os mesmos não podem ser transportados para Mcc – Motor de Corrente Contínua, pois utilizam o escorregamento como fator básico de análise – conforme pode ser visto em Bonaldi [7] e Oliveira [23].

Como máquinas de corrente contínua o desenvolvimento das falhas não influencia o espectro modulando-se a fundamental, e sim refletindo na forma de múltiplos de rotação, tem-se que os padrões de Mcc possuem a mesma base dos padrões da análise de vibrações, como enfatizado por Penrose [25].

1. Falhas elétricas

O trabalho de Penrose [25] apresenta resultados bastante interessantes de MCSA aplicados a Mcc, investigando os efeitos na assinatura de corrente de diversas falhas consideradas bastante comuns, tais como curto-circuito entre espiras (tanto no circuito de campo quanto da armadura), posicionamento do porta-escovas, escovas desgastadas etc.

Em Penrose [25], a primeira falha apresentada é o curto-circuito entre espiras ou entre barras do comutador, geralmente em decorrência do acúmulo de carbono proveniente das escovas. Para simular o pior caso, provocou um curto-circuito entre as barras na armadura do motor, para então coletar o sinal com o motor rodando, chegando aos sinais apresentados nas figuras 85 e 86 - dados no domínio do tempo.

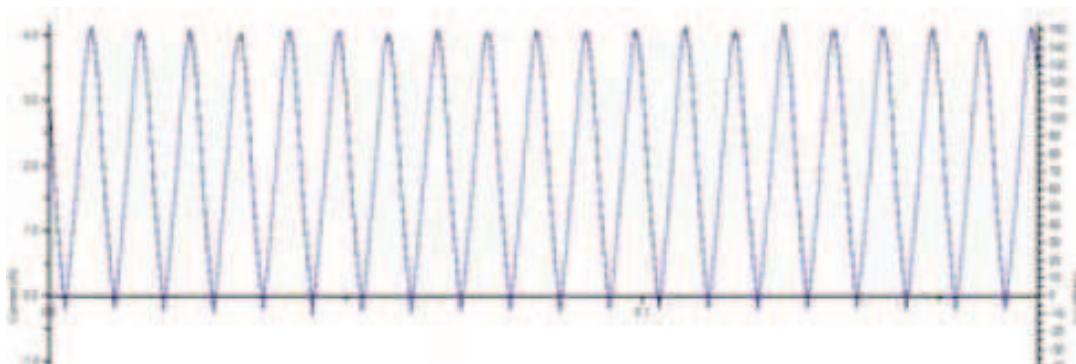


Figura 85 - Forma de Onda de Corrente sem Falha Provocada [25]

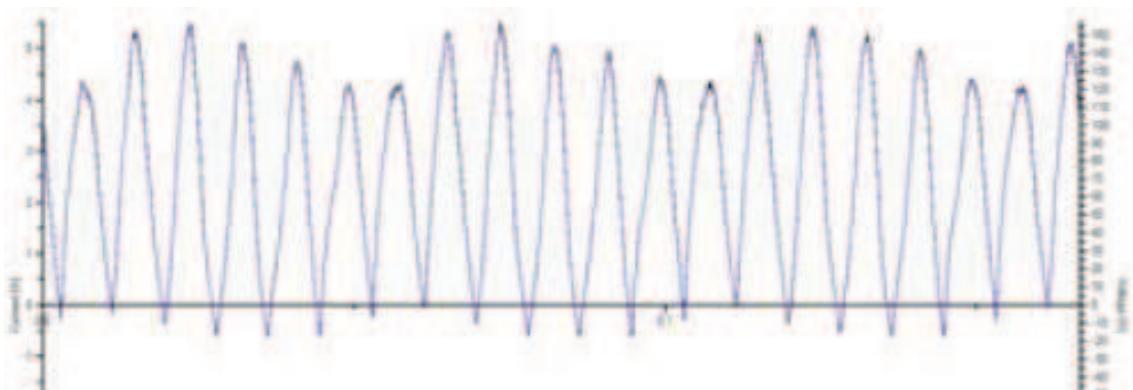


Figura 86 - Forma de Onda de Corrente na Presença da Falha [25]

Vê-se pelos gráficos das figuras 85 e 86 que a forma de onda do sinal sem falha é diferente do sinal com falha, pois no primeiro caso os picos estão alinhados, enquanto que no segundo não estão. O critério adotado é basicamente estabelecer a diferenciação visual entre os sinais, utilizando critérios como número de picos, amplitude e suas localizações no gráfico de domínio da frequência, tal como dado pelas figuras 87 e 88, dos exemplos apresentados anteriormente.

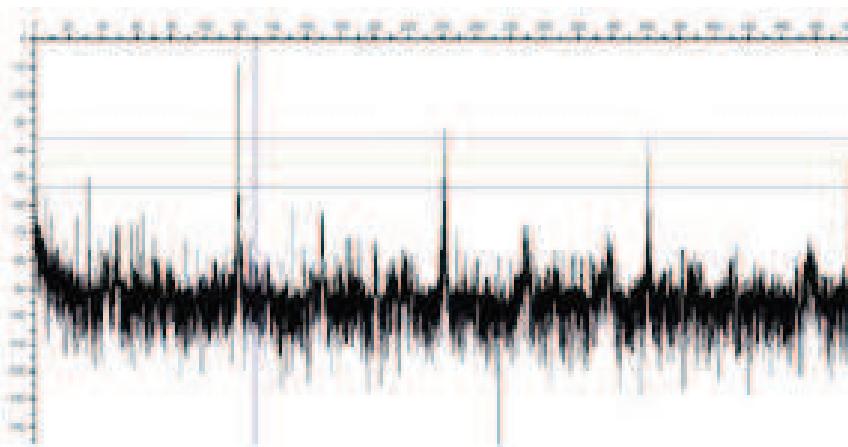


Figura 87 - Espectro de Corrente sem a Falha Provocada [25]

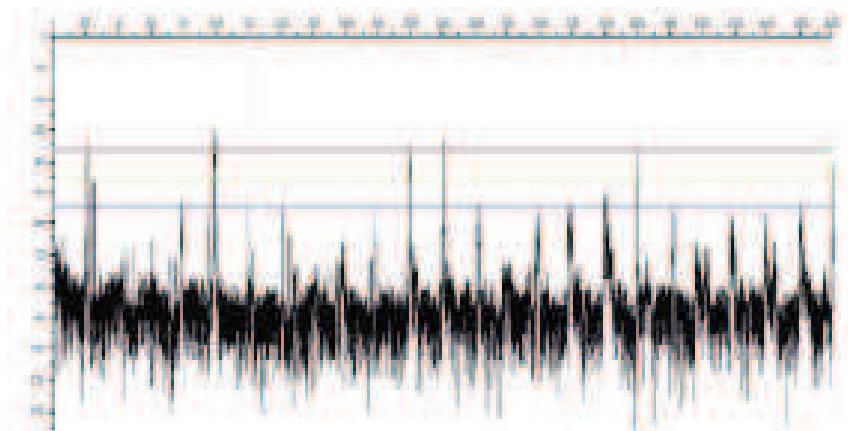


Figura 88 - Espectro de Corrente na Presença da Falha [25]

As figuras 87 e 88 demonstram como a técnica MCSA pode ser utilizada para a caracterização de falhas comuns em máquinas de corrente contínua. A falha apresentada aparece como uma modulação de aproximadamente 17 Hz no espectro analisado.

2. Falhas mecânicas em rolamentos

Em relação às falhas mecânicas, procura-se embasar este estudo para as falhas a serem estudadas nos testes laboratoriais, no caso de análise de rolamentos, o que abrange 40% das falhas de máquinas.

Um rolamento pode entrar em falha por diversos fatores, como por exemplo, sobrecarga, carga axial, montagem mal executada etc. (ver 4.3.7.6) No entanto, essa falha pode se desenvolver em partes específicas do mesmo, desenvolvendo frequências específicas na análise de vibrações e também na corrente.

Na análise de assinatura da corrente, a frequência de rotação (Fr) pode aparecer em evidência quando há uma falha no rolamento, pois a falha em questão pode gerar a variação de torque a rotação da máquina em análise.

4.5.4.3 Conceitos e ferramentas empregadas

A técnica se baseia na aquisição da corrente através de um transdutor no condicionamento dos sinais coletados, e na posterior avaliação no domínio de frequência do sinal. Para isso utiliza-se a FFT - Transformada de Fourier.

Dentre as questões mais importantes relacionadas à aquisição e processamento dos sinais destacam-se:

- **Faixa de frequência:** de acordo com Bonaldi [7], a resposta em frequência normalmente necessária em MCSA é de 5 kHz para que se possa ter a resolução espectral para se realizar a análise de assinatura de corrente em MIT – Motor de Indução Trifásico, sendo necessário utilizar transdutores com faixa de passagem de, no mínimo, 10 kHz. A mesma condição foi utilizada em MCC, embora neste estudo não se abranja problemas relacionados à excentricidade de rotores destes motores.
- **Teorema de Nyquist:** esse teorema afirma que para representar um sinal quaisquer amostrados a ser reconstruído sem perdas de suas frequências constituintes devem ser

retiradas amostras com o dobro da frequência máxima deste sinal. Na prática usa-se 10 vezes a frequência máxima para garantir boa precisão.

Resolução: Dada pela distância entre duas raias espectrais, ou por:

$$\Delta f = fs / N$$

Onde: Δf = frequência espectral, fs = frequência de amostragem utilizada e N = número de amostras.

A resolução empregada em MCSA deve ser bastante alta para viabilizar a separação das componentes de interesse, principalmente na ocorrência de um escorregamento muito baixo, quando utilizado em motores de indução, ou *ripples* muito baixos quando empregados em motores DC.

O uso da escala em dB - conforme Bonaldi [7], ao contrário da análise de vibração, MCSA muitas vezes utiliza a escala em dB para a análise de severidade da falha, pois a mesma facilita a caracterização da assinatura da falha a ser localizada, visto que a amplitude da componente fundamental da rede é muito maior que as amplitudes das componentes de falha, ficando inviável a comparação dessas frequências numa escala linear.

4.5.4.4 O procedimento de avaliação

Conforme é explicado por Bonaldi e Oliveira [6], assim como ocorre na análise de vibrações, a análise da corrente deve ser feita dentro do contexto de manutenção preditiva, ou seja, levantamento de históricos, comparação de assinaturas e acompanhamentos de tendências.

Desta forma, deve-se seguir um plano de monitoramento rotineiro com condições pré-estabelecidas de coleta, levando-se em consideração a condição de operação da máquina monitorada, seus dados construtivos e as informações do processo no qual está inserida. Procedendo-se dessa forma, basta acompanhar os sinais coletados e buscar por variações em suas características, pois quando as falhas se desenvolvem, o padrão do sinal é alterado e se torna possível, na maioria das vezes, identificar o que se alterou no sinal e que tipo de problema tem o conjunto rotativo monitorado.

Se o conjunto monitorado não apresenta falhas, e isso incluir a alimentação na análise elétrica, o padrão não muda. De acordo com Bonaldi e Oliveira [6], caso as falhas se

desenvolvam, o padrão se altera e a análise espectral aponta a localização do problema. Como a base do sucesso do diagnóstico reside na formação de um bom histórico de sinais, a severidade será definida em função de quanto rápido o padrão está variando.

Tendo o histórico formado e bem organizado, o analista levará apenas alguns minutos para emitir o laudo, reforçando o potencial de diagnóstico da técnica. A ferramenta fundamental que facilita o trabalho do analista é a curva de tendência, pois apresenta a evolução do problema no tempo e se torna a base de um bom trabalho de manutenção preditiva.

A abordagem da análise da condição, segundo o contexto da manutenção preditiva, é a forma recomendável de se proceder e de se obter os melhores resultados. São comuns os casos em que a própria empresa solicita coletas e análises pontuais. Nesses casos uma coleta é efetuada e tenta-se inferir qual o problema da máquina. Esse processo é conhecido como *troubleshooting* e, para ser executado corretamente, deve envolver a aquisição maciça de informações e dados. Normalmente várias técnicas devem ser empregadas conjuntamente (análise elétrica, vibração em vários pontos, termografia etc.), o que se torna esse processo bastante custoso e demorado, normalmente um dia ou mais para se medir apenas uma máquina. Além desses fatores de tempo de execução e custo, o resultado da análise depende muito da experiência do analista. Embora, um analista experiente possa identificar alguns tipos de falha com esse tipo de abordagem, sem o histórico da máquina fica muito difícil decidir o que fazer com toda a informação coletada. Por exemplo, a máquina pode estar operando por vários anos na condição levantada pelo *troubleshooting*. Como não se tem o histórico da máquina, pode-se efetuar uma parada desnecessária e desperdiçar recursos financeiros, sem necessidade.

A fim de padronizar e facilitar a aplicação da técnica de MCSA, o trabalho de Bonaldi e Oliveira [6] estabelece um critério que servirá como base para a escolha do procedimento. O mesmo classifica os motores em:

- **Tipo I:** Motores com pequenas variações de carga. São motores acoplados às cargas que na maioria dos casos sofrem flutuações durante o processo de aquisição de sinais. São exemplos desse tipo de carga: bombas, compressores a parafuso, ventiladores etc.
- **Tipo II:** Motores com grandes variações de carga. São motores acoplados às cargas que sofrem grandes desvios durante a aquisição de sinais. Neste caso a técnica pode

ser não aplicável ou alguns cuidados especiais devem ser tomados. São exemplos desse tipo de carga: bobinadeiras, correias transportadoras, moinhos e pontes.

- **Tipo III:** São considerados os casos especiais, ou de motores que se enquadram no tipo I, mas apresentam sinais extremamente ruidosos ou característicos peculiares que prejudicam a análise.

A análise e aplicação da técnica são apresentadas para cada caso:

- **Tipo I:** para esta configuração a estratégia de monitoramento é bastante simples e pode ser denominada de estratégia padrão de monitoramento. Ou seja, cabe ao usuário:
 1. Levantar corretamente todas as características construtivas do motor, sistema de transmissão e cargas acopladas.
 2. Definir o intervalo de medições do motor com o intuito de se levantar seu histórico. É por meio deste histórico que o analista identifica os desvios que vierem a acontecer no conjunto.
 3. De posse do cadastro correto do conjunto rotativo e de um histórico que permita comparações das assinaturas (sinais atuais e sinais anteriores), o usuário deve ficar atento para o estabelecimento dos níveis de alarme e acompanhar a tendência da falha.
 4. Pontos fora da curva devem ser desconsiderados e recomenda-se que faça ao menos 3 aquisições seguidas de cada motor para reduzir o impacto de aleatoriedades presentes no sinal.
- **Tipo II:** em motores do Tipo II é importante analisar se é possível estabelecer um ponto de operação no qual se pode adquirir o sinal do motor sem grandes flutuações de carga. Estabelecido este ponto de operação o procedimento de análise se reduz ao descrito na configuração de Tipo I. Se, mesmo com flutuação de carga, verificar-se a viabilidade de se acompanhar o desenvolvimento de falhas em motores do Tipo II, cabe a equipe de preditiva definir os parâmetros a serem observados no momento da análise, deixando bem claro quais os cuidados necessários na análise e quais os critérios que foram adotados.

- **Tipo III:** em motores do tipo III, recomenda-se, em um primeiro momento, estudar qual é a origem do ruído, aleatoriedades ou peculiaridades presentes no sinal e que podem vir a prejudicar a análise. Essas dificuldades podem ter sua origem na rede de alimentação, ausência de carga, projeto do motor, condição de operação etc. Identificada a origem do problema, recomenda-se verificar se é possível identificar padrões de falhas e a sua evolução. Sendo possível, inserir novos critérios de análise se necessário. Se não for possível a identificação de padrões de falha, considerar o conjunto inapropriado para monitoramento com a técnica em questão.

O mais importante em uma análise preditiva é o levantamento das características da máquina monitorada, o estabelecimento da condição de coleta e a criação de um *baseline* (assinatura inicial) para futuras comparações. Só depois dessas tarefas concluídas é que se deve preocupar-se com a coleta e análise dos dados.

4.5.4.5 Vantagens

A técnica de MCSA apresenta diversas vantagens sobre as outras, a saber:

- **Custo de instalação dos equipamentos:** O equipamento necessário para se realizar a análise de assinatura de corrente de motores é, comparado com os outros, bastante baixo, pois se baseia principalmente em 1 transdutor de corrente por motor, em contrapartida com os diversos acelerômetros que são necessários para se realizar o acompanhamento de vibrações. Além do custo do transdutor, há ainda o *software* especialista, o condicionador e o transmissor de sinais, que são reaproveitados.
- **Acessibilidade:** Sendo o painel elétrico do equipamento em questão acessível, faz-se a instalação do transdutor de corrente para que seja possível a captura. Isso elimina a impossibilidade de se realizar a manutenção preditiva em motores com dificuldade de acesso, como acontece com a técnica de análise de vibrações, e também não é necessário ter um campo de visão do mesmo, como acontece com a análise termográfica.
- **Abrangência do diagnóstico:** Essa técnica permite acompanhar os diversos problemas associados às máquinas elétricas. Isso faz com seu emprego seja possível tanto para acompanhamento de partes mecânicas (em conjunção com a análise de vibrações), quanto das partes elétricas do motor (em conjunção com a MCA).

- **Rapidez de diagnóstico:** Embora essa técnica possa também se basear no acompanhamento de tendências, por vezes ela é utilizada como ponto de partida para tomada de decisões sobre sistemas totalmente desconhecidos.

4.5.4.6 Desvantagens

Embora a técnica de MCSA seja considerada bastante completa e, por várias vezes até suficiente para a realização da manutenção preditiva, ela apresenta algumas desvantagens:

- **Pouca referência e disponibilidade de informações:** Ainda não há livros e artigos que descrevem em completo a técnica. Além disso, para a formação prática de especialistas, é necessário que os mesmos participem de cursos não-regulares disponibilizados pelas empresas que já começam a adotar essa idéia.
- **Dificuldade de se realizar em cargas variáveis:** Com cargas variáveis, o espectro de frequência pode apresentar variações ao longo do tempo, advindo isso da não-aplicabilidade da técnica de transformada de Fourier em sinais não estacionários. Por isso, a sua utilização seria bastante prejudicada em cargas com variações bruscas.
- **Necessidade de embasamento teórico por parte do analista:** como a mesma se baseia em conceitos não perceptíveis ao olho humano, como a alteração de fluxo magnético e consequente alteração da corrente de alimentação, é determinante para o sucesso da técnica que o especialista tenha esses conceitos bastante sedimentados.

Embora se tenha apresentado as desvantagens acima, considera-se que a técnica MCSA possa ser bastante atrativa no objetivo de reduzir os custos de manutenção de uma forma geral.

Verificou-se que a técnica MCSA tem larga aplicação na indústria. Antes aplicada somente a motores de indução trifásicos a mesma foi aplicada em motores de corrente contínua. Seu uso e desenvolvimento justificam-se, devido à importância econômica desses motores em suas aplicações, geralmente, críticas em relação a paradas para manutenção corretivas.

4.5.5 Análise de fluxo magnético

A análise de fluxo magnético é uma técnica que usa um sensor comercial, bobina de fluxo (343 Flux Coil) da CSI - Computational Systems Incorporated.

Devido à necessidade de colocação do disco de balanceamento no lado da ventoinha, instalou-se a bobina de fluxo num suporte (pneu), fixado à estrutura da bancada e tem-se a bobina de fluxo CSI e em exemplo da medição em campo, figura 89.



Figura 89 - Bobina de Fluxo Fixada Axialmente e Medição em Campo com a Bobina CSI [9]

Por meio de estudos já realizados, constataram-se algumas vantagens da análise de fluxo em relação à análise de corrente. Dentre estas, destacam-se a não necessidade: do conhecimento da carga do motor e do número de barras e ranhuras para a detecção de curto-circuito entre espiras; de conexão a cabos energizados; e eletricista para acompanhar a coleta de dados.

A análise dos espectros de fluxo magnético é feita pela tendência de parâmetros específicos associados a cada tipo de falha. Os espectros foram coletados com a bobina CSI posicionada no mesmo ponto, permitindo a repetibilidade dos ensaios e a comparação entre os espectros.

A análise de fluxo permite diagnosticar os defeitos/falhas existentes nas barras do rotor, anomalias existentes no estator e desbalanceamento de tensão. A análise destes defeitos/falhas é feita por meio da inspeção de duas faixas espectrais: baixa frequência e alta frequência.

Em baixa frequência os espectros fornecem informações referentes à condição do rotor, desbalanceamento de tensão e falhas do estator, ou seja, fenômenos relacionados a $1 \times f_1$ e suas modulações. A mínima frequência para se analisar estes espectros é de pelo menos três vezes a frequência de linha (f_1).

Em alta frequência, os espectros apresentam uma família de frequências associadas à passagem de ranhura (f_p) permitindo avaliar a condição do estator. A mínima frequência para se analisar estes fenômenos corresponde à frequência da passagem de ranhuras mais 15 vezes a frequência da linha (f_l), segundo Manual CSI [10].

A frequência de passagem de ranhuras (f_p) é definida pelo número de barras do rotor (ou ranhuras do estator) vezes a velocidade de rotação em Hz (f_r), menos a frequência de linha (f_l), segundo Manual CSI [10].

$$f_p = R_s \times f_r - f_l$$

Na tabela 8, têm-se as principais falhas em motores elétricos e suas respectivas frequências determinísticas, em alta e baixa frequências, segundo Manual CSI (1997), onde: f_l é a frequência de linha (60 Hz); p é o número de pólos; f_s é a frequência de escorregamento; n é um número inteiro; f_r é a frequência de rotação e f_p é a frequência da passagem de ranhuras.

Tabela 8 - Análise de Fluxo: Severidade e Recomendações [10]

Descrição da Falha	Baixa Frequência			Alta Frequência
	$f_l - p \times f_s$	$f_l \pm n \times f_r$	$f_l + p \times f_r/2$	$2 \times f_l$ modulando com f_p
Barras do rotor Trincadas / Quebradas	Diminui	Não muda	Não muda	Não se manifesta
Curto entre Espiras	Diminui	Aumenta	Aumenta	Pouca Variação
Desbalanceamento de Tensão	Diminui	Aumenta	Aumenta	Não se manifesta
Sobrecarga	Variação desprezível	Variação desprezível	Não muda	Variação desprezível

É importante observar que as medições de fluxo magnético devem ser feitas mantendo-se sempre o mesmo nível de carga.

4.5.6 Técnicas usadas para tipos de falhas

4.5.6.1 Barras quebradas

Em um motor de indução trifásico com rotor gaiola, barras quebradas ou trincadas perturbam o fluxo magnético fazendo flutuar a frequência do rotor e, consequentemente, a rotação e a corrente do motor.

Uma experiência foi realizada com o rompimento de 7 barras do rotor por meio de uma broca com diâmetro 5 mm. Na figura 90 tem-se uma vista do rotor com as sete barras rompidas.

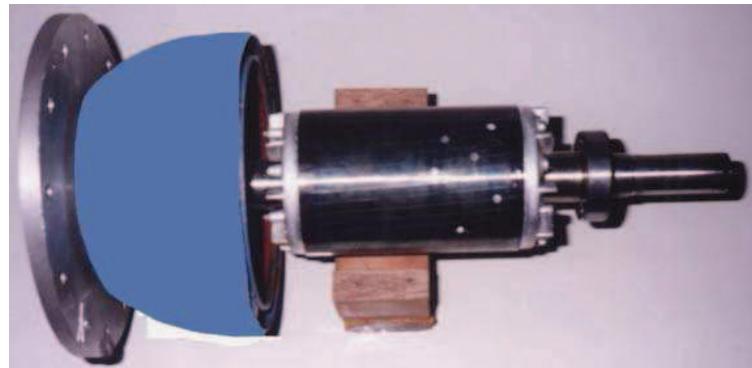


Figura 90– Rotor com as Setes Barras Rompidas [9]

Medindo o fluxo magnético do interior do motor elétrico, a análise da forma de onda permite visualizar as modulações causadas pelo rompimento das barras do rotor, figura 91.

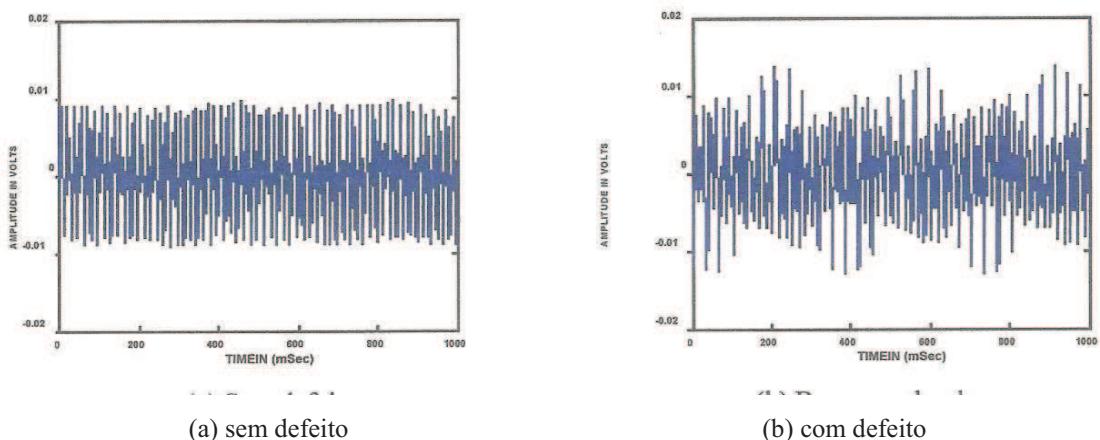


Figura 91 – Exemplo da Mudança Detectada na Densidade de Fluxo Magnético [9]

De acordo com Almeida [1], o campo magnético B do *gap* pode ser expresso pela equação (1), onde R_s é o número de ranhuras do rotor; f_r é a frequência de rotação do rotor, dado em Hz; f_l é a frequência da linha, em Hz; e Q_s e θ são os ângulos de fase.

$$B = B_m \cdot \sin(2\pi R_s f_r t + Q_s) \cdot [1 + \sin(2f_l t + \theta)] \quad (1)$$

Na equação 1, o termo $2\pi R_s f_r$ [rad/s] é a frequência de passagem das ranhuras; e o termo $[1 + \sin(2f_l t + \theta)]$ é o elemento modular.

Barras quebradas ou falta de contato com os anéis fazem flutuar a rotação, que colocada em função da flutuação do torque pode ser expressa segundo a equação abaixo, onde $s \times f_1$ é a frequência de escorregamento; k é um número inteiro; e θ_r é o ângulo da fase.

$$f_r = f_1 + k \cos [2\pi(2s f_1)t + \theta_r]$$

A frequência do rotor flutua com duas vezes a frequência de escorregamento ($2s f_1$), tendo como valor médio a frequência de linha (f_1).

A detecção do problema de barras quebradas é feita pela verificação das bandas laterais de duas vezes a frequência de escorregamento (f_s) em torno da frequência de linha (f_1). Quanto maior a diferença em dB das duas amplitudes, maior o número de barras quebradas.

1. Detecção de barras quebradas através da análise de corrente

Nas figuras 92 e 93 têm-se os espectros de corrente, escolhidos aleatoriamente, para a condição normal de funcionamento e sete barras quebradas, respectivamente.

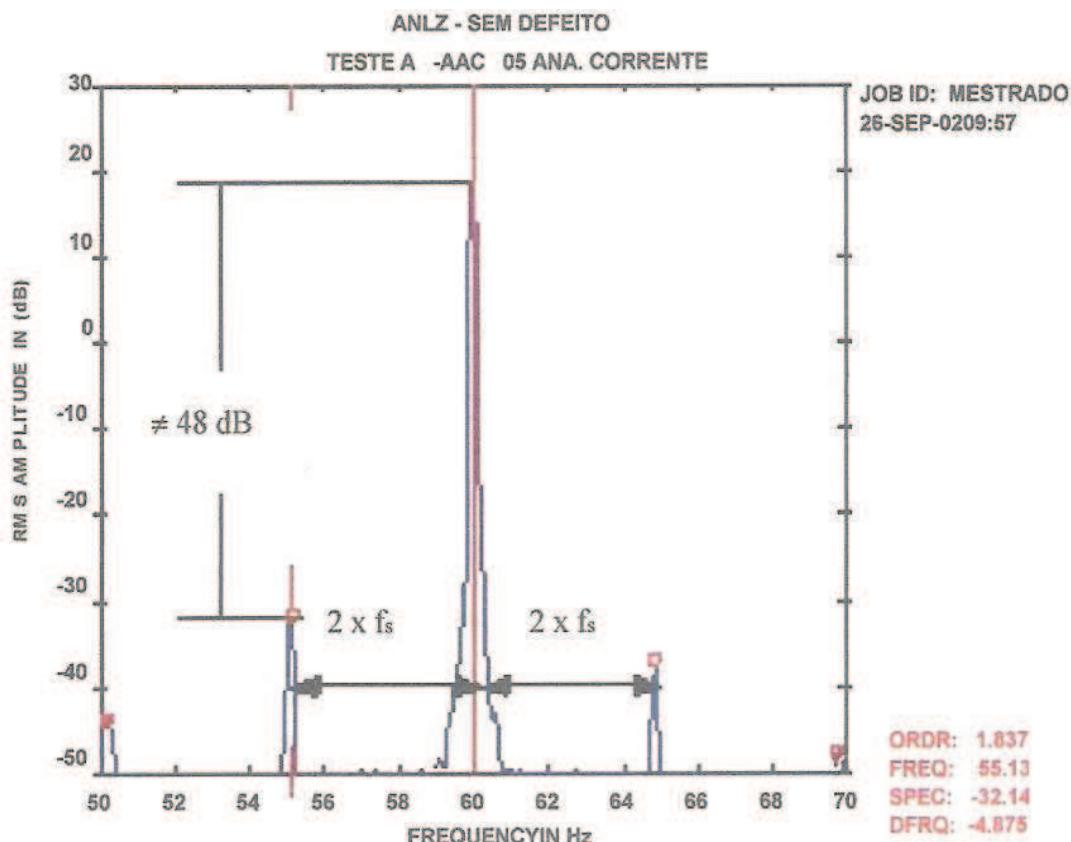


Figura 92 – Espectro de Corrente sem Defeito [9]

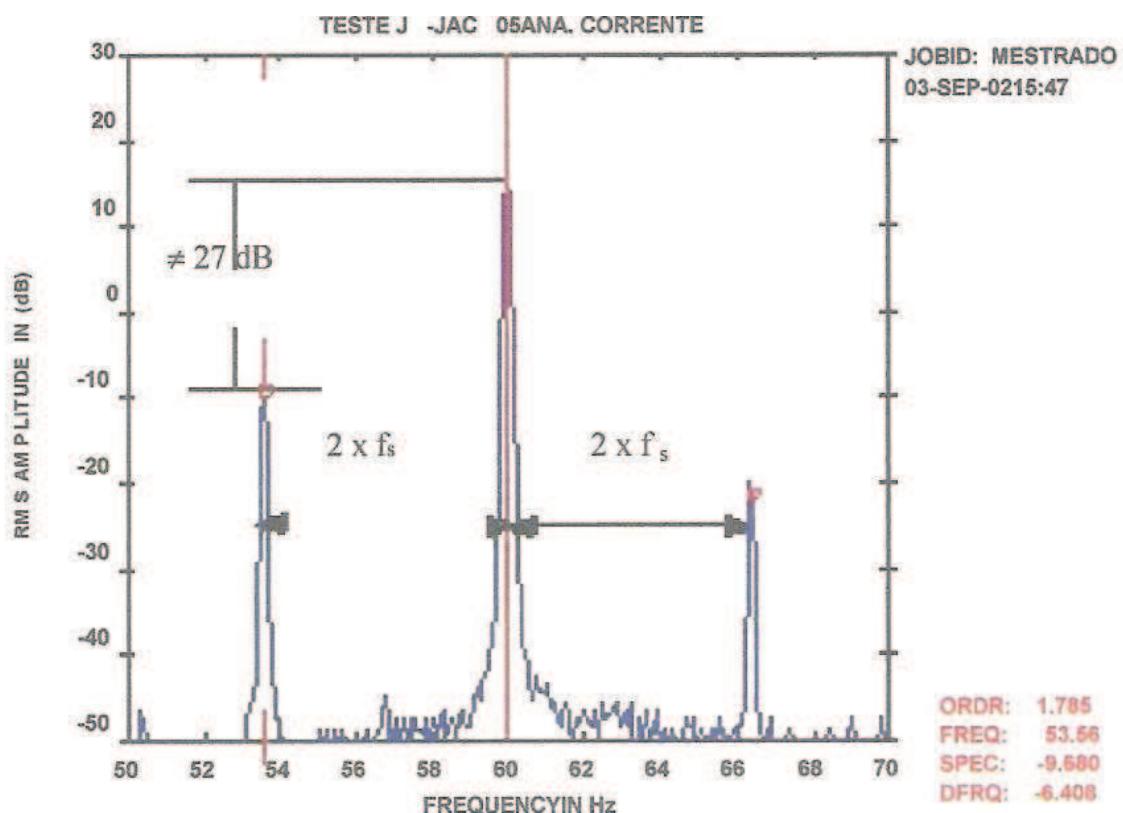


Figura 93 – Espectro de Corrente com 7 Barras Quebradas [9]

Para a situação sem defeito (DB), as diferenças em torno de 71 a 47 dB. Para 7 barras quebradas (BQ), essa diferença diminui para 63 e 27 dB.

2. Detecção de barras quebradas através da análise de fluxo magnético (bobina CSI)

Nas figuras 94 e 95 têm-se os espectros de fluxo magnético, escolhido aleatoriamente, para a condição normal de funcionamento e sete barras quebradas, respectivamente.

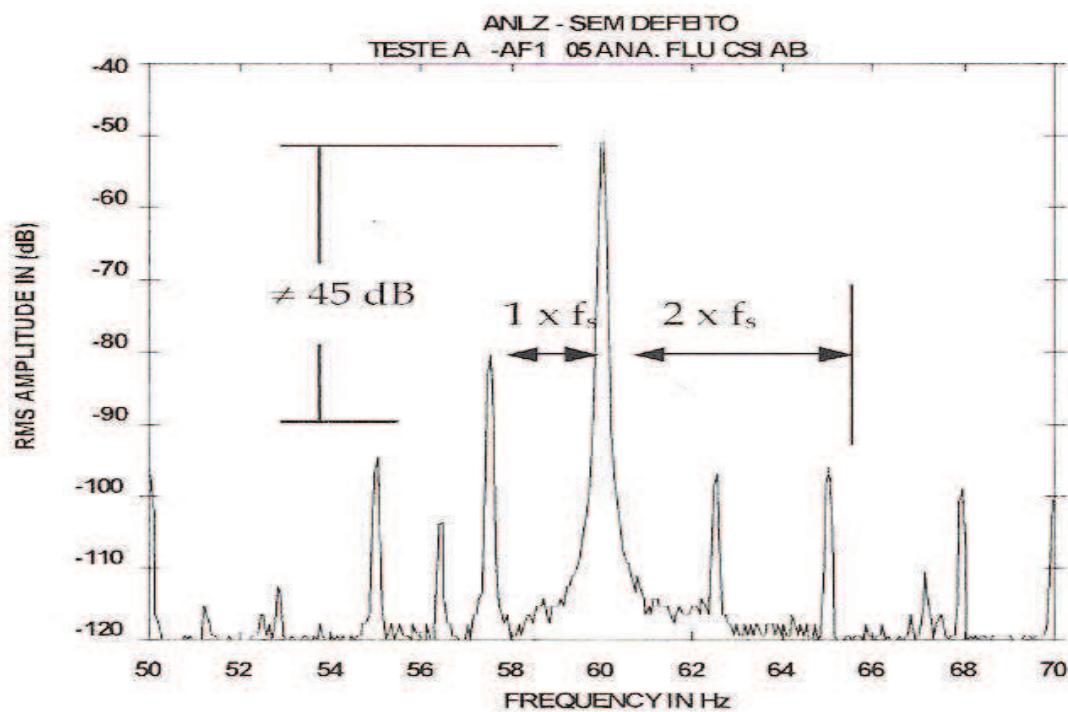


Figura 94 – Espectro de Fluxo sem Defeito [9]

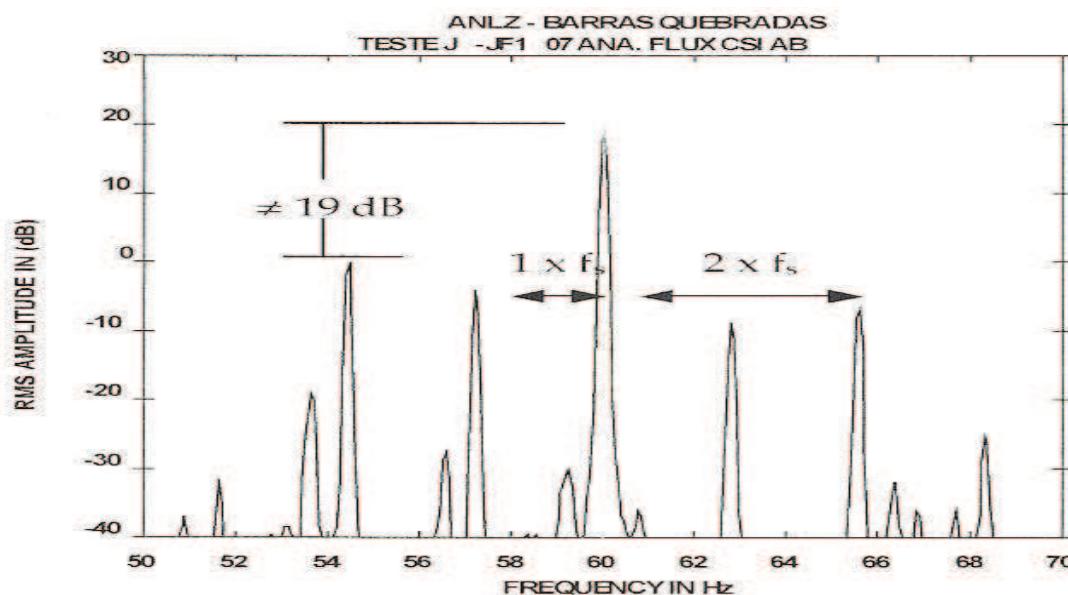


Figura 95 – Espectro de Fluxo com 7 Barras Quebradas [9]

Observa-se que para a situação sem defeito (SD) as diferenças estão em torno de 31 e 46 dB e para 7 barras quebradas essa diferença diminui para 23 e 18 dB.

3. Análise dos resultados

À medida que aumenta o número de barras quebradas, a diferença em DB da banda lateral de $1 \times f_s$ e $2 \times f_s$ em torno da f_1 (análises de corrente e fluxo) diminui. Quanto menor for esta diferença, maior será o número de barras quebradas ou trincadas. Isto ocorre devido alteração da uniformidade do campo magnético.

Para os resultados obtidos com a bobina CSI, as amplitudes apresentam menores valores para as barras quebradas. A análise de fluxo apresenta maior sensibilidade do que a análise de corrente, consequentemente, os valores para severidade são menores. Enquanto para a análise de corrente um determinado valor em dB é considerado ‘sem defeito’, para análise de fluxo este mesmo valor pode ser um indicativo de barras quebradas.

4.5.6.2 Detecção de falhas de origem elétrica através da análise de fluxo - baixa frequência

Os espectros coletados com o sensor comercial, serão usados para a validação dos espectros coletados com a bobina de fluxo implementada.

O coletor de sinais foi configurado pela janela *Hanning*, 3200 linhas, 10 médias, faixa de frequência de 0 a 200 Hz para baixa frequência, sendo as amplitudes medidas em dB. Os espectros de fluxo magnético em dB são referenciados à tensão de 1 V.

1. Condição normal de funcionamento

Na figura 96 tem-se um espectro, escolhido aleatoriamente, para a condição normal de funcionamento do motor elétrico.

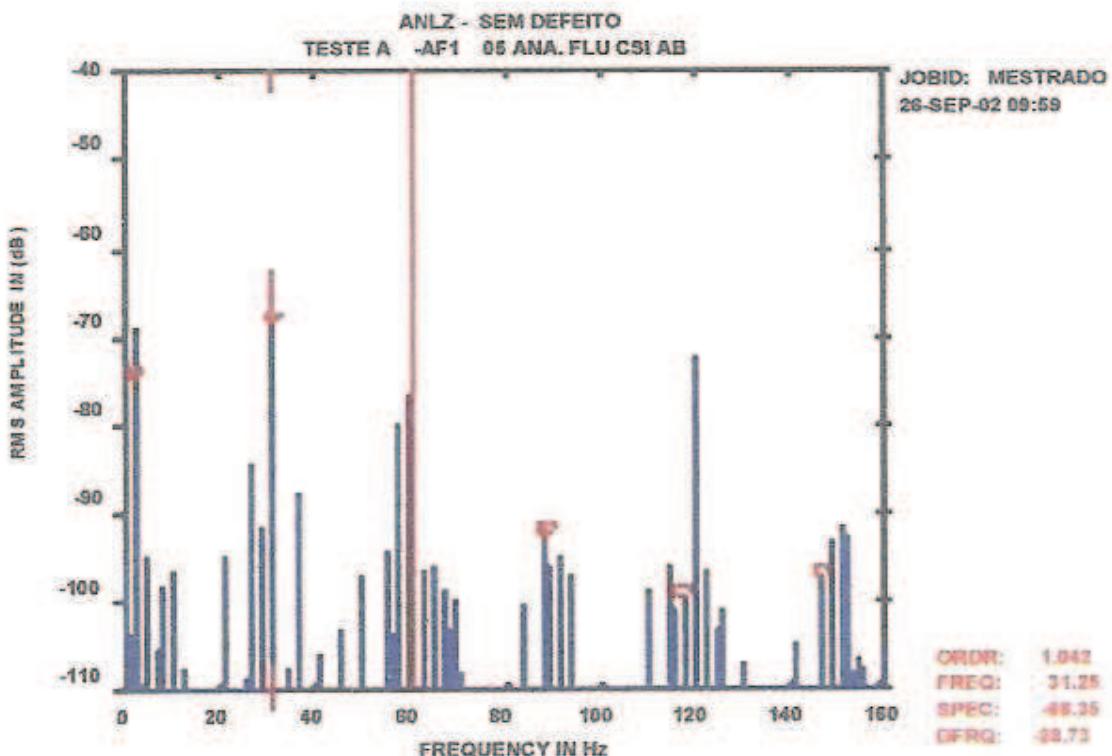


Figura 96 – Espectro de Fluxo Magnético para a Condição Normal de Funcionamento [9]

2. Desbalanceamentos de tensão

Bowers [8] usou a integração das tecnologias de análise de temperatura, análise de fluxo e análise de corrente parasita para detectar problemas de origem elétrica num motor de indução trifásico. Os casos históricos discutem problemas de aquecimento, barras quebradas e desequilíbrio de fases.

Leonard e Thomson [18] estudaram os problemas relacionados com as falhas simétricas e assimétricas do estator.

Segundo Timperley [36], por definição, os motores elétricos produzem fluxo magnético. Qualquer pequeno desbalanceamento no fluxo magnético ou no circuito elétrico é refletido no fluxo transmitido axialmente. As principais causas da mudança de anomalias nos enrolamentos do estator são: curto-circuito entre espiras e curto-circuito entre fases.

O desbalanceamento de tensão é um dos problemas mais frequentes nas indústrias e provoca sobreaquecimento nos motores elétricos, reduzindo sua vida útil e gerando vibrações que por sua vez provocam desgastes mecânicos e ruídos. Conforme Baccarini [4], para sua

inclusão em um plano de manutenção preditiva é necessário conhecer seu comportamento e determinar suas frequências determinísticas.

Considerando-se que o motor está submetido a um desbalanceamento de tensão ($V_{AB} = V_{CA} \neq V_{BC}$). Consequentemente as correntes no estator não serão mais iguais entre si e o campo magnético resultante irá sofrer alterações em suas características, uma vez que as componentes em quadratura dos fluxos não irão mais se anular.

Na análise de fluxo, o desbalanceamento de tensão se manifesta com alterações nas amplitudes das $f_i \pm 1 \times f_r$; $f_i + 2 \times f_r$; $f_i + 3 \times f_r$ e $f_i + 4 \times f_r$. Estas frequências foram observadas a partir de um espectro de referência (*baseline*) e serão chamadas de frequências determinísticas do desbalanceamento de tensão pela análise de fluxo magnético.

Na fase danificada pelo desbalanceamento de tensão da rede, figura 97, a queima do isolamento numa fase do enrolamento do estator pode resultar de tensão desigual entre fases, WEG [44].

Tensões desiguais normalmente são motivadas por cargas não balanceadas na rede de alimentação, por conexões deficientes junto aos terminais do motor ou por mau contato.



Figura 97 – Fase Danificada por Desbalanceamento de Tensão da Rede [44]

A excitação por desbalanceamento de tensão foi obtida inserindo-se uma resistência em série com uma das fases de alimentação do motor elétrico. Na figura 98 tem-se um

espectro, escolhido aleatoriamente, para a condição de desbalanceamento de tensão (210 V) do motor elétrico.

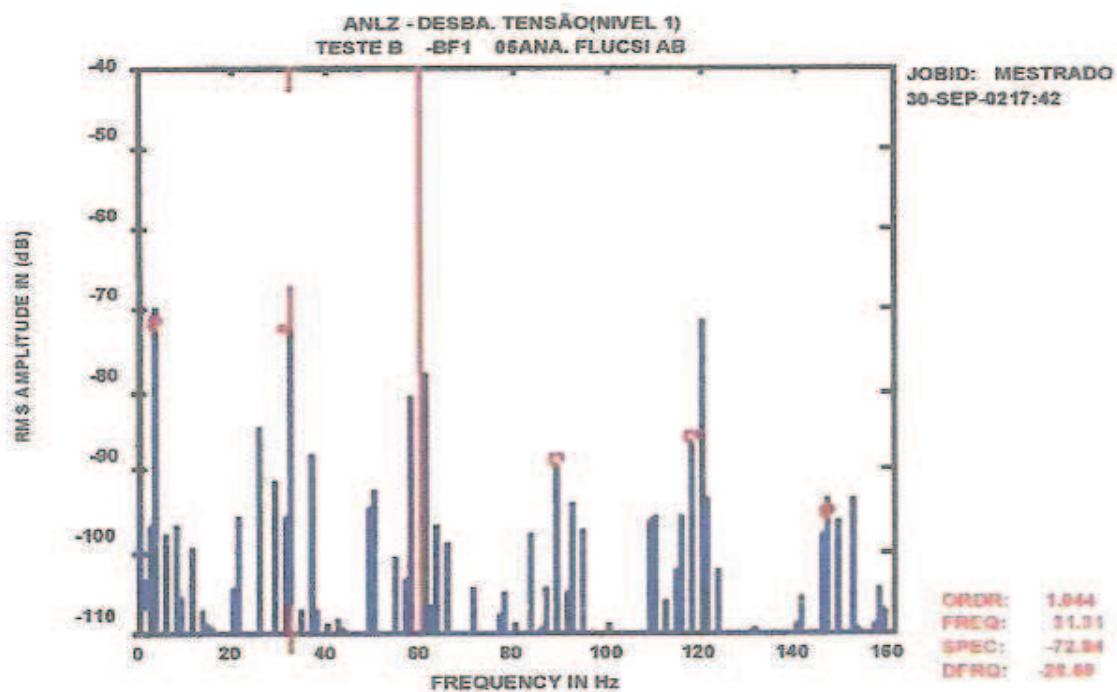


Figura 98 – Espectro de Fluxo Magnético para o Desbalanceamento de Tensão (210 V) - Bobina CSI [9]

Na figura 99 tem-se um espectro, escolhido aleatoriamente, para a condição de desbalanceamento de tensão (200 V) do motor elétrico.

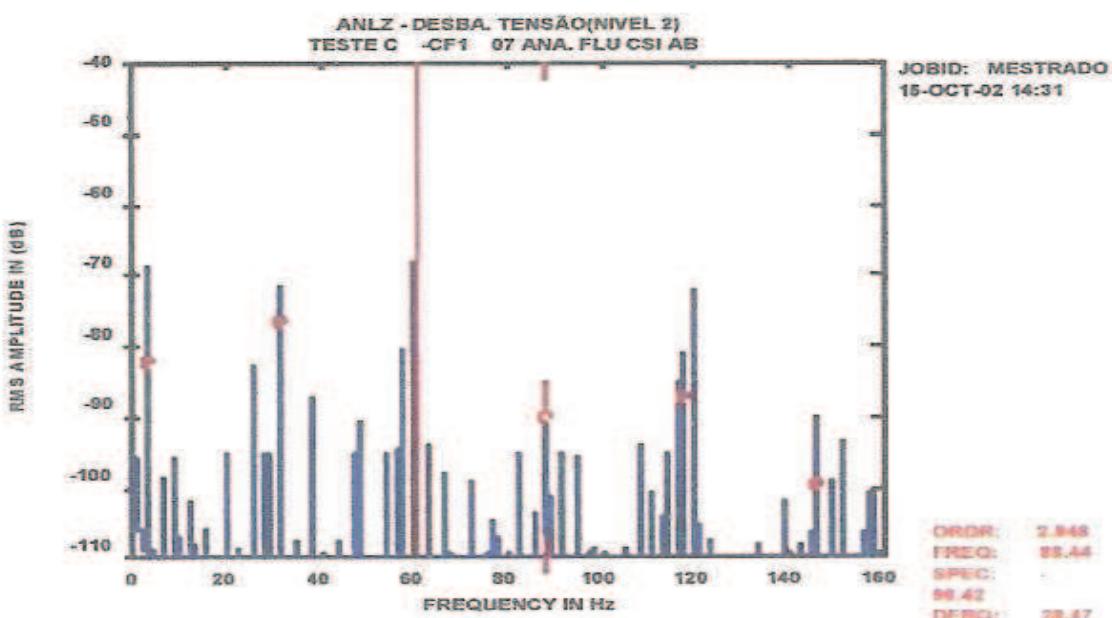


Figura 99 – Espectro de Fluxo Magnético para o Desbalanceamento de Tensão (200 V) - Bobina CSI [9]

3. Subtensão e sobretensão

Em máquinas elétricas de corrente alternada, quando se tem um sistema de corrente trifásico balanceado fluindo através dos enrolamentos do estator surge um campo magnético senoidal distribuído que gira no entreferro da máquina como já visto anteriormente.

O campo magnético girante irá introduzir uma tensão nos enrolamentos do rotor. Seu valor médio quadrático (RMS) é dado pela equação abaixo, onde f é a frequência em (Hz) e Φ representa o fluxo por pólo da máquina elétrica.

$$E_{rms} = 4,44 N f \Phi$$

Quando se tem um motor alimentado com subtensão ou sobretensão, a tensão induzida no transdutor implementado dentro da máquina irá aumentar ou diminuir de acordo com o nível de tensão aplicado nos enrolamentos do estator. Consequentemente tem-se um aumento ou diminuição na frequência de linha (f_l) e nas frequências de rotação (f_r) da máquina que modulam com a f_l .

A queima por sobrecarga, figura 100, provoca a queima total do isolamento em todas as fases do enrolamento trifásico. As subtensões também provocarão o mesmo tipo de falha.

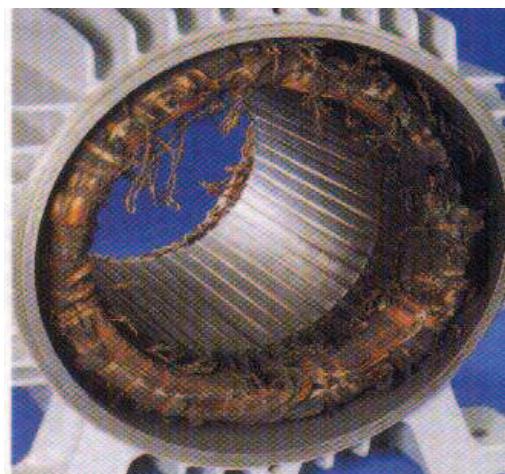


Figura 100 – Queima por Sobrecarga, Subtensão ou Sobretensões [44]

- Subtensão

Segundo Mamede [19], considerando-se a instalação do motor num ponto do circuito em que a tensão está abaixo das condições nominais previstas (subtensão), as características destes são alteradas de acordo com os seguintes itens:

- O conjugado de partida diminui com o quadrado da tensão aplicada.

- A corrente de partida cai proporcionalmente à redução de tensão.
- A corrente a plena carga aumenta na mesma proporção.
- O fator de potência aumenta.
- As perdas estatóricas e robóticas, em geral, também aumentam, aquecendo o enrolamento.
- A velocidade diminui, acarretando deficiências indesejáveis de ventilação.

Na figura 101 tem-se um espectro, escolhido aleatoriamente, para a condição de subtensão (200 V) do motor elétrico.

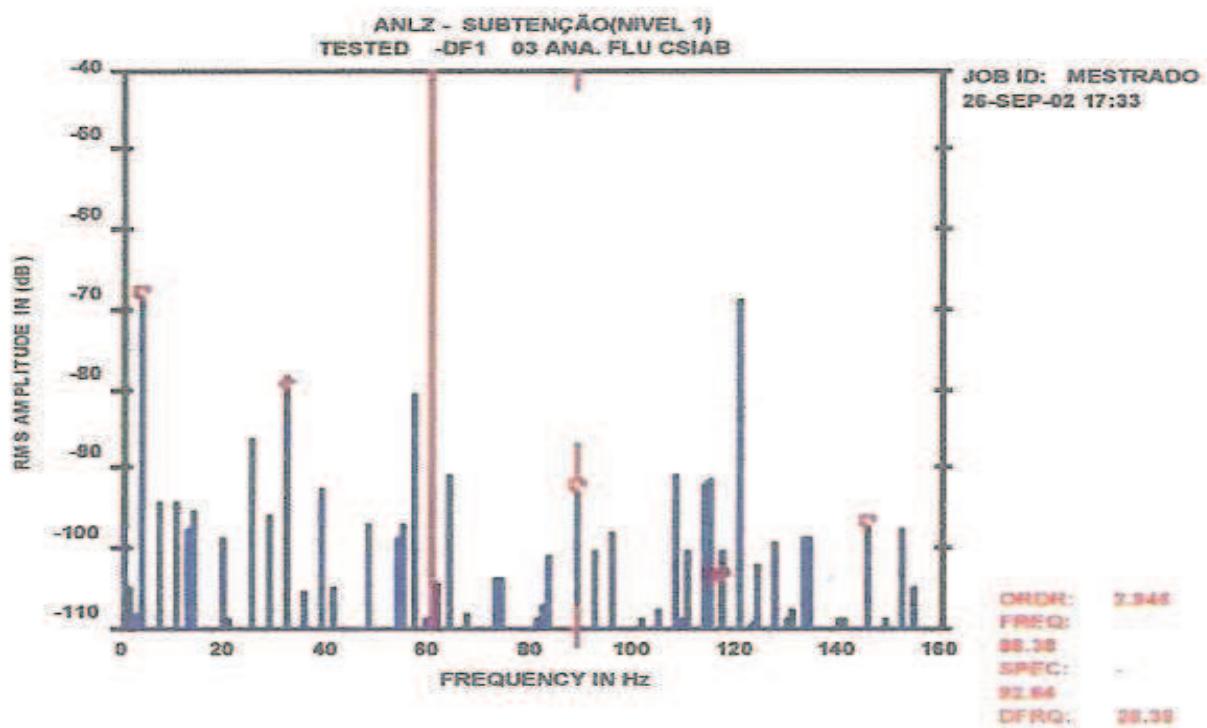


Figura 101 – Espectro de Fluxo Magnético para Subtensão (200 V) [9]

Na figura 102 tem-se um espectro, escolhido aleatoriamente, para a condição de subtensão (190 V) do motor elétrico.

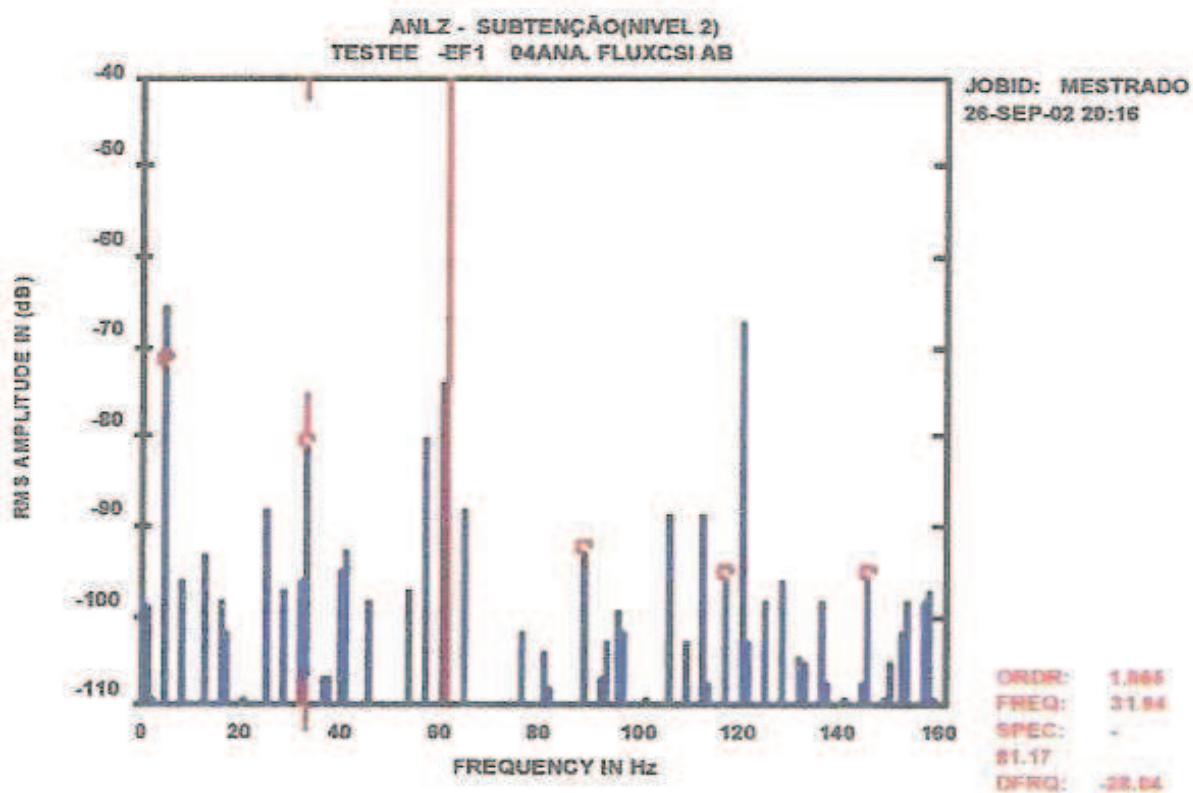


Figura 102– Espectro de Fluxo Magnético para Subtensão (190 V) [9]

- Sobretenção

Segundo Mamede [19], considerando-se a instalação do motor num ponto do circuito em que a tensão está acima das condições nominais previstas (sobretenção), as características destes são alteradas de acordo com os seguintes itens:

- O conjugado de partida aumenta com o quadrado da tensão.
- A corrente de plena carga diminui.
- O conjugado máximo aumenta com o quadrado da tensão.
- O fator de potência diminui.
- As perdas robóticas, em geral, e as perdas estatóricas diminuem.
- A velocidade aumenta ligeiramente, melhorando as condições de troca de calor.

Na figura 103 tem-se um espectro, escolhido aleatoriamente, para a condição de sobretenção (230 V) do motor elétrico.

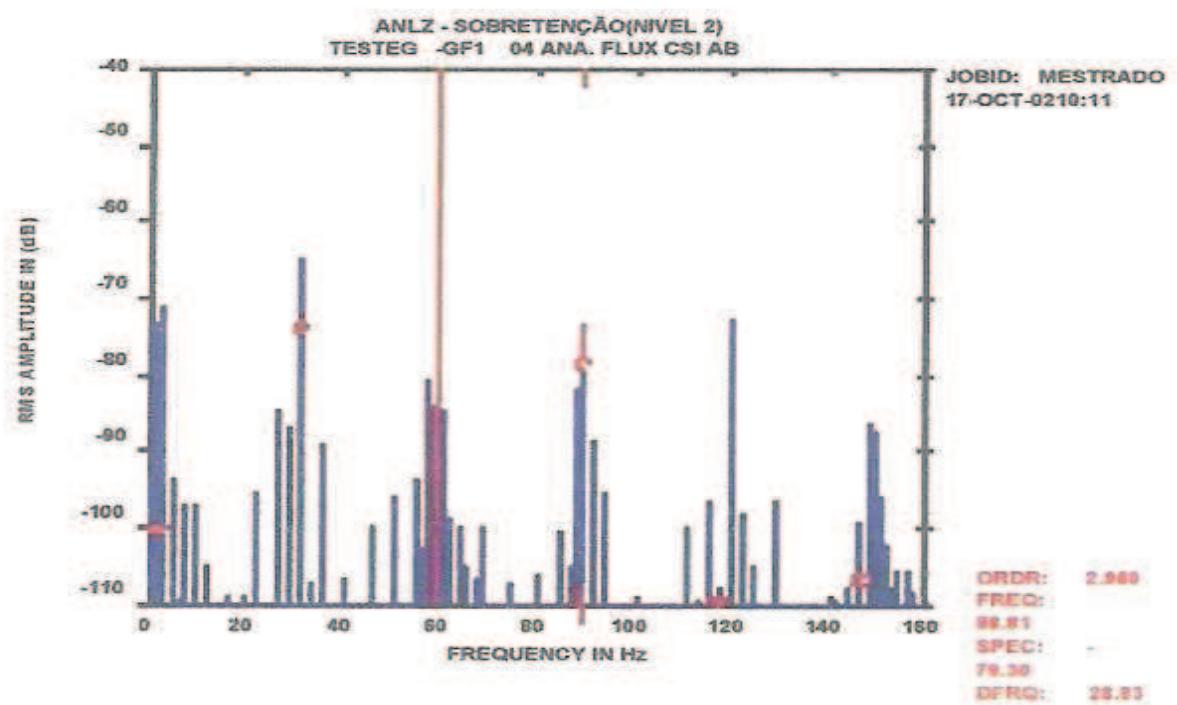


Figura 103– Espectro de Fluxo Magnético para Sobretensão (230 V) [9]

Na figura 104 tem-se um espectro, escolhido aleatoriamente, para a condição de subtensão (240 V) do motor elétrico.

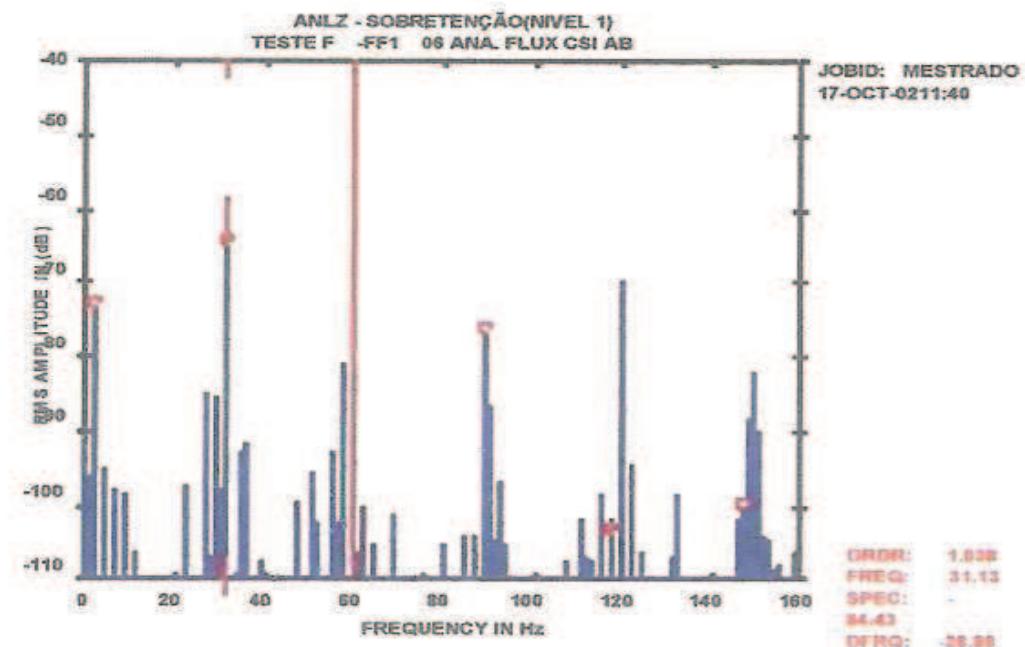


Figura 104 – Espectro de Fluxo Magnético para Sobretensão (240 V) [9]

4. Análise dos resultados – baixa frequência

A amplitude na frequência $f_l - 1 \times f_r$ diminui para a condição de subtensão e aumentou para a sobretensão, podendo ser considerada como frequência determinística para estes tipos de problemas. A bobina CSI detectou as variações das amplitudes nesta frequência.

A amplitude na frequência f_l manteve-se constante para a bobina CSI.

A amplitude na frequência $f_l + f_r$ manteve-se com pequenas variações no teste de subtensão e sobretensão usando a bobina CSI.

Nos espectros coletados com a bobina CSI, observa-se que as amplitudes na frequência $f_l + 2 \times f_r$ aumentaram para o teste de desbalanceamento de tensão e mantiveram-se com pequenas variações nos demais testes. Neste caso, $f_l + 2 \times f_r$ pode ser considerada como frequência determinística para estes tipos de problemas.

A amplitude na frequência $f_l + 3 \times f_r$ manteve-se com pequenas variações para o teste realizado.

Na tabela 9 tem-se a generalização dos resultados para os defeitos estudados neste trabalho e suas respectivas frequências determinísticas, em baixa frequência, onde: f_l é a frequência de linha (60 Hz) e f_r é a frequência de rotação.

Tabela 9 – Amplitudes em Baixa Frequência [9]

Descrição da Falha	Análise das Amplitudes em baixa frequência - Bobina CSI				
	$f_l - 1 \times f_r$	f_l	$f_l + 1 \times f_r$	$f_l + 2 \times f_r$	$f_l + 3 \times f_r$
Sem Defeito	Referência -69,0 dB	Referência -49,3 dB	Referência -86,8 dB	Referência -99,2 dB	Referência -97,5 dB
Desbalanceamento de Tensão	Pouca Variação 210 V - 0,9dB 200 V - 3,7 dB	Pouca Variação 210 V + 2,9 dB 200 V + 4,8 dB	Pouca Variação 210 V - 0,9 dB 200 V - 6,2 dB	Aumenta 210 V 13,7dB 200 V 18,2 B	Aumenta 210 V 5,4 dB 200 V 7,0 dB
Subtensão	Diminui 200 V 6,9 dB 190 V 10,3 dB	Pouca Variação 200 V + 1,7dB 190 V + 1,8dB	Pouca Variação 200 V - 0,8 dB 190 V + 1,7 dB	Pouca Variação 200 V- 0,8 dB 190 V+1,7 dB	Pouca Variação 200 V + 2,4 dB 190 V + 1,9 dB
Sobretensão	Aumenta 230 V 5,0 dB 240 V 6,9 dB	Pouca Variação 230 V 0,6 dB 240 V+ 0,7 dB	Pouca Variação 230 V - 6,6 dB 240 V - 1,1 dB	Pouca Variação 230 V- 4,6 dB 240 V- 1,1 dB	Pouca Variação 230 V + 2,4 dB 240 V + 4,0 dB

4.5.6.3 Detecção de falhas de origem elétrica através da análise de fluxo - alta frequência

Os sinais foram coletados através das bobinas de fluxo CSI. O analisador foi configurado pela janela Hanning, 3.200 linhas, 10 médias, faixa de frequência de 0 a 2.000 Hz para alta frequência, sendo as amplitudes medidas em dB. Os espectros de fluxo magnético em dB são referenciados à corrente de 1 A.

Avalia-se a condição do motor nas modulações de $\pm 2 \times f_i$, $4 \times f_i$ e $6 \times f_i$ ($f_i = 60$ Hz) com a frequência da passagem de ranhuras (f_p).

A frequência de passagem de ranhura (f_p) é igual ao número de barras do rotor ou ranhuras do estator (R) vezes a velocidade de rotação em Hz (f_r), menos a frequência de linha ($R \times f_r - f_i$).

1. Condição normal de funcionamento

Na figura 105 tem-se um espectro para a condição normal de funcionamento do motor elétrico.

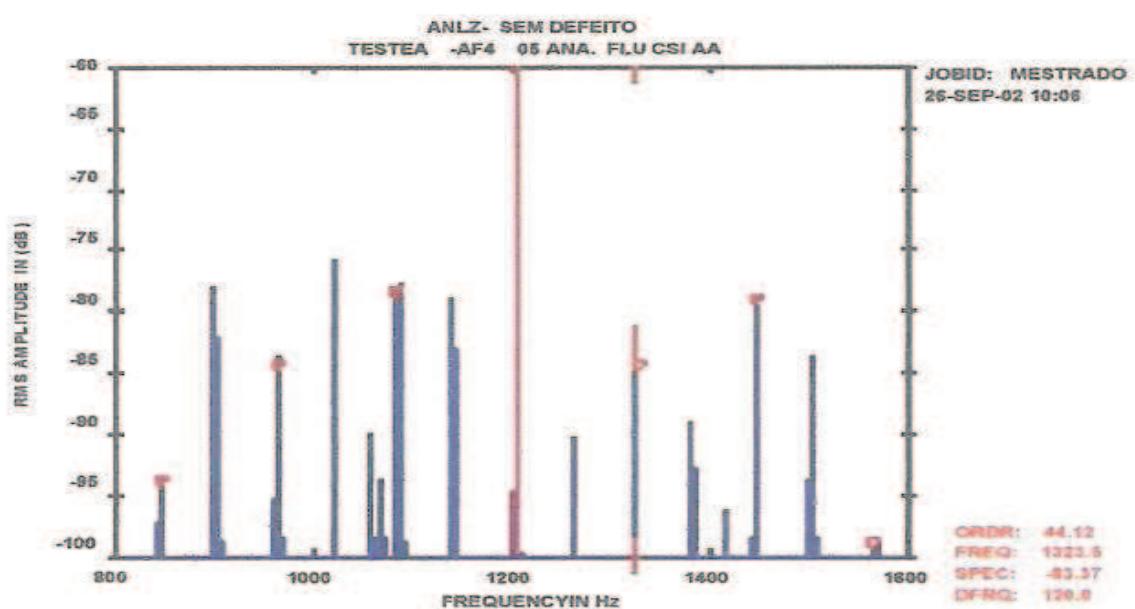


Figura 105 – Espectro de Fluxo Magnético para a Condição Normal de Funcionamento [9]

2. Desbalanceamento de tensão

Na figura 106 tem-se um espectro para a condição de desbalanceamento de tensão (210 V) do motor elétrico.

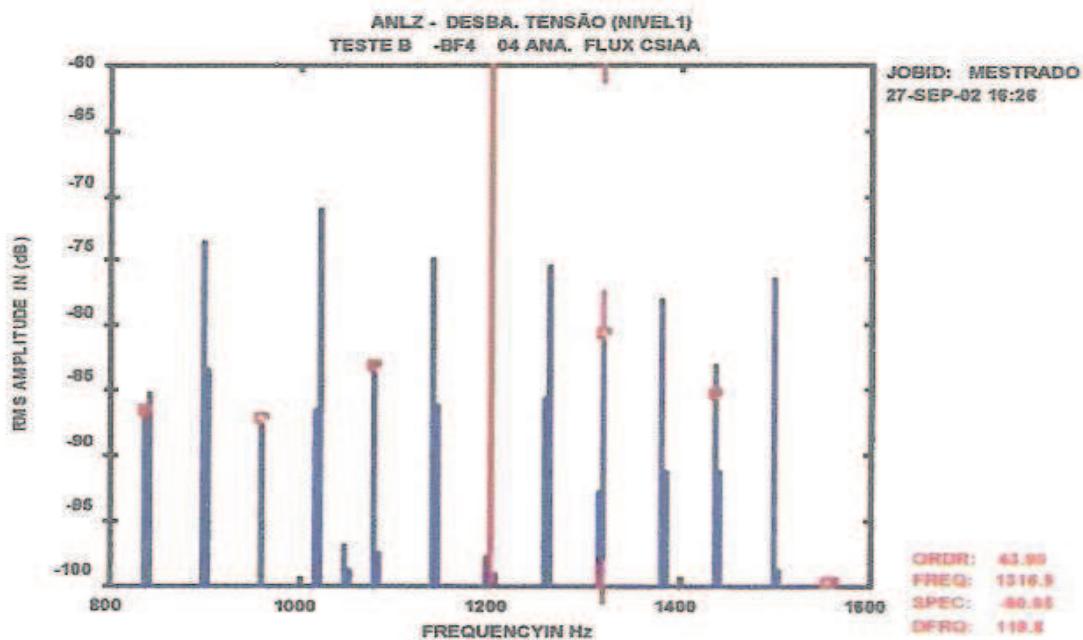


Figura 106 – Espectro de Fluxo Magnético para Desbalanceamento de Tensão (210 V) [9]

Na figura 107 tem-se um espectro para a condição de desbalanceamento de tensão (200 V) do motor elétrico.

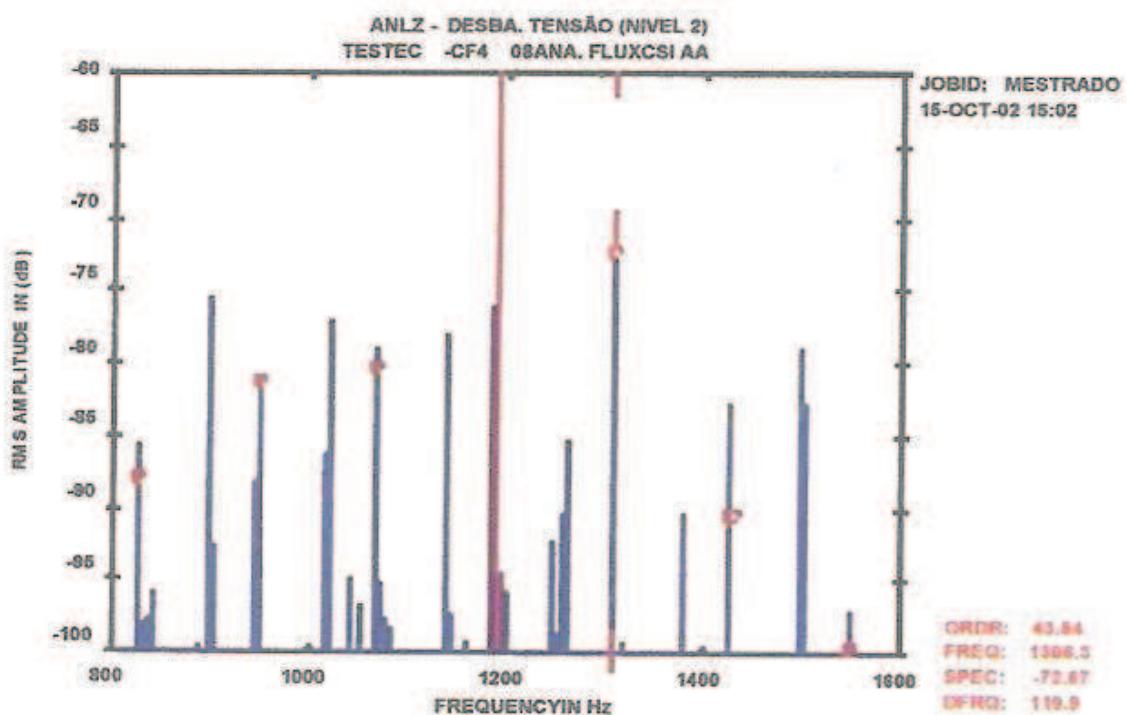


Figura 107 – Espectro de Fluxo Magnético para Desbalanceamento de Tensão (200 V) [9]

3. Subtensão e sobretensão

Nas figuras 108 e 109 tem-se um espectro para as condições de subtensão (200 V) e (190 V), respectivamente, do motor elétrico.

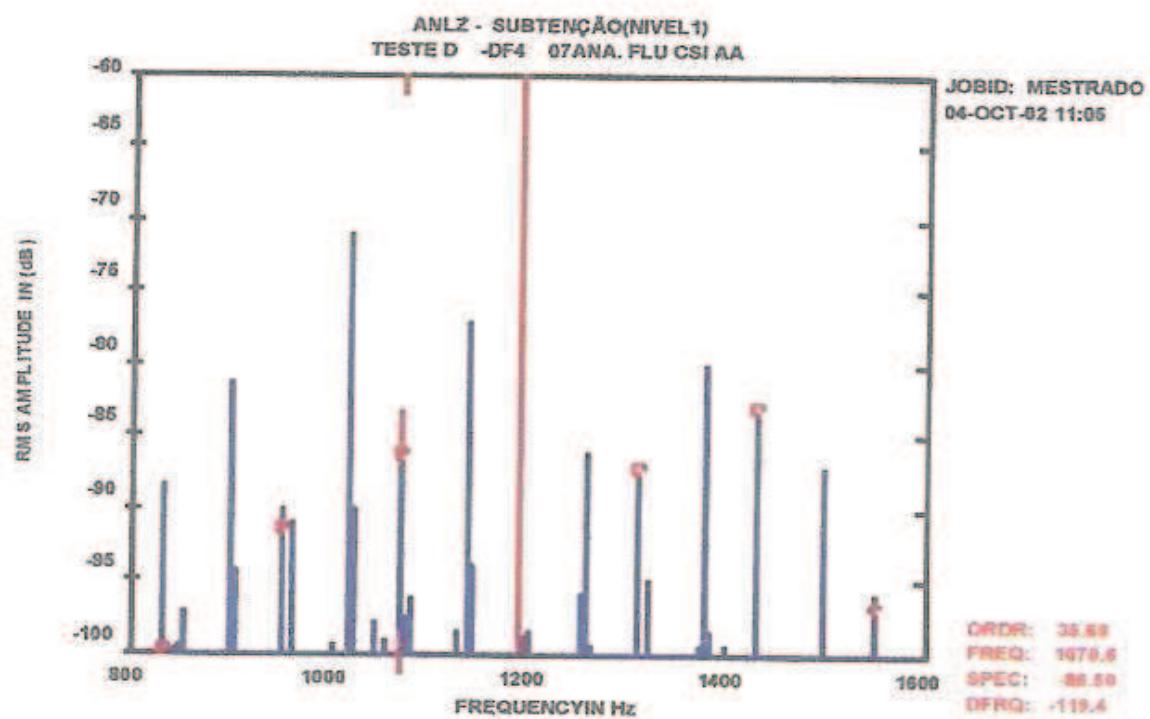


Figura 108 – Espectro de Fluxo Magnético para Subtensão (200 V) [9]

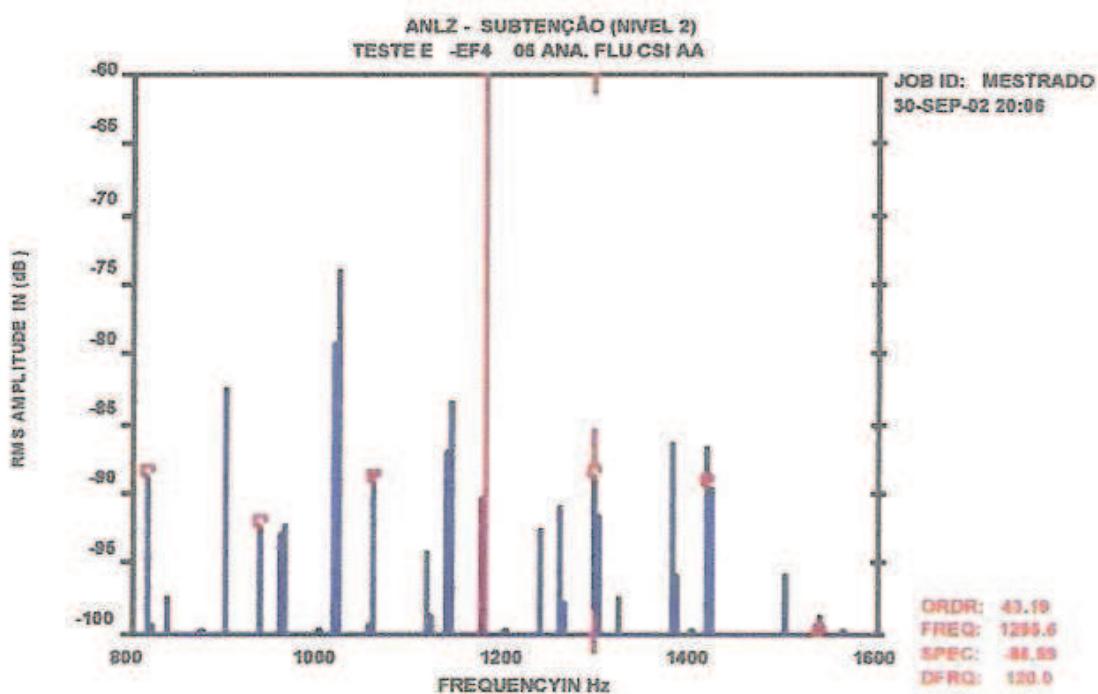


Figura 109 – Espectro de fluxo magnético para subtensão (190 V) [9]

Na figuras 110 e 111 tem-se um espectro para a condição de sobretensão (230 V) e (240 V), respectivamente, do motor elétrico.

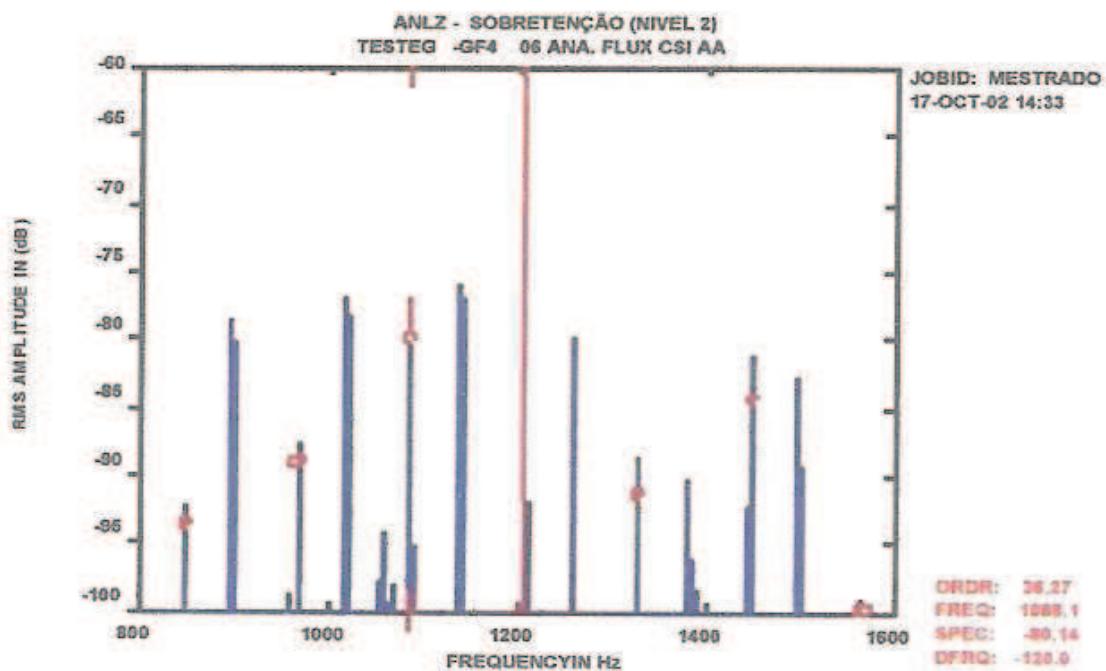


Figura 110 – Espectro de Fluxo Magnético para Sobretensão (230 V) [9]

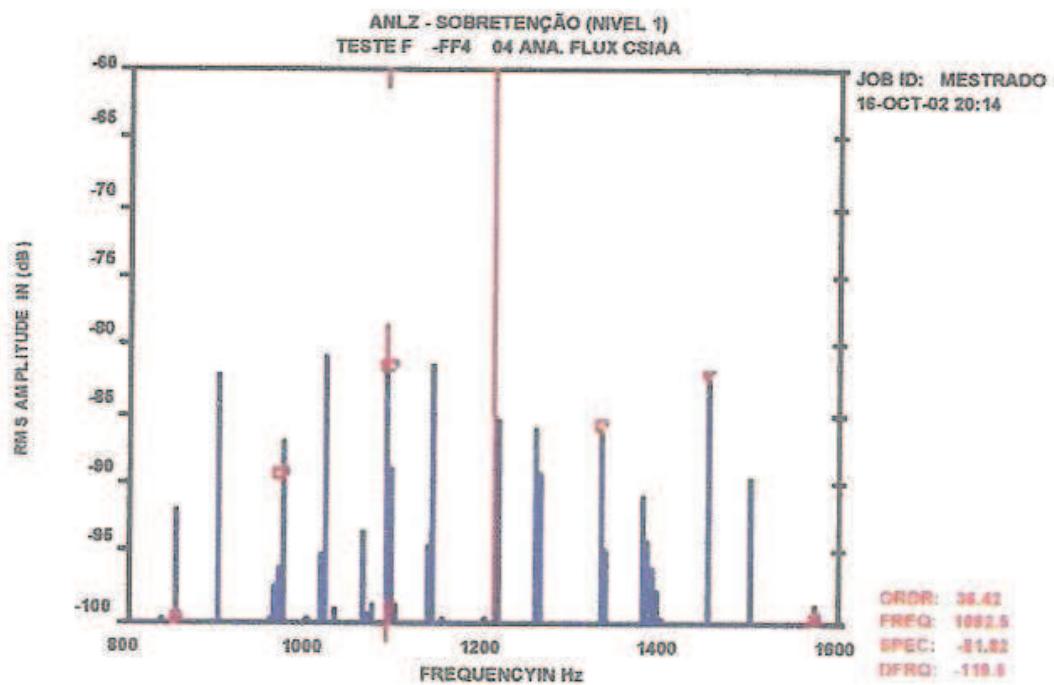


Figura 111 – Espectro de Fluxo Magnético para Sobretensão (240 V) [9]

4. Análise dos resultados – alta frequência

A amplitude na frequência $f_p - 6 \times f_l$ manteve-se constante para a bobina CSI. A amplitude na frequência $f_p - 4 \times f_l$ manteve-se com pequenas variações para a bobina CSI. A amplitude na frequência $f_p - 2 \times f_l$ manteve-se com pequenas variações para a bobina CSI. A amplitude na frequência f_p manteve-se com pequenas variações para a bobina CSI.

A amplitude na frequência $f_p + 2 \times f_l$ aumentou para a condição de desbalanceamento de tensão, podendo ser considerada uma frequência determinística para este tipo de problema. A bobina CSI detectou as variações das amplitudes nesta frequência.

A amplitude na frequência $f_p + 4 \times f_l$ manteve-se com pequenas variações para a bobina CSI. A amplitude na frequência $f_p + 6 \times f_l$ manteve-se com pequenas variações para a bobina CSI.

Na tabela 10 tem-se a generalização dos resultados para os defeitos estudados neste trabalho e suas respectivas frequências determinísticas, em alta frequência, onde: f_l é a frequência de linha (60 Hz) e f_p é a frequência de passagem de ranhuras.

Análise das Amplitudes em alta frequência - Bobina CSI [9]						
Descrição da Falha	$f_p - 6 \times f_1$	$f_p - 4 \times f_1$	$f_p - 2 \times f_1$	f_p	$f_p + 2 \times f_1$	$f_p + 4 \times f_1$
Sem Defeito	Referência -89,9 dB	Referência -89,5 dB	Referência -80,9 dB	Referência -74,4 dB	Referência -89,7 dB	Referência -83,7 dB
Desbalanceamento de Tensão	Pouca Variação 210 V +3,8 dB 200 V +0,7 dB	Pouca Variação 210 V +3,0 dB 200 V +4,7 dB	Não muda 210 V +0,1 dB 200 V +0,1 dB	Pouca Variação 210 V +0,9 dB 200 V +2,1 dB	Aumenta 210 V 8,6 dB 200 V 11,7 dB	Não muda 210 V +0,1 dB 200 V +0,4 dB
Subtensão	Pouca Variação 200 V +6,4 dB 190 V +2,3 dB	Não muda 200 V -0,9 dB 190 V +0,1 dB	Pouca Variação 200 V -3,4 dB 190 V -5,4 dB	Pouca Variação 200 V +0,9 dB 190 V +2,2 dB	Pouca Variação 200 V +2,0 dB 190 V + 2,3dB	Não muda 200 V -0,8 dB 190 V +0,2 dB
Sobretensão	Pouca Variação 230 V -2,3 dB 240 V -1,5 dB	Pouca Variação 230 V +2,3 dB 240 V +3,5 dB	Pouca Variação 230 V +0,73 dB 240 V +2,74 dB	Não muda 230 V -0,3 dB 240 V -0,2 dB	Pouca Variação 230 V + 1,1 dB 240 V + 4,3 dB	Pouca Variação 230 V +1,1 dB 240 V +4,3 dB

4.6 INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA

4.6.1 Introdução à teoria da conexão elétrica

A conexão elétrica é a união de dois corpos condutores mantendo as mesmas características com relação à sua ampacidade, isto é, a sua capacidade de conduzir corrente elétrica.

Em uma conexão elétrica existem vários fatores que devem ser considerados para garantir a capacidade de corrente semelhante a dos condutores associados, dentre os quais destacamos:

- **Resistência do Material Condutor** - Característica própria relacionada à condutividade do material, que determina a sua ampacidade.
- **Resistência de Contato** - Resistência adicional à dos materiais condutores envolvidos na conexão, introduzida pela irregularidade entre as superfícies de contato. Se por um lado, a qualidade de uma conexão está relacionada com a resistência de contato, esta, por sua vez, é associada com a amplitude da área física de contato, na qual a corrente elétrica se distribuirá ao passar de um metal para o outro. Contudo, toda superfície de um material, por mais polida que seja, possui muitas irregularidades devido à porosidade desse material. Portanto, na realidade os pontos de contato vão se restringir às pequenas áreas distribuídas ao longo da superfície física da conexão.

4.6.2 Conceitos

A variável temperatura é definida como a medida da energia cinética média dos átomos ou moléculas de uma substância, dada em graus centígrados, kelvin ou fahrenheit. Sempre que existir um gradiente de temperatura no interior de um sistema haverá transferência dessa energia no sentido das temperaturas mais baixas. A energia em trânsito é chamada calor, e o processo de transporte é denominado transmissão de calor.

Existem 3 mecanismos básicos de transmissão de calor: condução, convecção e radiação.

- **Condução:** é a transferência de energia entre partes adjacentes de um sólido em consequência da existência de um gradiente térmico no mesmo. Na condução, o calor se transfere a camadas sucessivas do material através da difusão da energia

cinética média das moléculas. Essa energia é maior nas regiões mais quentes e menor nas mais frias. A condutibilidade térmica é o parâmetro que determina a maior ou menor capacidade de um material conduzir calor.

- **Convecção:** é um processo de transferência de calor por condução de massa, característico dos fluidos. O calor é transferido de uma região para outra devido a variações de densidade de correntes da presença de gradientes térmicos. A convecção pode ser natural ou forçada. Neste último caso, quando estimulada pela ação do vento, de um ventilador ou de uma bomba.
- **Radiação:** é a transferência de calor através de ondas eletromagnéticas. Todos os corpos emitem naturalmente radiação eletromagnética em função da temperatura absoluta segundo a lei de *Stefan-Boltzmann*. Pela radiação, os corpos podem trocar calor sem qualquer contato físico, mesmo no vácuo. A maior ou menor capacidade do corpo em emitir radiação eletromagnética é dada pela emissividade.

A lei de *Stefan-Boltzmann* é definida pela equação:

$$W = \sigma T^4$$

Onde: W: energia irradiada (Watts/m²)

σ : constante de *Stefan-Boltzmann* ($5,7 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$)

T: temperatura absoluta (K)

Considerando a emissividade, a fórmula de *Stefan-Boltzmann* pode ser reescrita conforme segue:

$$W = \sigma \epsilon T^4$$

Chama-se emissividade ‘ ϵ ’, à capacidade de um corpo em emitir ou refletir energia (radiação eletromagnética), isto é, a relação entre a energia irradiada por um corpo real e a que seria irradiada por um corpo ideal (corpo ‘negro’ ou emissor perfeito) com máxima capacidade de emissão. O valor da emissividade depende diretamente do material e de suas condições, podendo variar de 0 a 1.

A emissividade de um material não é um valor fixo e absoluto, sendo afetada por alguns fatores, tais como, temperatura, textura superficial, tratamento superficial e atenuação atmosférica.

Imprecisões devidas ao valor da emissividade são minimizadas nas temperaturas altas, pois a radiação proveniente da superfície aumenta na medida em que a temperatura da superfície aumenta (à quarta potência) e o efeito da emissividade é diretamente proporcional à radiação.

Tendo em vista que as medições são feitas medindo-se a radiação infravermelha emitida pelo alvo, é importante limitar as perdas entre o alvo e a câmera. Quanto maior for à distância entre os dois, maior será a absorção atmosférica e maior será o efeito sobre a medição da temperatura.

Os objetos podem ser classificados pelo modo como eles reagem à radiação incidente que recai sobre eles, que afetam, diretamente, os métodos para medir a temperatura.

Quando uma quantidade de radiação incide sobre um corpo podem acontecer 3 fenômenos simultaneamente:

- Uma fração da radiação pode ser absorvida.
- Uma fração da radiação pode ser refletida.
- Uma fração da radiação pode ser transmitida.

Corpos ‘Opacos’ são aqueles que não possuem a capacidade de transmitir energia. Assim sendo, toda energia incidente sobre eles é absorvida ou refletida.

Para corpos opacos: $a + r = 1$

Corpo ‘Negro’ é aquele que absorve toda a energia que incide sobre ele. Esse corpo possui $\epsilon = 1$, ou seja, tem máxima capacidade de radiação.

Corpo ‘Cinza’ (‘não negro’) é aquele que tem ϵ constante e menor que 1. No universo não há corpos ‘negros’ verdadeiros, embora muitos objetos se aproximem de possuir as propriedades corretas, por exemplo, um pedaço de metal fosco que não tenha sido polido. Um

corpo ‘negro’ tem emissividade $\epsilon = 1,0$ (por definição um perfeito emissor) e um corpo ‘não negro’ ($\epsilon < 1$) sempre emite, proporcionalmente, menos energia que um corpo ‘negro’, à mesma temperatura. Os objetos do universo nunca são tão eficientes e possuem emissividade inferior a 1.

4.6.3 Introdução à termometria

Todo corpo aquecido emite radiações cujas frequências são função da temperatura. A despeito da presença de outra fonte externa, a geração de calor no corpo provoca o aumento da temperatura. Uma vez que, na prática, não existe trabalho com rendimento 100%, uma parte da energia é perdida e convertida em calor.

Um equipamento que se deteriora tem queda no seu rendimento, com consequente aumento na geração de calor ou na sua capacidade de isolamento térmico e elétrico.

Várias são as influências externas que podem levar a um mau desempenho das conexões, destacando:

- **Ambientais** - devido à contaminação, umidade etc.
- **Elétricas** - pelo aquecimento, corona etc.
- **Mecânicas** - ação de forças advindas de curto-circuitos, dilatação térmica etc.
- **Vibrações** - devidas à corrente elétricas nos condutores, normais e anormais.

Normalmente este mau desempenho se manifesta como sobreaquecimento e provoca um defeito que, embora não acarrete em uma falha imediata, vai evoluindo e deteriorando a conexão aos poucos, devido ao aumento da temperatura e à ação do tempo.

A conexão defeituosa vai se aquecendo progressivamente com esta deterioração e pode provocar a interrupção do sistema e danos às instalações, além de acarretar sérios riscos de vida aos operadores e mantenedores.

Termometria é o ramo da ciência que trata da medição da temperatura, dividindo-se em duas áreas de acordo com o princípio de medição empregado: medição de contato e radiometria.

- **Medição de contato:** busca-se a obtenção de um perfeito equilíbrio térmico entre o sensor e o meio medido. Tal equilíbrio é alcançado principalmente pelos mecanismos da condução e convecção.
- **Radiometria:** baseia-se na detecção da radiação eletromagnética naturalmente emitida pelos corpos em função de sua temperatura absoluta; enquadra-se nas técnicas de sensoriamento remoto, onde as medições são realizadas por sensores que não estão em contato físico com o objeto em estudo. Pode-se ser realizada nas faixas espectrais do ultravioleta, visível, infravermelho ou microondas, abrangendo grande variedade de técnicas, dentre as quais a termografia.

A temperatura é um dos parâmetros de mais fácil compreensão e o acompanhamento de sua variação permite constatar alteração na condição dos equipamentos, componentes e do próprio processo produtivo. A medição e análise da temperatura em equipamento elétrico é uma técnica de Manutenção Preditiva para localizar e acompanhar defeitos incipientes. As medições podem ser feitas por meio de vários instrumentos e métodos, alguns dos quais estão listados a seguir:

- Termômetros de contato
- Fitas auto-adesivas indicadoras de temperatura
- Giz indicador de temperatura
- Visores térmicos - detectores de imagens, destinados a análises qualitativas.
- Tinta termo-sensível
- Pirômetro de radiação
- Pirômetro ótico - 500 a 2.700º C
- Medição de temperatura por radiometria, nas faixas dos espectros ultravioleta, visível, infravermelho ou microondas - radiômetros.
- Sistema infravermelho de termografia - termógrafos e termovisores

4.6.4 Análise e instrumentos termográficos

4.6.4.1 Definições

- **Termografia** - é a técnica de “ler” e medir, à distância, a temperatura de operação de componentes responsáveis pelas conexões de equipamentos elétricos. Suas principais vantagens são: ausência da necessidade de contato com o objeto sob

análise e a não interferência com a produção já que não desligamos o equipamento sob inspeção.

- **Termovisão** - é a técnica de “ver” as imagens térmicas a partir da captação das radiações térmicas invisíveis, na faixa do infravermelho, constantemente emitidas, absorvidas e re-emitidas pelos corpos e objetos.
- **Termograma** - é o resultado da aplicação da Termografia, isto é, formar e ‘reproduzir’ as imagens visíveis a partir da captação das radiações térmicas emitidas pelas conexões. Esta radiação varia com a temperatura e o estado da superfície emissora.

As medições podem ser feitas por meio de dois instrumentos básicos.

- **Radiômetros** - pequenos instrumentos, com forma parecida a uma pistola, que emitem um feixe de raio laser facilitando a focalização do alvo. A radiação infravermelha é captada por um jogo de lentes especiais, direcionadas para um sensor, e a temperatura é mostrada em um visor digital. São instrumentos que coletam a radiação infravermelha através de um sistema ótico fixo e a direciona para um detector que pode ser do tipo termopilha, pirelétrico ou fotodetectores. Realizam medições pontuais e não produzem imagens, fornecendo diretamente as leituras de temperaturas. São instrumentos portáteis, de baixo custo que, fornecido a um especialista da planta e guiado por um programa de inspeções periódicas, fornece excelentes resultados.
- **Termovisores** - Também conhecidos como Termógrafos, são instrumentos utilizados para captar e processar as radiações térmicas, que além de medidores de temperaturas, também são câmaras equipadas com sensores especiais que permitem detectar e registrar as “imagens térmicas” e transformar as leituras em imagens de vídeo. A cada temperatura é associada uma cor (ou um tom de cinza) de tal forma que, com o uso de uma escala adequada, podemos observar imagens coloridas da região analisada e medir as diferenças de temperatura nas várias peças e componentes de uma determinada cena sob foco. As cores são tanto mais claras quanto maior for à temperatura do objeto. Alguns modelos possuem tal flexibilidade operacional que permite acoplar máquina fotográfica, gravador de vídeo e interface para câmara digital e microcomputador para que as imagens termográficas possam ser digitalizadas ou impressas.

O espectro infravermelho fornece uma imagem térmica do objeto em estudo. Esta imagem é obtida pela decomposição cromática de toda a faixa de temperatura irradiada pelo objeto.

Todo corpo irradia energia eletromagnética em forma de calor, embora em maior ou menor intensidade. Esta energia é irradiada em ondas que produzem tonalidades de cores variáveis de onda com o seu comprimento. Então cada faixa de temperatura gera um determinado comprimento de onda, ao qual corresponde uma tonalidade de cor que pode ser representada em uma escala cromática que varia de acordo com as diferentes faixas de temperatura do objeto em observação.

A radiação infravermelha não é visível a olho nu. Para que possamos estudá-la é necessário o uso de lentes especiais que filtram a radiação e traduzam o espectro eletromagnético em um espectro de cores ao qual chamamos espectro térmico. Este espectro pode ser visualizado em uma escala monocromática ou policromática. Em ambas as escalas, a cor preta se associará à faixa mais fria do espectro, assim como a cor branca se associará à faixa mais quente.

A ‘escala monocromática’ vai do preto ao branco, através de suaves variações de tonalidades de cinza. É o tipo de escala usada nos termovisores AGEMA da série 400 e é conhecida como escala ‘Grey’.



A ‘escala policromática’ vai do preto ao branco através de suaves variações de tonalidades de cores, que dependem da escala usada. Na maioria dos casos utiliza-se a escala IRON, que vai do preto ao branco através de tonalidades de violeta, azul, rosa, vermelho, laranja e amarelo.



Termovisor ou ‘câmera termográfica’ são sistemas imageadores dotados de recursos para a análise e medições de temperatura ou irradiação infravermelha. Essas

temperaturas ou irradiações infravermelhas são facilmente visualizadas pelo termovisor gerando uma imagem que é gravada em uma interface digital, que será posteriormente descarregada num microcomputador, com auxílio de *softwares* específicos, para análise das imagens geradas durante a inspeção.

4.6.5 Termografia na manutenção preditiva

A Termografia é uma técnica de inspeção não destrutiva que possibilita a medição de temperaturas, ou observação de padrões diferenciais de calor através da radiação infravermelha emitida por qualquer corpo impossível de ser vista a olho nu. Possui como objetivo proporcionar informações relativas à condição operacional do componente, equipamento ou processo. A termografia é amplamente usada na indústria podendo ser usada para detectar todo e qualquer defeito que gere troca ou perda de calor. Assim sendo, pode ser muito utilizada tanto na detecção de falhas elétricas ou mecânicas.

Medições termográficas são realizadas com a utilização de sistemas infravermelhos, tendo como princípio a comparação entre as intensidades de radiação proveniente do corpo observado e de uma referência de temperatura.

A técnica preditiva de termografia quando corretamente aplicada aumenta a confiabilidade evitando paradas indesejáveis do equipamento.

Algumas características:

- Realização de medições sem contato físico com a instalação – segurança.
- Aumento da confiabilidade e segurança do equipamento.
- Verificação de equipamentos em pleno funcionamento – não interfere na produção.
- Redução de corretivas.
- Fornecimento de informações para planos de manutenção.
- Inspeção de grandes superfícies em pouco tempo – alto rendimento.

O conceito de temperatura elevada ou de aquecimento de um determinado ponto ou área é um conceito relativo, que deve ser sempre observado em relação à temperatura absoluta ou em relação a uma determinada referência. Desta forma, devemos sempre ficar atentos para

as diferenças de temperaturas nas superfícies dos equipamentos ou diferentes pontos da instalação.

O conceito de elevação de temperatura deve se tomado entre o ponto ensaiado e o ponto de referência, ou entre o ponto ensaiado e a temperatura ambiente. Um mesmo valor de temperatura pode ser elevado ou não, dependendo do referencial a dotado.

Desequilíbrios de cargas podem ocasionar facilmente desequilíbrios de correntes em sistemas polifásicos, o que fatalmente causa um desbalanço térmico entre as fases. Uma fase sobrecarregada é facilmente detectada pela termografia infravermelha.

Uma temperatura em torno de 35 a 40 °C é um valor limite admissível como normal para conexões elétricas de baixa tensão em circuitos de carga de motores a 440 V. No entanto, a conexão de um pólo a 40°C contra 28°C dos outros dois pólos pode representar um problema de contato em conexões e chaves ou um desequilíbrio de carga no circuito trifásico. A diferença de temperatura neste caso não deve ser vista como uma diferença de apenas 12°C, mas como uma elevação de temperatura em uma das faces de 43% em relação às outras.

Isto só é possível com a utilização de equipamentos especiais como radiômetros, sistemas de varredura linear, visores térmicos e termovisores. O mais usado para inspeções térmicas são os termovisores.

Essas técnicas ou métodos permitem retratar um perfil técnico de forma gráfica. Estes podem ser por contato ou sem contato. As termografias por contato são oriundas de reações químicas sobre superfícies através de tintas, substâncias fosforescente, papéis, cristais líquidos, e outras substâncias especiais sensíveis à temperatura.

Quanto à termografia sem contato, também conhecida por termografia por infravermelho, é a técnica que por meio da captação da radiação térmica emitida naturalmente pelos corpos, permite a formação de imagens térmicas - termogramas, e a medição da temperatura do alvo em tempo real.

Os sistemas infravermelhos, ou sistemas termográficos, são instrumentos destinados a detectar a radiação térmica e convertê-la em sinais eletrônicos que, devidamente processados,

permitem a formação de imagens térmicas e a medição remota de temperaturas. Tais sistemas têm se difundido em ampla gama de aplicações, tornando a termografia uma importante ferramenta da indústria e na pesquisa.

Com a implantação da manutenção preditiva por termografia, pode-se eliminar o elevado número de ações corretivas, bem como o risco de incêndios causados por aquecimentos de cabos, conexões, chaves, seccionadores, transformadores etc., que acarretam grandes custos com quebras inesperadas (até 50 vezes, contando o custo com a perda de produção). Com a inspeção termográfica é possível diagnosticar com exatidão todos os equipamentos (ou seus componentes) com alguma anomalia (aumento da temperatura por mau contato, oxidação ou sobrecarga) permitindo programar paradas para manutenção corretiva sabendo exatamente onde agir sem perder tempo reapertando, limpando e trocando equipamentos (ou componentes) desnecessariamente, o que poderia demandar mais tempo, sem a necessidade desta substituição.

Com uma medição periódica pode-se controlar o tempo de vida útil desses equipamentos com grande confiabilidade e acompanhamento preciso, reduzindo consideravelmente o número de quebras e máquinas paradas por um eventual defeito no sistema (sobrecarga, mau contato, oxidação etc.).

4.6.5.1 Aplicação da termografia na indústria

De maneira geral o acompanhamento e a análise da temperatura de operação não são importantes apenas para os equipamentos elétricos, sendo particularmente recomendado em:

- **Mancais em máquinas rotativas** - devido aos problemas de desgastes ou lubrificação.
- **Superfície de equipamentos estacionários** - por causa dos danos do isolamento, como deterioração e perda da cobertura refratária.
- **Equipamentos elétricos** como buchas, seccionadores, chaves, disjuntores, cabos, muflas, transformadores e assessórios (conexões, conectores, barramentos, emendas etc.) - associados ao mau contato elétrico.

O acompanhamento de temperatura em equipamento elétrico é um método preditivo para localizar e acompanhar defeitos incipientes.

Este técnica pode ser empregada no monitoramento de:

- **Instalações elétricas** - pelo fato de ser a temperatura a principal variável detectável no processo de um defeito/falha de uma instalação elétrica, é onde está concentrada a maior aplicação da termografia na área industrial. Uma inspeção termográfica em instalações elétricas identificará problemas causados pelas relações corrente / resistência, normalmente provocados por conexões frouxas, corroídas, oxidadas ou por falhas de componentes. Além disso, erros de projetos, falhas em montagens e até o excesso e/ou falta de manutenção preventiva podem provocar sobre aquecimento nos sistemas elétricos.

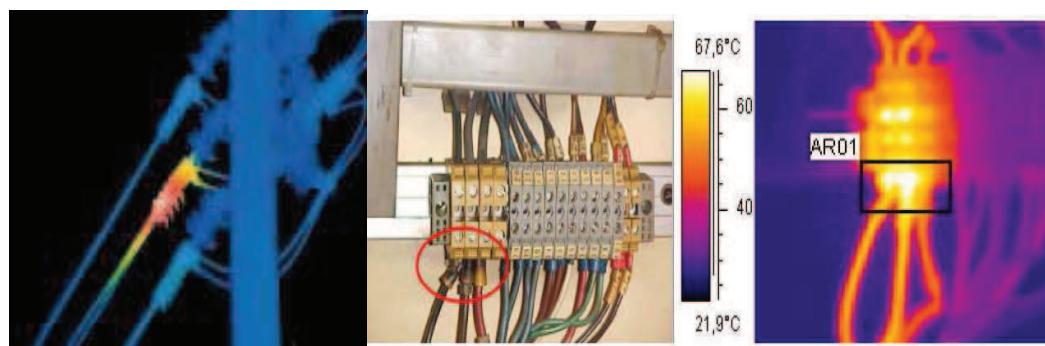


Figura 112 - Exemplos de Imagens Termográficas de Instalações Elétricas [31]

- **Equipamentos estáticos** - a utilização da termografia infravermelha em planos de inspeções de equipamentos estáticos visa à detecção de falhas em potencial em seus estágios iniciais, quando ainda não são perceptíveis pelos sensores dos respectivos equipamentos. Dentre as diversas aplicações, citamos: detecção e quantificação de obstruções de trocadores de calor; detecção de válvulas com passagem interna de óleo pela sede; filtros em processo inicial de obstrução; cilindros hidráulicos com passagem interna de óleo pela sede; purgadores de vapor estancados.

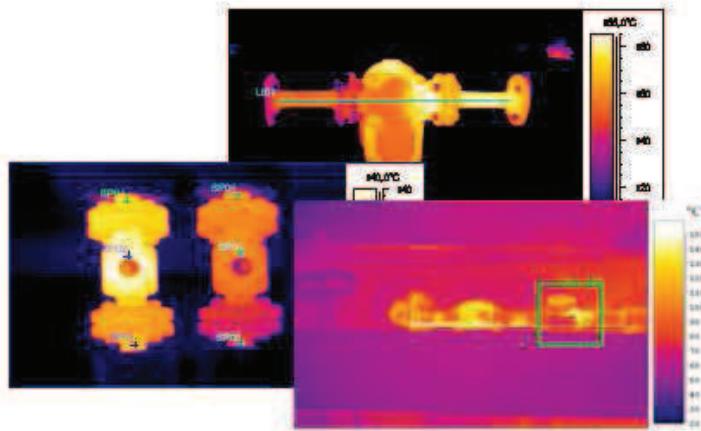


Figura 113 - Exemplos de Imagens Termográficas de Equipamentos Estáticos [31]

- **Revestimentos estruturais (térmico e antiácido)** - a aplicação de serviços termográficos em revestimentos estruturais baseia-se no princípio de que, existindo uma temperatura em regime contínuo dentro de um recipiente, a temperatura superficial externa é uma função direta da condução do calor através do composto cerâmico da respectiva parede. Assim, tanto a degradação do isolamento térmico como um desgaste do refratário são apresentados na forma de mapa termográfico. Com o mapa termográfico pode-se planejar, de forma racional, a reforma e/ou reparos localizados do composto cerâmico.

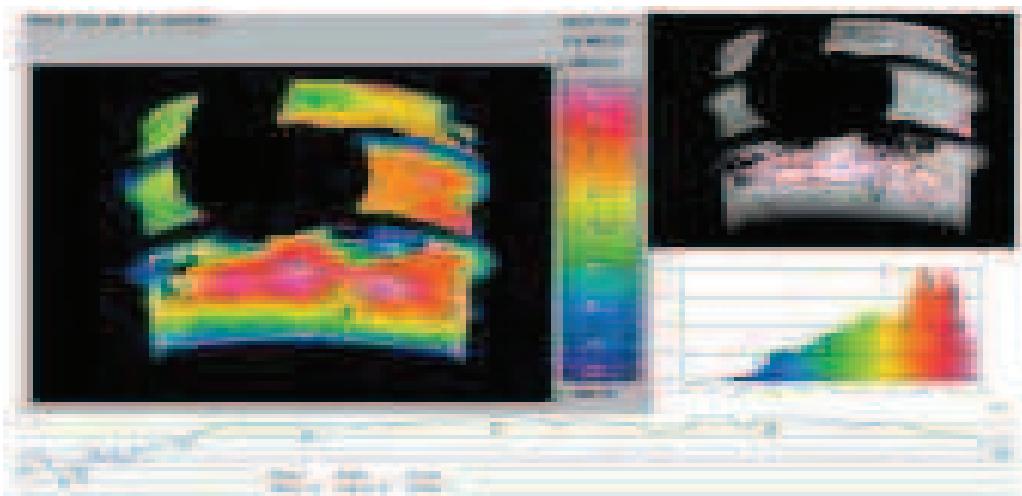


Figura 114 - Exemplo de Imagens Termográficas em Revestimentos Estruturais [16]

- **Processos industriais** - a termografia por infravermelho tem sido aplicado tanto através de sistemas on-line quanto *off-line*, em fabricação de papel, vidro,

lingotamento/laminação de siderurgia, pelotização de minérios de ferro. Em todas estas aplicações a termografia busca essencialmente as perdas qualitativas da assimetria térmica desses processos.

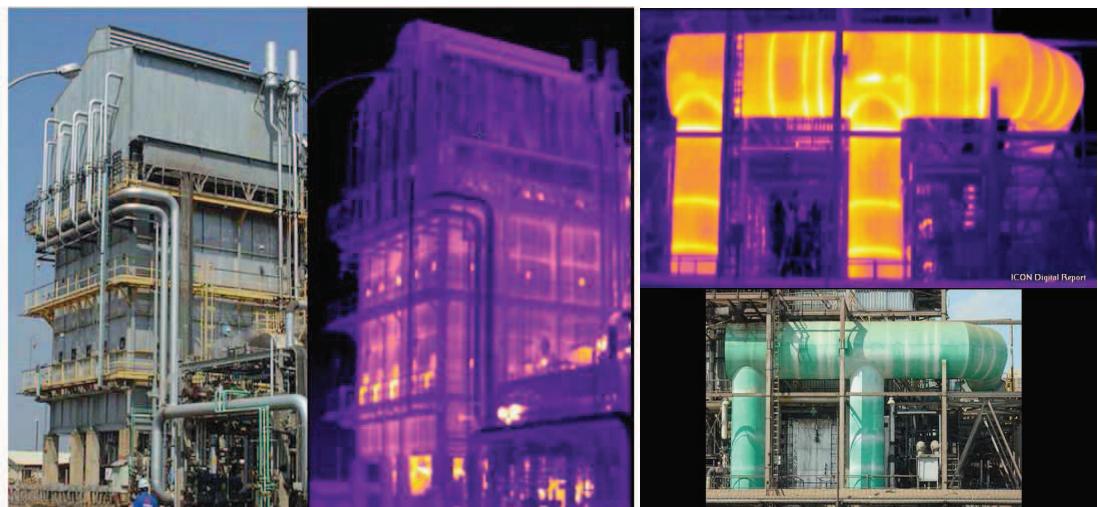


Figura 115 - Exemplo de Imagens Termográficas em Processos [31]

- **Máquinas elétricas** - em motores, geradores e transformadores, a termografia deve ser aplicada de forma correlacionada com outras técnicas. Para os diagnósticos de falhas elétricas potenciais, a termografia infravermelha parte do princípio de que a potência de tais máquinas que não sai em forma de serviço, de alguma maneira está se transformando em perdas e sendo dissipada através do efeito joule. Estas análises termográficas são tanto qualitativas quanto quantitativas e permitem ao usuário acompanhar o envelhecimento da máquina, bem como diagnosticar outras falhas decorrentes de curto-círcuito parcial entre espiras, falha parcial de isolamento, refrigeração etc.

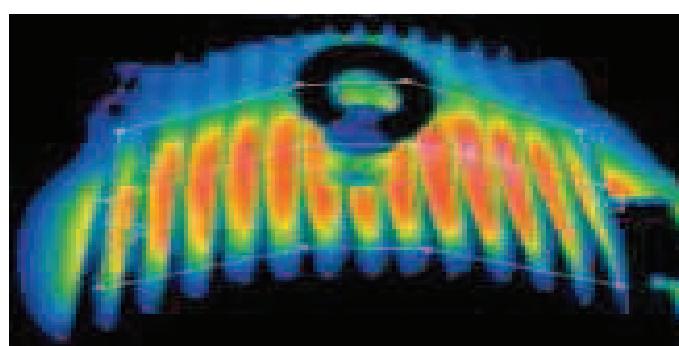


Figura 116 – Exemplo de Imagem Termográfica em Máquinas Elétricas [16]

- **Conjuntos rotativos** - as inspeções em equipamentos rotativos utilizando a termografia infravermelha aplicam-se em todo e qualquer equipamento onde a

temperatura é uma variável mensurável num processo de análise de falha. Esta aplicação parte do princípio do equilíbrio dinâmico e térmico do conjunto de peças girantes e fixas, e é explicada pelas leis da mecânica de fluidos e transmissão de calor. O aquecimento normal resultante do funcionamento de um equipamento rotativo é função da pressão do trabalho, da velocidade de deslizamento, do coeficiente de atrito das superfícies e da viscosidade do lubrificante. O calor assim gerado é dissipado pelos processos de condução, convecção e radiação. Desta forma, numa condição normal de funcionamento o conjunto trabalha em equilíbrio entre o calor gerado e o retirado. Caso haja desequilíbrio térmico ou um equilíbrio em nível superior ao do projeto, numa situação em que o sistema de refrigeração esteja normal, é possível, por meio de análise termográfica qualitativa e/ou quantitativa, associar tal irregularidade a uma geração maior de calor, o que de forma geral, representa um provável problema. Como exemplo de aplicação, temos mancais, acoplamentos, polias, transportadores, roletes, bombas, ventiladores, compressores etc. O valor agregado na aplicação da termografia em inspeções de equipamentos rotativos está basicamente na indicação instantânea, clara e exata da área com problemas. Outras técnicas de inspeções, tais como análise de vibração e ultrassom ou ferrografia devem ser utilizadas, num processo integrado de análise multi-parâmetros, com o objetivo de se encontrar e/ou comprovar a causa do problema.

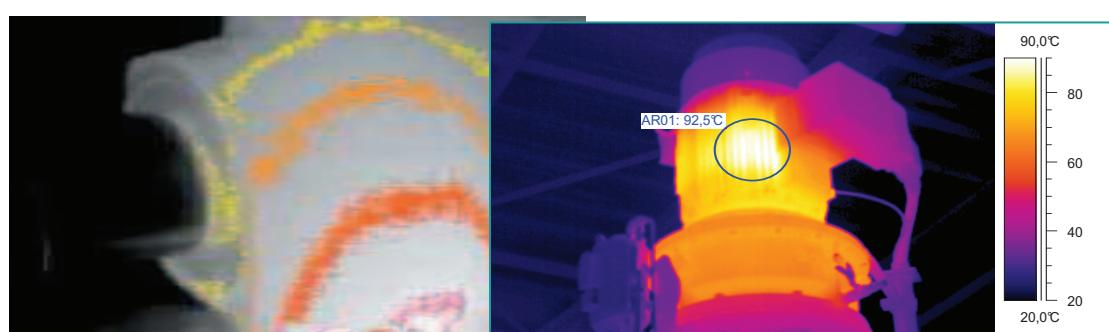


Figura 117 - Exemplo de Imagens Termográficas Conjuntos Rotativos [31]

4.6.5.2 Aplicação da técnica da termografia em motores elétricos

A técnica da termografia pode detectar cinco fontes causadoras de aquecimento dos motores elétricos:

- Interferência da rede elétrica

- Sistema de refrigeração ineficiente
- Influência de fontes externas de calor
- Operação indevida
- Sobrecarga

A aplicação da análise termográfica na avaliação de motores elétricos é importante nos painéis elétricos de comando e de proteção, detectando possíveis avarias elétricas. Além disso, a termografia permite que, em casos onde o motor é de fácil acesso, este seja avaliado para detecção de pontos quentes, fornecendo o diagnóstico preliminar do sistema, identificando possíveis paradas para inspeção e/ou utilização de outras técnicas.

Uma forma de se utilizar as informações térmicas para se fazer a manutenção preditiva é o acompanhamento através de transdutores de temperatura instalados em sua carcaça, dos seus pontos são relevantes. Geralmente acompanha-se a tendência da temperatura de mancais, das armaduras, e do estator.

Nos motores elétricos são inspecionadas as seguintes partes: ventoinha na parte do motor (rolamento traseiro), eixo dianteiro do motor (rolamento dianteiro), carcaça do motor, caixa de ligações (conexões) e acoplamentos.

O limite de temperatura ao qual um motor elétrico pode ser submetido depende dos materiais empregados em sua construção. Os materiais isolantes são especificados segundo classes de isolamento, cada qual definida pelo respectivo limite de temperatura que o material pode suportar continuamente sem que sua vida útil seja afetada.

Normalmente, os trabalhos técnicos sobre inspeção de motores costumam apresentar como limites de temperatura dados práticos, obtidos em campo por termografistas.

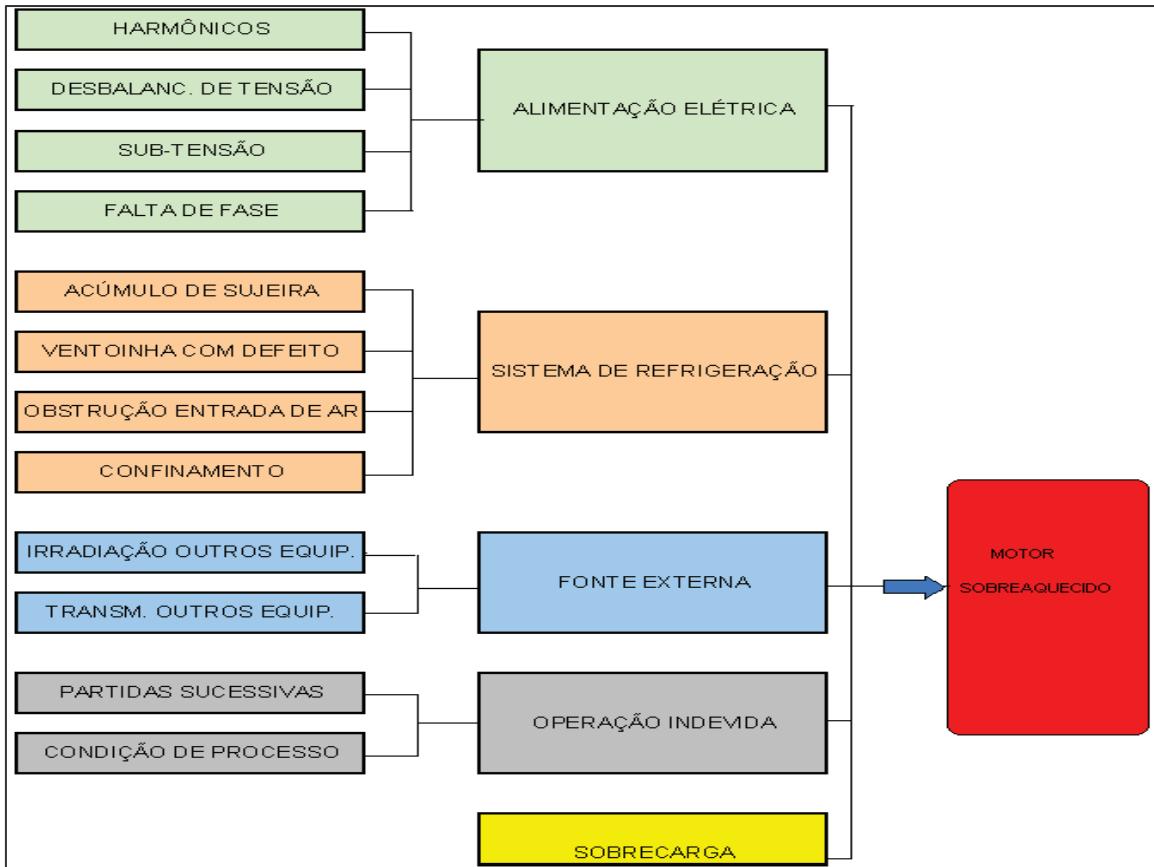


Figura 118 - Árvore de Falhas de Sobreaquecimento de Motores [17]

O motor elétrico sobreaquecido é resultado de uma ou a combinação de mais fontes de interferência físicas:

- **Interferência na alimentação elétrica:** que pode ser devida a diversos fatores como a presença de harmônicos na rede; desbalanceamento de tensão; sobretensão; subtensão; oscilações de tensão na rede; falta de fase; problemas quais vão provocar um aumento de temperatura no motor provocando uma degradação da isoliação e resultado no curto-circuito no enrolamento do motor.
- **Ineficiência do sistema de refrigeração:** a ineficiência pode ocorrer devido ao acúmulo de sujeira; ventoinha quebrada; ventoinha com defeito; obstrução na entrada de ar e confinamento; e/ou motor localizado em um ambiente demasiadamente aquecido. O motor trabalhando demasiadamente aquecido pode chegar a índices críticos que ocasionam a degradação da sua isoliação, ou mesmo da lubrificação dos rolamentos, resultando posteriormente numa falha de rolamento. Ambos os casos, degradação da isoliação ou travamento de rolamentos, vão contribuir para ocorrência de um curto-círcito nos enrolamentos do motor, levando-o a sua queima.

- **Influência de fonte externa de temperatura:** o motor localizado em ambiente aquecido, como próximo de estufas e fornos podem receber a irradiação destes equipamentos que, transmitidos ao motor, elevam a sua temperatura causando a degradação e o envelhecimento da isolação dos enrolamentos.
- **Operação indevida:** ocorrem quando são realizadas partidas excessivas no motor acima das previstas em seu projeto. Motores com partidas frequentes e sucessivas são portadores de envelhecimento avançados e precoces nos enrolamentos. Outra situação que provoca aquecimento por operação indevida é a não observação dos ciclos de operação nominais e ocorrência de condições de processo atípicas que levam a uma sobrecarga, elevando a temperatura dos enrolamentos.
- **Sobrecarga:** pode ser resultante de diversos fatores, tais como, falta de lubrificação ou outros problemas mecânicos, levando a um travamento de mancal ou da máquina acionada; problemas na rede elétrica como nos painéis ou nas caixas de ligações dos motores, levando a um desbalanceamento, falta de fase, ou subtensão, resultando na sobrecarga.

Como exemplo, vamos observar a MTA - Máxima Temperatura Admissível, para motores elétricos de classe de isolação F, que indicará as falhas que poderão ocorrer com o motor, segundo Ittner [17].

1. Em motores até 50 CV de classe de isolação F

- No eixo traseiro - ventoinha (rolamento traseiro) - 60°C.
- Eixo dianteiro (rolamento dianteiro) - 70°C.
- Máxima temperatura encontrada no corpo do motor (carcaça) - 80°C.
- Caixa de ligações (conexões) - 70°C.

Ao fazer inspeção nas conexões da caixa de ligação de um motor elétrico, devem-se afastar bem os terminais do corpo do motor e procurar medir lateralmente os mesmos, para evitar influência dos reflexos, vindos do fundo da caixa de ligação do motor, a parede nesta área é sempre mais quente e pode provocar distorções na leitura. O motor deve ser inspecionado em funcionamento, portanto, ao abrir a caixa de ligação desses motores, observar cuidados em relação à segurança (utilizar luvas isolantes). Não é recomendável, abrir caixas de ligações de motores maiores que 50 CV.

2. Em motores acima de 50 CV de classe de isolação F

- No eixo traseiro - ventoinha (rolamento traseiro): 60°C.
- Eixo dianteiro (rolamento dianteiro): 70°C.
- Máxima temperatura encontrada no corpo do motor (carcaça): 120°C.
- Caixa de ligações (conexões): 70°C.

Os motores maiores costumam apresentar regiões de aquecimento ao lado da caixa de ligação (lado direito em direção ao eixo dianteiro do motor, por isso, a MTA é de 120°C para estas regiões, que é a máxima temperatura da carcaça destes motores). Motores menores que 50 CV, normalmente, não apresentam esta característica.

3. Mancais

Os limites de temperatura para mancais variam de acordo com o modelo e o tipo de lubrificação adotado. O problema mais comum encontrado em mancais lubrificados por graxa é o excesso de lubrificação que causa aquecimento excessivo no mancal, deteriorização das propriedades do lubrificante gerando posterior desgaste do rolamento, sendo, também um desperdício de material dentro da manutenção. O MTA para mancais:

- Lubrificado com graxa: 90°C.
- Lubrificado com óleo: 75°C.

4. Rolamentos

É indicativo de anormalidades em rolamento, se o eixo dianteiro do motor estiver acima de 70°C, ou se a temperatura do eixo for 20°C acima da temperatura da carcaça do mesmo. Neste caso, se faz necessário complementar à inspeção com análise de vibração e verificar se o aquecimento provém dele (rolamento já comprometido); ou em virtude de desalinhamento (rolamento ainda não comprometido). Também é indicativo de anormalidade, temperaturas acima de 60°C no eixo traseiro do motor (ventoinha), pois se trata de ser a região mais fria do motor.

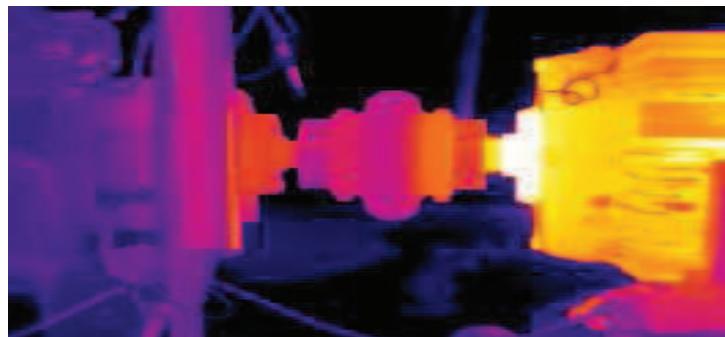


Figura 119 - Termograma Demonstrando Aquecimento Elevado no Mancal Dianteiro do Motor, Resultando em Sobrecarga e Posterior Travamento do Rolamento [17]

4.6.5.3 Critérios de classificação dos problemas de aquecimento

As inspeções termográficas são realizadas nos mais variados tipos de equipamentos, sob diferentes temperaturas ambientes e condições de carga. Inicialmente é realizado o registro de imagens e documentação de todas as informações térmicas pertinentes, relativas ao equipamento avaliado. Em seguida, são realizadas análises sobre os dados coletados, classificando as anomalias encontradas, segundo critérios pré-estabelecidos. O relatório final conterá as informações necessárias à tomada de decisão quanto à intervenção nos equipamentos.

Atualmente não existe uma norma padrão que estabeleça um critério único para classificação de anomalias encontradas a partir de inspeções termográficas. Assim, critérios e métodos diferentes são utilizados pelas empresas e como, consequência, a classificação dos problemas detectados numa inspeção tende a variar significativamente de uma empresa para outra.

1. Correção dos aquecimentos

O método de correção baseado em troca térmica, desenvolvido pela ICON Tecnologia (empresa especializada em serviços de inspeção termográfica industrial) em 1992, correlaciona os parâmetros de emissividade (ϵ), velocidade do ar, variação da resistência ôhmica com a temperatura e potência dissipada em função da corrente elétrica.

Para que se possam realizar comparações entre aquecimentos detectados em condições diversas, é necessário que os valores sejam conduzidos a uma condição padrão. Para tanto, deve-se conhecer os parâmetros que afetam as medições em inspeções de redes e sistemas elétricos.

Segundo Veratti (1992) apud Soares [35], a principal vantagem desta metodologia é permitir que as medições realizadas em situações aleatórias possam ser convertidas para uma condição padrão (100% de carga e sem vento). Uma vez padronizadas, as medições podem passar pelo processo de classificação e comparadas com outras medições.

a) Influência da emissividade (ϵ)

A emissividade é um importante parâmetro a ser considerado durante as medições com os termovisores. Seu valor está diretamente relacionado com as características da superfície do componente tais como: composição, textura, ocorrência de óxidos etc. Para maior facilidade na determinação da emissividade dos componentes costuma-se dividi-los em grupos segundo o material de que são feitos. A tabela 11 mostra alguns exemplos.

Tabela 11 – Valores de Emissividade de Componentes [35]

METAL	LIGEIRAMENTE OXIDADO	SEVERAMENTE OXIDADO
Alumínio e suas ligas	0,24 - 0,35	0,67 - 0,95
Cobre e suas ligas	0,39 - 0,50	0,78 - 0,95
Aços	0,52 - 0,60	0,82 - 0,94

MATERIAL	LIMPO	SUJO
Porcelana	0,10 - 0,20	0,80 - 0,95
Borracha	0,70 - 0,80	0,80 - 0,95

Quando é necessária uma maior precisão na medição recomenda-se a determinação individual da emissividade do componente considerado.

O valor da emissividade influencia também a troca térmica do componente com o ambiente e, consequentemente, deve ser levado em consideração nos cálculos de dissipação de calor em função da carga

b) Velocidade do vento

A dissipação de calor pelo mecanismo de convecção em um componente é determinada pela velocidade do ar, a qual pode provocar seu ‘refrigeração forçada’. Em locais

onde a inspeção esteja sendo feita sob a ação de vento deve-se efetuar a correção dos valores de aquecimento para uma situação padrão, sem vento.

Se a velocidade do vento entre 1 e 7 m/s (máximo valor admissível para as inspeções), recomenda-se que seja utilizada a equação a seguir, pois haverá uma sensível dissipação de calor gerado.

$$\Delta T_2 = \Delta T_1 \times (V_1 / V_2)^{0,448} \quad \text{ou} \quad \Delta T_2 = \Delta T_1 \times FCV$$

Onde: V_1 = velocidade do vento no momento da leitura

$$V_2 = 1 \text{ m/s}$$

ΔT_1 = aquecimento medido para velocidade do vento V_1

ΔT_2 = aquecimento calculado para velocidade do vento V_2

FCV = Fator de Correção da Velocidade do Vento - ver tabela 12

Tabela 12 - Fator de Correção da Velocidade do Vento (FCV) [35]

Fator de Correção da Velocidade do Vento (FCV)	
Velocidade do Vento (m/s)	FCV
1	1,00
2	1,37
3	1,64
4	1,86
5	2,06
6	2,23
7	2,39

Quando não se puder medir a velocidade do vento, podemos obter uma aproximação de seu valor pela avaliação do ‘efeito observável’, segundo a tabela 13.

Tabela 13 - Avaliação da Velocidade do Vento [22]

Velocidade do Vento (m/s)	Descrição	Efeito Observável
0 - 0,5	Calmo	A fumaça do cigarro sobe verticalmente.
0,5 - 1	Quase calmo	A fumaça do cigarro apenas indica a direção do ar.
1 - 3	Brisa leve	O vento é sentido no rosto. Movem-se as folhas e agitam-se as bandeiras.
3 - 5	Vento fresco	Folhas e ramos em movimentos constantes. Estendem-se as bandeiras
4 - 8	Moderado	Arrasta a terra e ramos. Trepidam as bandeiras.
8 - 11	Regular	Os arbustos com folhas se inclinam. As bandeiras trepidam mais fortemente.

c) Intensidade de corrente

A potência dissipada por um componente defeituoso cresce rapidamente com o aumento da corrente elétrica que circula por ele. Essa dissipação é determinada pela corrente segundo a fórmula:

$$P = R(t) \times I^2$$

Onde: P = potência dissipada em Watts (W)

R(t) = resistência do componente em Ohms (Ω), variável com a temperatura

I = corrente passando pelo componente em Ampéres (A)

No caso das medições não serem efetuadas com a plena carga do circuito, é necessário calcular o aquecimento que o componente apresentaria a 100% de carga a partir da variação da energia dissipada pelo mesmo. É também necessário calcular o valor da resistência elétrica do componente nessa nova temperatura de equilíbrio.

Tal cálculo é realizado a partir da curva de dissipação de calor do componente, função da emissividade e velocidade do vento, de acordo com o FCC - Fator de Correção de Carga, assim definido:

$$P(m) = FCC \times P(n)$$

$$FCC = (100)^2 / (Q)^2 = Q_n^2 / Q_m^2$$

Onde: P(m) = potência dissipada na condição medida

P(n) = potência dissipada na condição nominal

Q = carga percentual do componente na condição medida

Q_n = carga nominal do componente

Q_m = carga na condição medida

É, também, definido Ac - Aquecimento Corrigido como a T_c - Temperatura Corrigida menos a T_a - Temperatura Ambiente.

$$Ac = T_c - T_a \quad (2)$$

Onde: Ac = aquecimento corrigido

T_c = temperatura corrigida

T_a = temperatura ambiente

2. Critério fixo de classificação

Conforme Veratti (1992) apud Soares [35], esse critério pressupõe a adoção de uma classificação dos componentes elétricos aquecidos, considerando uma seqüência de ações, de acordo com uma escala de valores de aquecimento pré-determinada em relação ao Ac - Aquecimento Corrigido, de maneira idêntica ao definido no item anterior para o Método de Correção Baseado em Troca Térmica (equação 2). Tal critério desconsidera o tipo de componente inspecionado (e sua máxima temperatura de operação) e a influência da temperatura ambiente.

Abaixo são apresentadas duas tabelas referentes ao critério citado por Veratti como ‘tradicional’ e ao critério proposto pela norma norte-americana MIL-STB-2194 (SH) - *Infrared Thermal Imaging Survey Procedure for Electrical Equipment*.

Tabela 14 – Critério Tradicional e MIL-STB-2194 (SH), respectivamente [35]

CRITÉRIO TRADICIONAL (UTILIZADO PARA ALTA TENSÃO)	
AQUECIMENTO	DIAGNÓSTICO
30°C <= Ac	Falha Iminente
20°C <= Ac < 30°C	Falha Certa
10°C <= Ac < 20°C	Falha Provável
Ac < 10°C	Suspeita de Falha

MIL-STB-2194 (SH)	
AQUECIMENTO	DIAGNÓSTICO
70°C <= Ac	Falha Iminente
40°C <= Ac < 70°C	Falha Certa
25°C <= Ac < 40°C	Falha Provável
10°C <= Ac < 25°C	Suspeita de Falha
Ac < 10°C	Normal

O critério denominado ‘tradicional’ foi o primeiro a ser adotado, em meados da década de 60, para componentes externos de alta tensão.

3. Critério flexível de classificação

O CFCA - Critério Flexível de Classificação de Aquecimentos Elétricos foi desenvolvido por Veratti e, segundo o autor, “*a principal vantagem deste critério é levar em consideração as características operacionais dos diversos componentes e as condições de temperatura ambiente no momento da medição*”.

Uma vez padronizadas as medições podem passar pelo processo de classificação e comparadas com outras medições. O aquecimento do componente é definido como a diferença entre sua temperatura e a temperatura ambiente:

$$A = TC - TA$$

Onde: A = aquecimento medido

TC = temperatura do componente

TA = temperatura ambiente

Para que os aquecimentos possam ser submetidos a um processo de classificação torna-se necessário o uso da metodologia desenvolvida pela ICON Tecnologia, o AC - Aquecimento Corrigido considerando FCC - Fatores de Correções de Carga e FCV - Vento é obtido conforme segue:

$$AC = A \times FCC \times FCV$$

Para classificar os aquecimentos corrigidos é realizada sua comparação com o MAA - Máximo Aquecimento Admissível, assim definido:

$$MAA = MTA - Ta$$

Onde: MTA = Máxima Temperatura Admissível para o componente

Ta = Temperatura Ambiente ou temperatura média local

Os valores de MTA são obtidos a partir das especificações técnicas dos componentes ou junto aos fabricantes. Se o MTA não for conhecido, Veratti [40] recomenda:

- MTA = 90°C como valor de referência para conexões e componentes metálicos.
- MTA = 70°C para cabos isolados.

Na tabela 5 são apresentados alguns valores para a MTA baseados em normas ABNT, valores de fabricantes, referências da IEC (*International Electrical Commission*) e na experiência de Veratti (1992) apud Soares [35].

Todo componente tem um LMTA - Limite Máximo de Temperatura Admissível (°C). Quando algum componente é encontrado acima de seu limite, este é registrado e feita uma pré-análise diretamente no campo. Se o mesmo estiver 50% acima da temperatura limite é recomendada uma intervenção imediata. Para todo componente registrado com temperatura acima de seu limite deve ser feito um relatório de ação corretiva indicando a falha e ação a ser tomada (RDP - Relatório Diagnóstico e Prognóstico). Abaixo do limite é considerável normal¹.

¹ Componentes abaixo do limite também são registrados quando mostram temperaturas diferentes de outro componente igual, com a mesma potência e descrição. Esses componentes também são apontados como defeituosos. Por exemplo: desbalanceamento de fase.

Os valores de MTA podem ser obtidos a partir das especificações técnicas dos componentes ou junto aos fabricantes. Caso não se saiba de antemão a MTA a ser considerada recomenda-se a fixação de 90°C como valor de referência para conexões e componentes metálicos e de 70°C para cabos isolados

Tabela 15 – Exemplos de Valores de MTA [35]

ITEM	MTA (°C)
Fios encapados (depende da classe de isolação)	70 a 110
Régua de bornes	70
Conectores de alta tensão (+500V)	90
Cabos isolados até 15 KV	70
Conexões mediante parafusos	90
Conexões e barramentos de baixa tensão	90
Conexões de linha de transmissão aérea	70
Conexões recobertas de prata ou níquel	90
Fusíveis (corpo)	100
Transformadores a óleo - ponto mais quente	80
Transformadores a óleo – óleo	65
Transformadores secos - ponto mais aquecido	Classe de isolação 105
	Classe de isolação 130
	Classe de isolação 155
	Classe de isolação 180

A partir dos dados acima se pode classificar o aquecimento medido. O critério proposto é chamado *flexível* porque estabelece uma graduação de criticidade que se entende desde a temperatura ambiente até a máxima temperatura admissível, como pode ser visto na abaixo:

Tabela 16 – Critério Flexível para Componentes Aquecidos [35]

CRITÉRIO CFCA		
Comparação AC versus MAA	Diagnóstico	Classificação
1,2 MAA <= Ac	Falha Iminente	Crítico
0,9 MAA <= Ac < 1,2 MAA	Falha Certa	Intervenção Imediata
0,6 MAA <= Ac < 0,9 MAA	Falha Provável	Intervenção Programada
0,3 MAA <= Ac < 0,6 MAA	Suspeita de Falha	Observação
Ac < 0,3 MAA	Normal	Normal

Segundo Soares [35] citando Veratti, entende-se por intervenção não apenas a troca do componente, como também a sua limpeza e/ou reaperto. A observação envolve a verificação periódica da evolução térmica de um componente que a priori não apresenta aquecimento que justifique uma ação sobre ele.

Para que a empresa possa se preparar convenientemente para o reparo, pode-se admitir que a intervenção seja efetuada em prazos além da Data Limite de Intervenção (DLI), desde que nesse período a mesma atue com meios como a redução de carga ou ventilação forçada e faça o acompanhamento e avaliação da evolução térmica do componente aquecido como radiômetro ou termovisores, até o momento da intervenção ou eliminação total do problema levantado.

Se necessário, deve-se consultar o fabricante do componente para um embasamento técnico quanto aos limites operacionais admissíveis. Esses casos deverão ser devidamente registrados e notificados às gerências, sobretudo se envolverem riscos à segurança, meio ambiente e perda de produção.

Com o objetivo de introduzir uma variável que indique a importância da falha no contexto do sistema produtivo torna-se necessário incluir na classificação do aquecimento o parâmetro da *abrangência* do componente.

A abrangência do componente depende, primordialmente, do custo que sua falha pode causar, seja sob o ponto de vista de produção, segurança, ambiente ou de imagem da empresa.

A abrangência pode ser:

- **Local:** quando sua falha pode ser facilmente contornada através de manobras ou redundâncias, sem interromper a produção;
- **Setorial:** quando sua falha causa paradas à produção, porém restritas a uma parte da empresa;
- **Global:** quando sua falha afeta o fornecimento de energia da toda a empresa e paradas de custo muito elevado.

Diagnósticos imprecisos podem ser causadores de decisões inadequadas e como consequência, a operação de equipamentos e sistemas pode ser interrompida

desnecessariamente ou, por outro lado, falhas inesperadas podem ocorrer causando prejuízos que poderiam ser evitados.

Conforme Veratti [39], “*a qualidade de uma inspeção termográfica depende do avanço tecnológico do Sistema empregado, da capacitação do elemento humano (operador e cliente) e da metodologia de processamento dos dados*”.

4.7 FERROGRAFIA

4.7.1 Introdução

A ferrografia é uma técnica que permite uma avaliação das condições de desgaste dos componentes de uma máquina. Muitas vezes confundida como uma técnica de análise de lubrificantes é, na verdade, uma técnica de análise de falhas.

Por meio de processos específicos, possibilita a separação, classificação, medição e visualização das partículas existentes em uma amostra de lubrificante. É empregada na análise de falhas, na avaliação rápida do desempenho de lubrificantes e também como uma técnica de manutenção preditiva de máquinas girantes.

Para a área de manutenção, ferrografia consiste na determinação da severidade, modos e tipos de desgaste em máquinas por meio de identificação da morfologia, acabamento superficial, coloração, natureza e tamanho das partículas encontradas em amostras de óleo ou graxas lubrificante de qualquer viscosidade, consistência e opacidade.

O nome ferrografia é histórico e causa alguma confusão por induzir a idéia de tratar apenas de partículas ferrosas. A ferrografia é capaz de identificar metais não ferrosos (bronze, alumínio, cromo etc.), contaminantes sólidos de todo tipo (areia, fibras orgânicas e inorgânicas, sais etc.) e ainda produtos de degradação do lubrificante (borra, gel, lacas, vernizes etc.).

A origem da técnica foi em 1971, idealizada por Vernon C. Westcott, um tribologista de Massachusetts, Estados Unidos, para aplicações na aeronáutica militar.

4.7.2 Técnica

O desenvolvimento da técnica foi baseado nas seguintes premissas:

- ✓ Todas as máquinas se desgastam.
- ✓ O desgaste gera partículas.
- ✓ O tamanho e a quantidade das partículas geradas indicam o grau de severidade.
- ✓ O formato, o estado das superfícies e a cor das partículas geradas, indicam o tipo de desgaste e apontam possíveis causas.
- ✓ A maior parte das partículas geradas é constituída de ligas de ferro, que são magnéticas.
- ✓ Desde que a velocidade de fluxo seja baixa o suficiente, a maioria das partículas suspensas no óleo (desgaste, contaminação etc.) se decantam.

Baseado nessas premissas, Westcott inventou um instrumento para a separação das partículas. Simplificando, ele se constitui de uma lâmina de vidro inclinada, onde o óleo flui a uma velocidade baixa entre duas barreiras que se determinam em um caminho de escoamento.

Embaixo desta lâmina foi colocado um imã poderoso. Desta forma, as partículas suspensas presentes na amostra de lubrificantes, se depositam na lâmina em função do seu tamanho (volume) - as partículas ferromagnéticas grandes se depositam preferencialmente na entrada do ferrograma, onde o fluxo de óleo se inicia. Sucessivamente o tamanho das partículas vai diminuindo, até que, na saída do ferrograma, se concentram as partículas ferromagnéticas com o tamanho da ordem de submícrom.

Todas as demais partículas, como metais não ferromagnéticos (ligas de cobre, alumínio etc.) contaminantes, óxidos, produtos de oxidação do lubrificante, se depositam por gravidade e aleatoriamente, ao longo da lâmina.

4.7.3 Amostragem

É um dos pontos mais críticos da técnica de ferrografia. A escolha do local mais adequado é fundamental para o diagnóstico correto. O óleo coletado deve ser representativo do óleo em uso.

A amostragem é feita cm a máquina em funcionamento ou momentos após sua parada, de forma a ser evitada a precipitação das partículas.

O ponto de coleta deve estar localizado o mais próximo possível da fonte de geração de partículas. No caso de sistemas circulatórios, uma válvula na tubulação de retorno do óleo é o ponto inicial. Quando inacessível, drenos em reservatórios ou amostragem por meios de bombas de coleta são alternativas válidas.

O maior cuidado está em se evitar pontos após filtros ou regiões onde não ocorra homogeneização. Enviadas ao laboratório, as amostras serão analisadas por dois tipos de exames: **quantitativo e analítico**.

4.7.3.1 Técnicas de amostragem

A geração de partículas e os mecanismos de remoção afetam o nível de equilíbrio das partículas em óleos lubrificantes fluidos. As seguintes recomendações feitas:

- Se a amostragem é feita com o sistema em operação, é desejável fazê-la durante uma condição de operação conhecida. Tem sido observado que a concentração de partículas no óleo varia significativamente conforme o modo de operação.
- Se a amostragem é efetuada depois da parada da máquina, o efeito sedimentação deve ser considerado. Coletar a amostra logo em seguida à parada ou no máximo até 2 horas depois. Futuras demonstrações devem acompanhar a 1^a, isto é, se a primeira foi coletada uma hora após a parada, as demais devem seguir o mesmo tempo.
- A troca de óleo deve ser considerada de modo que a amostragem somente seja efetuada quando houver recuperação no equilíbrio de concentração de partículas.

4.7.3.2 Amostragem pela tubulação

É a técnica de amostragem que fornece uma amostra de melhor qualidade, quando coletada na tubulação de retorno do óleo, antes do filtro. Claramente, ela é necessária nas máquinas onde a amostragem deve ser com ela em operação.

Para que a amostragem seja representativa, o óleo que retorna deve ter lubrificado todas as partes da máquina. Se a tubulação for muito grossa e o fluxo for muito lento, amostragem do fundo do tubo deve ser evitada. Válvulas em tubulações têm que sofrer 'flushing' ('lavar'), pois ela é um foco de deposição de partículas, além de contribuir com partículas geradas durante sua abertura e fechamento.

4.7.3.3 Amostragem do reservatório de óleo

Existem duas principais fontes de problemas quando coletamos óleos de reservatórios, ambas devido à tendência de sedimentação das partículas:

- Se coletarmos a amostra do fundo do reservatório, há possibilidade de obtermos uma alta concentração de partículas como resultado da sedimentação.
- Se a coleta for feita diretamente do reservatório perto da superfície, após a parada da máquina, uma concentração muito baixa de partículas pode ser obtida também devido à decantação.

Faremos a seguir algumas recomendações:

- É considerado preferível coletar a amostra com a máquina em operação. Caso não seja possível, a amostragem deve ser feita tão logo possível após a parada do equipamento.
- No caso de coleta de amostra de um reservatório, a seguinte regra deve ser seguida: o tubo de amostragem deve mergulhar pelo menos 5 cm de profundidade do óleo, e a cada hora de atraso na coleta, deve se afundar mais 2,5 cm. Devido à possibilidade de perda de grandes partículas, não é prudente coletar amostras de equipamentos parados há mais de 2 horas.
- Se o sistema possui instalado definitivamente numa válvula de amostragem, então a linha onde está à válvula deve ser ‘lavada’ (*'flushing'*) antes da amostragem. O volume morto do óleo no local deve ser estimado e aproximadamente duas vezes este volume deve ser considerado por lavagem.

4.7.3.4 Frascos de amostragem

O uso de bombonas de plástico para óleos nos quais deve ser analisado o conteúdo de partículas deve ser evitado, por que há possibilidade de contaminação com partículas de plástico, gel ou líquidos corrosivos (principalmente óleos à base de poliéster).

A dificuldade maior é que a superfície pode ficar pegajosa e acumular partículas, fazendo com que as amostras deixem de ser significativas depois de certo tempo de estocagem.

Frascos de metais podem ser usados, porém partículas geradas deste metal podem se confundir com partículas de desgaste. É conveniente o uso de vidro. Pode ser usado o polietileno de alta densidade, que dentre os plásticos é o mais resistente. É recomendável que os frascos sejam feitos de material transparente.

O exame visual pode permitir importantes informações como: cor, turvamento, grau de presença de sedimentos, partículas de desgaste muito severas e presença de líquidos estranhos.

4.7.3.5 Freqüência de amostragem

A freqüência de amostragem deve considerar em primeiro lugar a velocidade em que o desgaste passa do normal para o severo.

Aquelas máquinas, cuja velocidade de degradação seja alta demais, devem ser consideradas freqüências baixas, compatíveis. Em seguida, devem ser considerados fatores como natureza da máquina, seu uso e sua importância para o usuário.

A experiência mostra que muitas máquinas apresentam falhas na partida e grandes partículas de desgaste severo aparecem no óleo lubrificante. Isto se explica, pois estas falhas são oriundas de erros de montagem, peças defeituosas ou projetos inadequados. Muitas outras falhas se originam de uma operação além das suas especificações, velocidades excessivas, sobrecargas, choques, vibrações etc.

A ferrografia é uma técnica usada em peças que estão submetidas ao atrito em presença de lubrificante. A ferrografia não sistemática, aplicada ao equipamento, pode ajudar a encontrar o lubrificante ideal para o equipamento. A máquina com o lubrificante correto tem mais estabilidade, o desgaste evolui de forma lenta e possibilita uma aplicação de preditiva a períodos muito mais longos.

4.7.4 Exames ferrográficos

4.7.4.1 Exame analítico (AN)

Permite a observação visual das partículas para que sejam identificados os tipos de desgaste presentes. A ferrografia analítica ocupa-se de causas e severidade e é mais completa que a ferrografia quantitativa.

O exame microscópio – ferroscopia, da forma das partículas permite inferências quanto à causa, enquanto que a medição do tamanho e a avaliação da incidência levam à conclusão sobre severidade. As avaliações sempre levam em conta o tipo de máquina monitorada.

Sobre uma lâmina de vidro (ferrograma) bombeia-se lentamente a amostra. As partículas são depositadas e posteriormente examinadas com o auxílio de um microscópio ótico especial (ferroscópio).

O ferrograma possui 25 x 60 x 0,7 mm. Montado no ferrógrafo analítico, sofre a ação de um campo magnético cuja distribuição das linhas de força não é uniforme, mas de intensidade menor na entrada do fluxo e, num gradiente crescente, tem sua intensidade máxima na saída.

Desta forma, à medida que a amostra flui por sobre a lâmina, as partículas ferromagnéticas de maior tamanho são depositadas logo na entrada. Avançando-se no ferrograma encontramos as partículas de tamanhos menores.

Na saída observamos as partículas de até 0,1 µm. Estas partículas são identificadas pela forma com que se alinharam, seguindo a direção das linhas de força do campo magnético.

As partículas paramagnéticas ou não magnéticas (ligas de cobre, alumínio, prata, chumbo etc., e contaminantes como areia, borracha, fibras de pano, papel etc.) depositam-se de forma aleatória. São encontradas ao longo do ferrograma.

Ao final do bombeamento da amostra, circula-se um solvente especial, isento de partículas, que ‘lava’ o ferrograma, levando junto o lubrificante. Até 98% das partículas

presentes na amostra permanecem retidos na lâmina. Após a secagem, o ferrograma está pronto para ser examinado no ferroscópio.

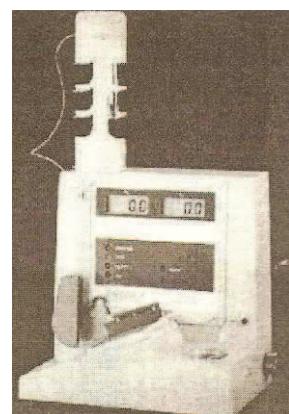


Figura 120 – Ferrógrafo Analítico [5]

O ferrograma pronto tem a aparência da figura 121. Todo material utilizado na ferrografia é descartável. Um ferrograma, com cuidados especiais, pode ser armazenado por até 4 anos.

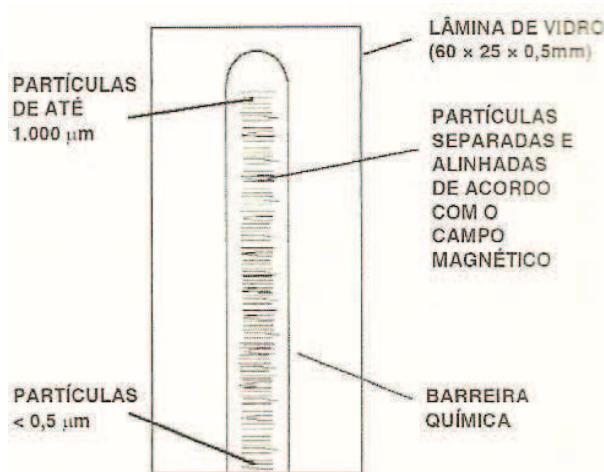


Figura 121 – Ferrograma [5]

Cada tipo de desgaste pode ser identificado pelas diferentes formas que as partículas adquirem ao serem geradas.

O desgaste mais comum é a **esfoliação**. São partículas geralmente de 5 μm podendo atingir 15 μm. Sua forma lembra blocos de aveia. A **esfoliação** é gerada sem a necessidade de contato metálico, mas apenas pela transmissão de força tangencial entre uma peça e outra por meio do filme lubrificante.

A quantidade e o tamanho destas partículas aumentarão caso a espessura do filme seja reduzida devido à sobrecarga, diminuição da viscosidade do óleo, diminuição da velocidade da máquina etc.

Outro desgaste bastante comum é a **abrasão**. Gera partículas assemelhadas a cavacos com dimensões em torno de 2 de microns. A principal causa para este tipo de desgaste é a contaminação por areia. Os pequenos grãos de areia ingeridos pela máquina se incrustam, por exemplo, num mancal de metal patente e o canto vivo exposto ‘usina’ o eixo que está girando, tal qual um torno mecânico.

De forma geral, considera-se como indício de problema partículas maiores do que 15 μm .

Os vários tipos de partículas observadas pela ferrografia recebem nomes que representam o **tipo de desgaste (esfoliação, abrasão, corrosão etc.)**, sua **forma (laminares, esferas etc.)** ou ainda a **natureza (óxidos, polímeros, contaminantes orgânicos etc.)**.

Cada tipo de partícula possui um procedimento de análise e determinação de incidência própria e independente. São levadas em consideração não apenas a quantidade, mas a gravidade do mecanismo de desgaste e o tamanho da partícula examinada. Para facilitar a representação de todas as partículas foi elaborado um gráfico de barras, onde barras horizontais indicam a incidência.

Por questões meramente de representação, foi adotada uma escala de 0 a 10 no gráfico tradicional. Os limites de cada tipo de partícula dependem exclusivamente da máquina que está sendo monitorada.

De qualquer forma, importa o acompanhamento da evolução da incidência de cada partícula numa máquina específica. Existem máquinas, como turbinas, geradores, sistemas hidráulicos cujas partículas costumam estar sempre abaixo de 4; outras como redutores, podem apresentar partículas na faixa entre 6 e 10. Mas, como já foi visto, não existem máquinas iguais. A ferrografia analítica e a estabilidade da concentração irão definir se a condição é ou não admissível.

Cada tipo de partícula possui uma regra especial. O exemplo da figura 122 detalha algumas das partículas encontradas num caso típico de sobrecarga mecânica com **pitting** em engrenagem e danos em gaiolas de rolamentos, agravados por degradação do lubrificante.

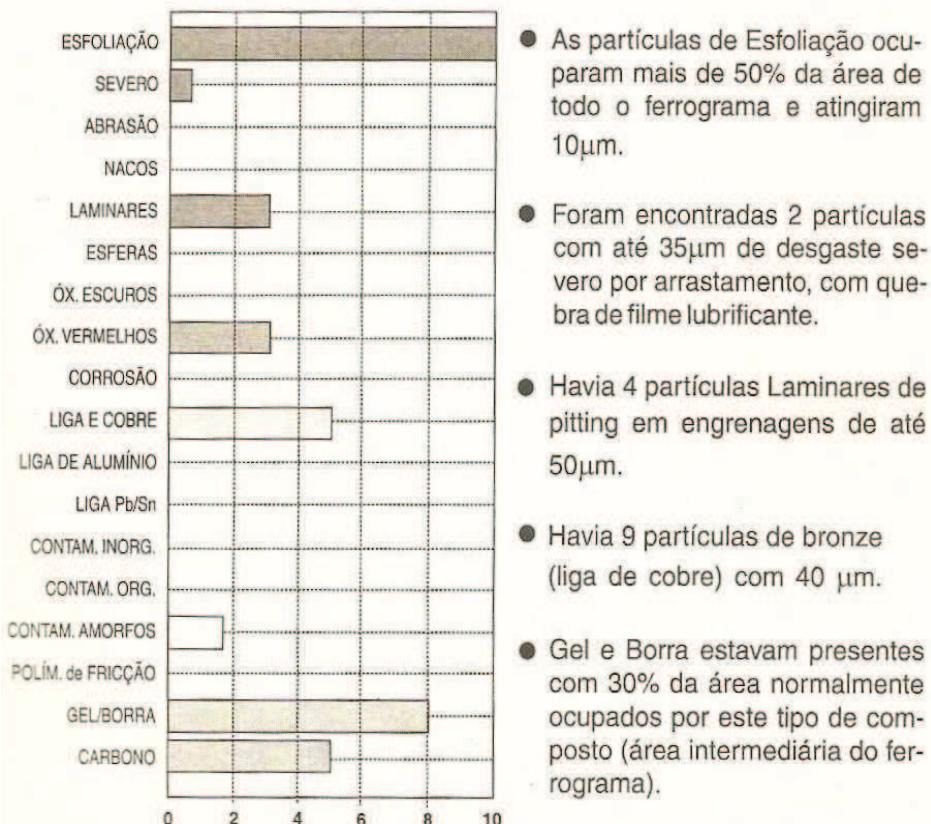


Figura 122 – Exemplo de Partículas Encontradas em uma Amostra [5]

As partículas observadas no ferrograma podem ser registradas fotograficamente. São os laudos fotomicrográficos e o resultado final é o laudo com a indicação das providências de manutenção a serem tomadas, segundo Baroni [5].

ESFOLIAÇÃO Exemplo de redutor em estado normal de desgaste. Ampliação = 500 X		LAMINAR Rolamento em fase inicial de pitting. Ampliação = 500 X	
DESGASTE SEVERO Partícula gerada por arrastamento de material devido contato metal-metal. Este desgaste foi provocado por falha do lubrificante que estava com viscosidade incorreta. Ampliação = 500 X		ESFERAS CONTAMINANTES Resíduos de solda elétrica efetuada em sistema hidráulico. O flushing realizado não foi suficiente para a limpeza do sistema. Ampliação = 1.000 X	
ABRASÃO Partícula semelhante a cavaco de usinagem, gerada pela presença de areia no sistema. Ampliação = 500 X		CONTAMINANTE ORGÂNICO Fibras de filtro de má qualidade. Ampliação = 500 X	
NACO Pitting em engrenagem cementada. Ampliação = 500 X		METAIS NÃO-FERROSOS Liga de Alumínio oriunda de desgaste em labirintos. Ampliação = 500 X	

Figura 123 – Microfotos de Ferrogramas [5]

4.7.4.2 Exame quantitativo (DR)

A ferrografia quantitativa, ou ferrografia de leitura direta (*DR = Direct Reading*) utiliza os mesmos princípios da ferrografia analítica. A diferença está no formato do corpo de prova e no método de leitura.

O campo de prova (conjunto tubo precipitador) é formado por uma mangueira de teflon (PTFE), um tubo de vidro e uma mangueira de drenagem. O tubo de vidro é instalado sobre o campo magnético especial, da mesma forma que o ferrograma. Duas regiões desse tubo são iluminadas de baixo para cima por uma fonte de luz controlada. A sombra formada pelas partículas que se depositam no tubo é observada por fotocélulas ligadas ao circuito microprocessado.

Assim como no ferrograma, as partículas se precipitam de forma ordenada por tamanho. O tubo precipitador é dividido em duas regiões onde se encontram as partículas

maiores do que 5 μm , chamadas Grandes (*Large = L*) e as menores ou iguais a 5 μm , chamadas Pequenas (*Small = S*).

A unidade utilizada na ferrografia quantitativa é exclusiva e arbitrada. Para 50% da área do tubo coberta por partículas foi arbitrado o número 100, adimensional. A leitura fornecida pelo instrumento é diretamente proporcional à concentração de partículas da amostra.

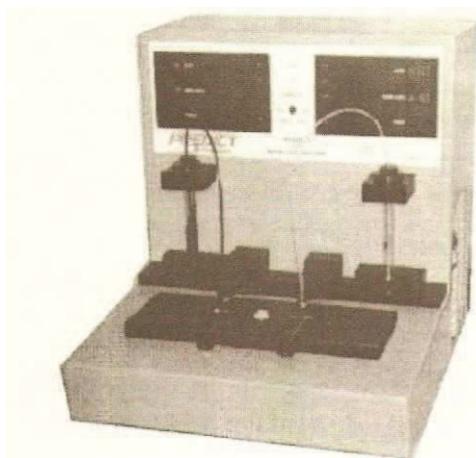


Figura 124 – Ferrógrafo Quantitativo [5]

O manuseio dos valores de L e S permite várias interpretações, tais como:

$L + S$ = Concentração total de partículas.

PLP (Modo de desgaste) = $[(L - S) / (L + S)] \times 100$

IS (Índice de severidade) = $(L^2 - S^2) / \text{diluição}^2$

$L + S$ é o melhor e mais utilizado índice de acompanhamento ferrógrafo do desgaste. O nível de alerta é determinado apenas para o $L + S$. Ele é calculado estatisticamente somando-se duas vezes o desvio padrão à média dos valores anteriormente obtidos de várias amostras. O limite assim calculado indica que 95% dos casos devem ser-lhe inferiores e que, se superado, provavelmente está presente um fator novo, possivelmente um problema.

A ultrapassagem desse tipo não indica necessariamente um defeito grave. Entretanto, deve-se efetuar a ferrografia analítica para determinação da causa e a providência a ser tomada.

Existem anormalidades que têm correção simples, como centrifugação, filtragem, troca de óleo ou drenagem de água. Em outros casos a providência pode ser uma manutenção corretiva.

Pode ser calculado outro nível de alerta, em que 99% a probabilidade de um valor medido caia dentro de seu limite chamado de **nível de alerta**.

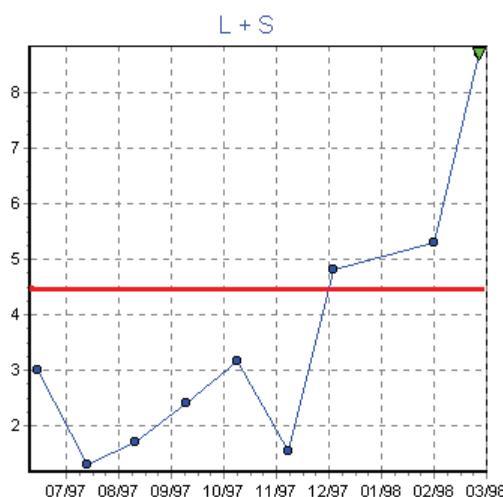


Figura 125 - Gráfico de Tendência da Concentração Total de Partículas (L + S) [5]

Outro indicador que se usa é o IS - Índice de Severidade, calculado pela diferença dos quadrados dos valores lidos diretamente no ferrógrafo, entretanto não admite aplicação quando há diluição na amostra. Está ainda restrito aos laboratórios.

O percentual do PLP representa a concentração de partículas grandes em relação à concentração total. Em termos práticos representa o **modo de desgaste**. Admitindo-se que não ocorram alterações no desgaste da máquina, a taxa de produção de partículas grandes e pequenas deverá ser mantida e, portanto a relação entre estas partículas também se manterá constante. Conclui-se que, mesmo havendo uma troca recente de óleo com consequente redução na concentração total de partículas (L+S), devemos obter resultados do PLP praticamente constantes.

O PLP deve ser utilizado em conjunto com o valor de L+S. Isoladamente não constitui parâmetro para avaliação, pois há casos de valor L+S baixo, com PLP alto e vice-versa. O PLP apenas contribui para interpretação da análise quantitativa. Por exemplo, máquinas que

estejam sujeitas à contaminação por óxidos vermelhos (fuligem) tendem a apresentar alto valor L+S com baixo PLP.

Os resultados obtidos com a ferrografia quantitativa são utilizados principalmente na análise de tendências.

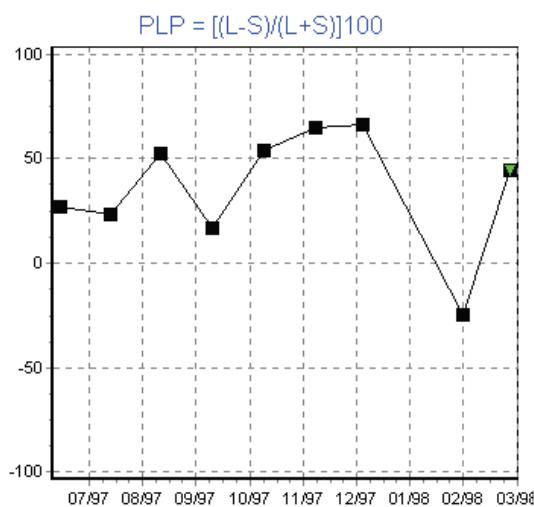


Figura 126 - Gráfico de Tendência de Modo de Desgaste – PLP [5]

4.7.5 Partículas presentes na amostra

As partículas presentes na amostra de lubrificante podem ser classificadas em:

- **Partículas ferrosas geradas por desgaste** - esfoliação e amaciamento, abrasão, fadiga de rolamento e severo por deslizamento.
- **Partículas metálicas não ferrosas geradas por desgaste** - metais brancos: alumínio e magnésio; ligas de cobre: latão e bronze; ligas de metais patentes: estanho e chumbo.
- **Óxidos de ferro** - óxidos vermelhos: ferrugem; óxidos escuros: metais oxidados.
- **Produtos de degradação do lubrificante** - corrosão: ataque ácido; polímeros de fricção: gel, borras, vernizes, oxidação do lubrificante.
- **Contaminantes** - contaminantes em óleos novos, contaminantes com graxas novas, materiais de filtros, flocos de carbono e bissulfeto de molibdênio.

4.7.5.1 Partículas ferrosas geradas por desgaste

São partículas predominantes em grande maioria das amostras. Trata-se do metal base mais utilizado nas máquinas. Como são ferromagnético, eles se apresentam enfileirados, conforme linhas de força magnética e são normalmente muito fáceis de serem identificados. Após o aquecimento a mais de 300 °C se mostra na cor azul, se for aço de baixa liga; e na cor amarelo palha, se for aço de média liga - ver 4.7.7.1.

4.7.5.2 Esfoliação e amaciamento

Os desgastes por esfoliação são gerados em condições normais de operação de uma máquina. São partículas com formato de escamas finas e largas de aspecto liso e formas arredondadas. São conhecidas como partículas de desgaste normais e enquanto este modo de desgaste permanecer há garantia de que nenhum mal súbito deve ocorrer na máquina. O excesso de partículas de esfoliação ou normal indicam envelhecimento acelerado do equipamento, podendo ser corrigido com a utilização de lubrificantes de alto desempenho.

Na fase inicial de operação de uma máquina, ocorre sempre o amaciamento, decorrente da acomodação das superfícies. São geradas grandes quantidades de partículas prismáticas, típicas de usinagem, cizalhadas em movimentos de deslizamento, que ficam no óleo lubrificante.

Em movimentos de rolamento, estas irregularidades provocam arrancamento de material de fadiga, formando pequenos pitting nas superfícies. Estas partículas devem ser removidas, através de '*flushing*', após 30 dias de operação da máquina, sob o risco delas gerarem outros tipos de desgaste cada vez piores.

A utilização de lubrificantes de alto desempenho, que não sacrifica a superfície, é altamente desejável para esta fase de amaciamento.

As figuras 127 e 128 mostram fotos de desgaste normal e amaciamento.

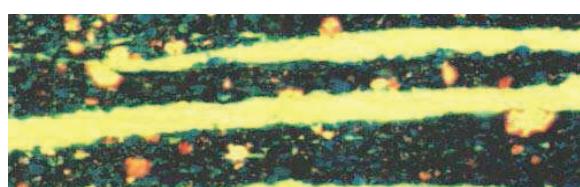


Figura 127 – Desgaste Normal Após Aquecimento a 330 °C [13]

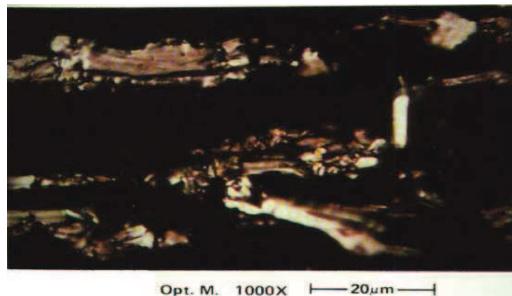


Figura 128 – Desgaste de Amaciamento [13]

4.7.5.3 Abrasão

É o desgaste resultante da penetração de uma superfície em outra, num trabalho semelhante ao executado por um torno; o resultado são partículas finas e compridas.

Identificamos dois tipos de desgaste por abrasão:

- **Abrasão a dois corpos:** é o caso típico de um desalinhamento, onde um canto vivo de uma superfície toca a outra, gerando uma partícula fina, comprida e geralmente reta. Estas partículas deixam de ser geradas conforme as interferências vão sendo eliminadas pelo próprio desgaste. Podem chegar de 25 a 100 microns de comprimento.
- **Abrasão a três corpos:** é o caso típico da contaminação por areia abrasiva. Os piores são areias do ‘tamanho da folga’, que entram rasgando. As partículas de areia se engastam em uma das superfícies e começa a usinar a outra, gerando partículas finas, compridas e encaracoladas. O tamanho médio é de aproximadamente 50 microns. A solução é eliminar, ou pelo menos diminuir a entrada dos contaminantes e, dependendo do caso, filtrar constantemente o óleo ou instalar um sistema de filtragem adequado.

As figuras 129 e 130 mostram partículas de abrasão a dois corpos e a três corpos, respectivamente.

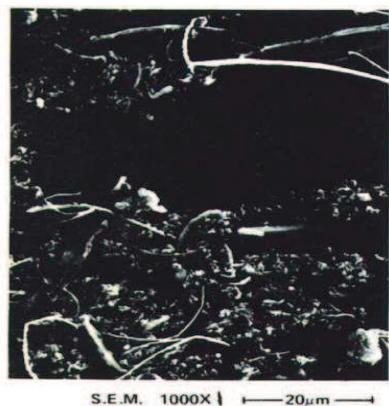


Figura 129 - Abrasão a Dois Corpos [13]

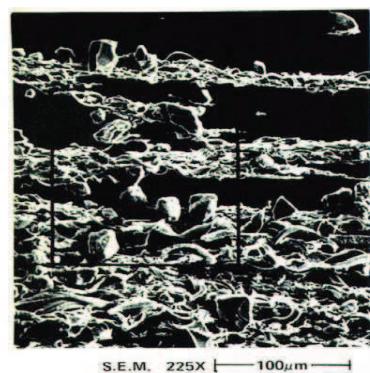


Figura 130 – Abrasão a Três Corpos [13]

4.7.5.4 Fadiga de rolamentos

É típico de mancais de rolamentos, embora possa ocorrer também na região da linha primitiva de um dente de engrenagem.

Três tipos de partículas diferentes são associados com a fadiga de rolamento: partículas esféricas, partículas de fadiga e partículas laminares.

Quando um processo de fadiga ocorre, a superfície começa a apresentar microtrincas de fadiga. No interior da microtrinca, pequenas lascas de material se desprendem. A interface da microtrinca se movimenta, uma em contato com a outra, num movimento circular, e pouco a pouco, as lascas tomam o formato esférico e são expulsas das microtrincas, em quantidades que chegam a milhões de partículas, em geral entre 1 a 5 microns.

As microtrincas avançam e se propagam, voltando novamente para a superfície, deixando em seu lugar uma cavidade conhecida como *pitting*. Isto significa que o aparecimento de esferas de fadiga antecipa o aparecimento de *pitting* e de partículas de fadiga, em pistas de rolamentos ou dentes de engrenagens.

Estas partículas de fadiga podem atingir o tamanho de 100 microns, durante o período de microfissuras, perto da falha catastrófica, atinge tamanhos bem maiores.

A presença de esferas não significa necessariamente existência de fadiga. A erosão por cavitação, processos de soldagem, retíficas e fundição também geram esferas. Os lubrificantes

fornecidos pelos fabricantes frequentemente contém partículas metálicas, incluindo esferas e outras partículas contaminantes.

As partículas laminares são geradas durante toda a vida do elemento, aumentando sensivelmente quando as partículas de fadiga também começam a aparecer. Consequentemente, quando a taxa de geração de partículas laminares aumenta, é sinal de que problemas de contato em superfícies de rolamento estão ocorrendo.

As imagens da figura 131 mostram partículas esféricas, de fadiga e laminares.

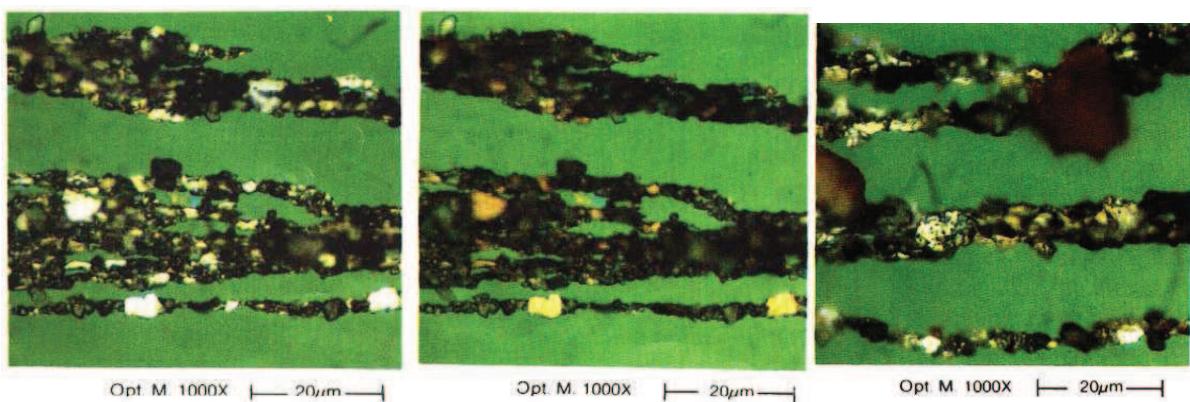


Figura 131 - Partículas Esféricas com Média de 2 Microns; de Fadiga por Rolamento - Superfícies Lisas e Bordas; e Laminares Finas e Largas - Superficie Lisa [13]

4.7.5.5 Produtos de degradação do lubrificante

É o resultado da reação do lubrificante com oxigênio do ar. Todo lubrificante quando submetido a altas temperaturas ou longos períodos de utilização, tende a sofrer oxidação. Desta oxidação podem surgir dois subprodutos: formação de ácidos e gel.

1. Contaminantes

Considera-se como contaminante todo aquele material que aparece no óleo lubrificante, de forma fortuita ou casual, sem que faça parte do sistema.

a) Contaminantes em óleos novos

A maioria dos óleos novos contidos em latas ou tambores contém vários tipos de partículas de contaminantes. Os danos às máquinas devidos aos contaminantes de óleos novos dependem da sua dureza, seu tamanho, seu volume ou quantidade e criticidade de sua aplicação.

Felizmente, muitas máquinas são protegidas por filtros adequados que impedem a chegada dos contaminantes nos pontos de lubrificação. Em máquinas de precisão não protegidas por sistemas de filtragem, é conveniente filtrar o óleo antes do abastecimento.

A figura 132 mostra a entrada do ferrograma de um óleo sintético à base de poliéster de uma amostra colhida de uma lata recentemente aberta. A concentração de partículas é muitas vezes a concentração normalmente encontrada neste tipo de lubrificante em certos motores a jato.

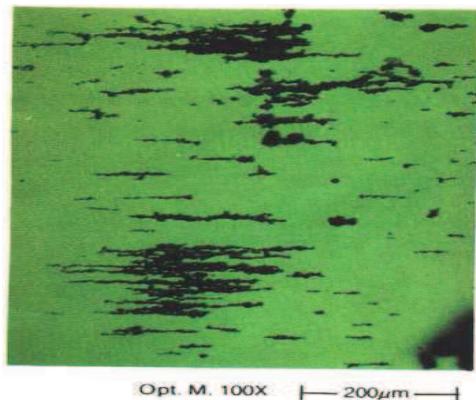


Figura 132 - Entrada do Ferrograma de um Óleo Sintético [13]

b) Contaminantes em graxas novas

Generalizadamente pode-se dizer que as graxas são utilizadas onde é impraticável o uso do óleo. A graxa nada mais é que um óleo no qual foi acrescido um espessante a fim de aumentar a sua viscosidade, formando a mistura mais coesiva. Quando a graxa é cizalhada entre duas superfícies de uma máquina, o óleo contido na graxa é liberado para fazer a lubrificação.

Partículas grandes abrasivas numa graxa são mais prejudiciais do que as mesmas partículas no óleo, pois uma vez aplicada não há mais oportunidade de remover estas partículas por filtragem.

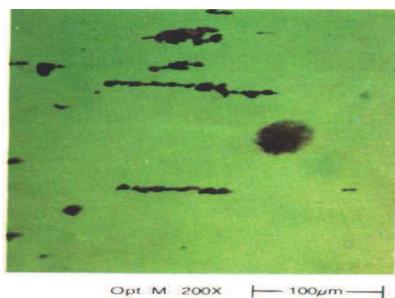


Figura 133 – Partícula Contaminante no Ferrograma [13]

A figura 133 mostra uma partícula contaminante num ferrograma preparado com uma amostra coletada de graxa nova para uso em aeronaves militares.

c) Materiais de filtros

Os filtros são usados de forma ampla em todos os sistemas de lubrificação, motores de combustão interna e hidráulicos, com a finalidade de reter contaminantes e partículas de desgaste.

Frequentemente estes filtros rasgam ou se desmangkanam sob a ação do óleo e do tempo e desprendem fibras. Pequenas quantidades de fibras podem ser encaradas como normal e não é motivo para maiores preocupações. Porém, quando quantidades razoáveis começam a aparecer no ferrograma, isto pode significar uma falha mais séria no sistema de filtragem, o que normalmente ocorre junto com altas concentrações e partículas de desgaste, e deve ser relatado como ‘sério e preocupante’.

As imagens da figura 134 mostram fibras de celulose e de poliéster em luz polarizada transmitida.

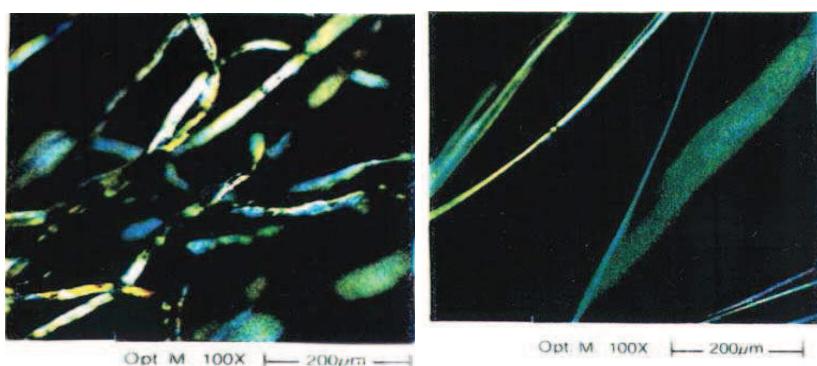


Figura 134 - Fibras de Celulose e de Poliéster [13]

4.7.6 Diagnóstico de ferrografia

4.7.6.1 Observação ótica de ferrogramas

A melhor avaliação sobre o tipo e composição das partículas é obtida por meio de uma observação ótica usando um microscópio bicromático. Os requisitos básicos para este tipo de microscópio é que eles possuam os recursos de luz transmitida e refratada, que possam ser usadas simultaneamente.

A luz transmitida vem da parte de baixo do microscópio, passa através do ferrograma e prossegue em linha reta para cima, passa pelo espelho, em 2 vias, e vai para o ocular. A luz refletida passa de cima para baixo através da lente da objetiva. É refletida pelo objeto que são observados, passa de volta pela lente e através do espelho de duas vias, até o ocular.

A figura 135 mostra como funciona um microscópio bicromático.

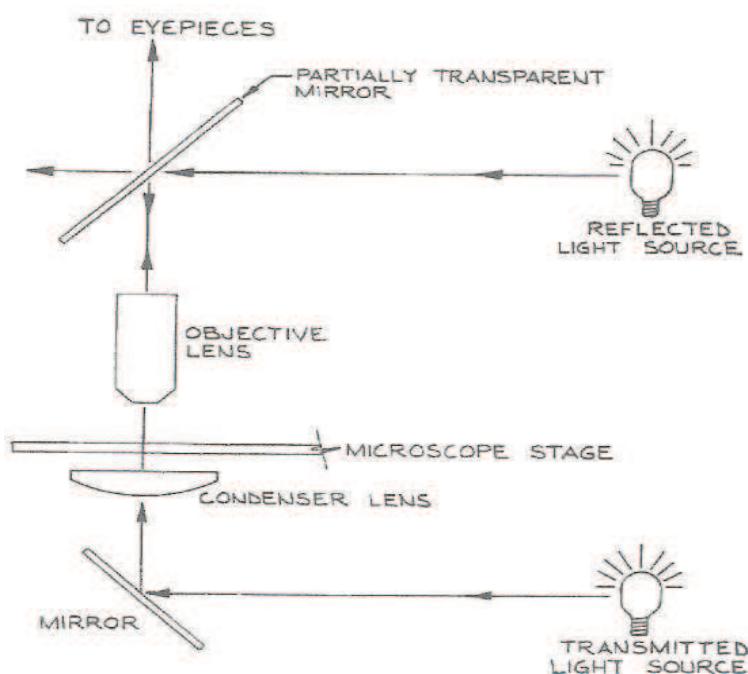


Figura 135 – Microscópio Bicromático [13]

A forma ideal de distinguir partículas de metal de compostos é usar luz refletida vermelha e luz transmitida verde, que é conhecida como iluminação bicromática. Iluminação bicromática é usada principalmente para possibilitar uma fácil detecção das partículas metálicas mais importantes. Este recurso é particularmente usado para observação de polímeros ou partículas amorfas.

Luz branca refletida é usada adicionalmente para observação de superfícies de partículas. A vantagem principal do uso da luz branca é que as cores poderão ser detectadas. Observação com iluminação branca transmitida determina se a partícula é transparente, translúcida ou opaca.

O uso das luzes polarizadas para observar partículas tem sido aprovado e é conveniente como ajuda para identificar partículas não metálicas, especialmente óxidos, plásticos e vários contaminantes no óleo.

Resumindo, muitos cristais não metálicos, agrupamentos policristalinos e muitos plásticos e materiais biológicos, poderão despolarizar luz polarizadas, mas, materiais amorfos como vidros e líquidos, não.

4.7.6.2 Leituras de ferrogramas

1. Ferrografia analítica

O analista foca primeiramente a região da entrada do ferrograma e depois em varreduras laterais e longitudinais avança em direção à saída do ferrograma. De posse de uma folha de informações como o da tabela 17, vai preenchendo conforme os dados são coletados.

A decisão classificar em nada, pouco, moderado ou pesado é baseada na porcentagem de área coberta por cada tipo de partícula. ‘Pouco’ corresponde a contaminação de 1 a 5%; ‘moderado’, de 5 a 25%; e ‘pesado’, de 25% ou mais. A marcação entre ‘muito pouco’ e ‘pouco’ pode ser menor que 1%.

Como convenção para completar as análises de ferrografia, é recomendável que somente tamanho e formato sejam considerados critérios para classificar as partículas numa dessas categorias. A tabela 17 lista as diferenças essenciais.

Tabela 17 – Distinção entre Partículas de Metal Livre [13]

Tipo de Partícula	Tamanho (maior dimensão)	Fator de Forma (maior dimensão/espessura)
Desgaste normal - Esfoliação	> 15µm na maior dimensão < 5 µm	~10:1 sem consideração ao fator de forma
Partícula de desgaste severo	> 15µm na maior dimensão	> 5:1, mas < 30:1
Nacos	> 5µm na maior dimensão	< 5:1
Partículas laminares	> 15µm na maior dimensão	> 30:1

O fator de forma é o quociente entre a maior e menor dimensão, e pode ser considerada como taxa entre comprimento e espessura. O comprimento pode ser medido

usando-se o retículo calibrado da lente ocular do microscópio. A espessura pode ser obtida medindo-se o curso entre focos no plano do ferrograma e o topo da partícula. A tabela 17 funciona como guia.

Claramente, 15 microns, é a divisão entre as partículas de esfoliação e severas. Por exemplo, existe uma substancial diferença entre a população de partículas de esfoliação normal menores que 5 microns e uma outra população, que cobre uma mesma área do ferrograma e que tem partículas maiores que 15 microns.

4.7.7 Quantificando a situação de desgaste

O número de partículas no óleo lubrificante de uma máquina alcançará um equilíbrio dinâmico, porque o número de partículas geradas será igual às perdidas. O tempo que uma partícula leva para ser perdida é função do tamanho das partículas. As partículas de maior tamanho são perdidas rapidamente.

Se a máquina opera normalmente, não somente a concentração permanece constante, mas também a distribuição por tamanhos deve permanecer constante.

O processo normal de desgaste, típico de superfícies trabalhando de forma normal e estável, gera partículas de desgaste de tamanho máximo de 15 microns. As informações quantitativas, obtidas pela ferrografia, sinalizam as situações de mudança de desgaste.

4.7.7.1 Aquecimento de ferrogramas

Significativas informações são obtidas com o aquecimento de ferrogramas, com a sua composição pelas mudanças que ocorrem na sua aparência.

Aços de baixa liga se tornam azuladas; as de média liga, amareladas (palhas); e os de alta, inalteradas. Ligas de estanho e cobre são inteiramente afetadas, devido à sua baixa temperatura de fusão, e são suscetíveis à oxidação.

Outro material muito comum em máquinas são as ligas de alumínio, cromo, prata e titânio, que não são afetadas pelo aquecimento abaixo de 550°C, exceto titânio que se tornará palha leve a 400°C. As ligas de cobre são reconhecidas facilmente pela sua coloração dourada antes do aquecimento.

O aquecimento é feito sobre a placa quente com exposição por um período de 90 segundos, na temperatura escolhida. A cor palha é devido ao desenvolvimento de uma fina camada de óxido quando o metal é aquecido em presença de ar.

As imagens da figura 136 mostram aço de baixa liga antes e depois do aquecimento à 330°C.

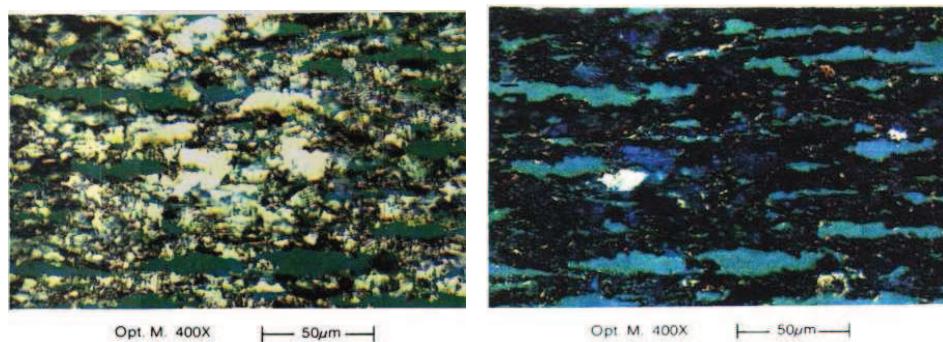


Figura 136 – Aço de Baixa Liga Antes e Depois do Aquecimento [13]

As imagens da figura 137 mostram aço de média liga (ferro fundido) antes e após aquecimento à 330°C.

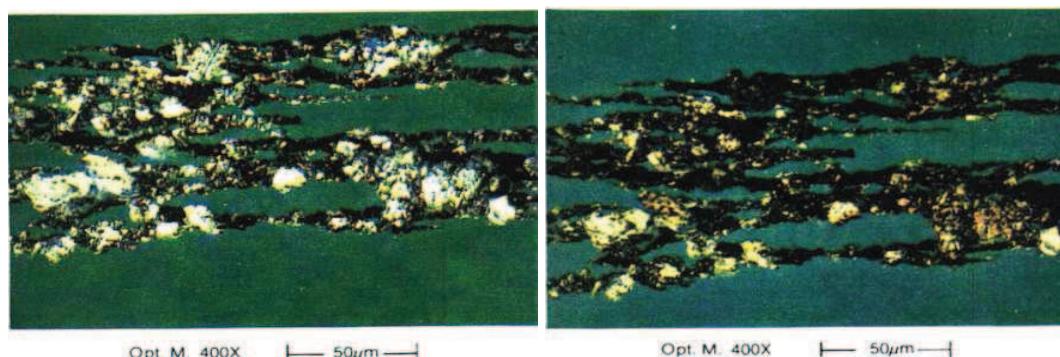


Figura 137 - Aço de Média Liga Antes e Depois do Aquecimento [13]

4.7.8 Comparação e associação com outras técnicas

Tendo sido entendidos os princípios e o processo, podemos efetuar uma comparação rápida entre as técnicas atualmente disponíveis.

4.7.8.1 Análise de vibrações

Segundo Baroni [5], a análise de vibração é, junto com a ferrografia, a melhor associação de técnicas para monitoramento.

Considerando-se que a intensidade da vibração é diretamente proporcional à excitação (força) e ao grau de mobilidade do sistema (resiliência e folgas), pode-se concluir que o aumento da vibração nos indicará alterações no estado da máquina.

Tomemos para raciocínio, o monitoramento de um ventilador e dois problemas muito comuns e simples:

- **Desbalanceamento:** por um motivo qualquer, um ventilador se desbalanceia. O desequilíbrio resultará em aumento da força com consequente aumento da vibração. Os esforços decorrentes afetarão os mancais, desgastando-os e produzindo partículas. Estas partículas serão detectadas pela ferrografia. Mas antes que isso ocorra, o aumento da vibração pode ser acusado facilmente pela análise de vibrações, antecipando-se à ferrografia.
- **Contaminação:** imaginemos a entrada de contaminantes sólidos (areia) no mancal. Sua presença provocará um desgaste que aumentará a folga. O desgaste continuará progredindo até que o nível de vibrações seja tal que o medidor de vibrações consiga detectá-lo. Ato contínuo, a análise das vibrações indicará que temos um mancal danificado e deve ser trocado. Entretanto, a ferrografia percebe a anormalidade antes que tenhamos danos.

Conclui-se que para o monitoramento da máquina o uso conjunto das duas técnicas é a melhor opção.

4.7.8.2 Espectrometria

Conforme já vimos no item 4.2.2.7, a espectrometria de absorção ou de emissão, em termos gerais, indica a presença dos elementos químicos. A amostra é introduzida numa câmara de combustão e os materiais presentes são ‘desintegrados’ até o seu nível atômico. Cada elemento químico possui frequências particulares, ‘como impressões digitais’, tornando possível sua identificação. Pela energia envolvida determina-se a concentração.

Entretanto, esta técnica não consegue detectar partículas maiores do que 8 μm (a média de limite de detecção está em torno de 3 μm e os métodos para aumentar este alcance não são práticos). Apenas instrumentos especiais podem atingir partículas de até 15 μm .

Mesmo assim, se o problema da máquina gerar partículas maiores o que 15 μm , é fácil perceber que a resolução está limitada. Por outro lado, desgastes que não evoluem de forma drástica, aumentando apenas a geração de partículas pequenas, podem ser monitorados pela espectrometria com bons resultados.

Temos ainda o fato de que não se pode, apenas com a espectrometria, determinar o tipo de desgaste, pois não se visualizam as partículas. Imagine-se uma amostra com partículas decorrentes de '*pitting*' em aço de baixo teor de liga (rolamentos), esfoliação em aço cementado (engrenagens), e ferrugem de carcaça. Enquanto na ferrografia podemos distinguir cada uma delas, o resultado espectrométrico nos indicará apenas que temos presente o elemento químico ferro com teores suspeitos.

Por outro lado, só com a espectrometria podemos identificar se certo elemento químico está presente. Seu uso é imprescindível quando desejamos avaliar o lubrificante em si. Outro caso interessante é quando a ferrografia aponta a presença de corrosão. Este desgaste provoca o surgimento de partículas muito pequenas ($< 1 \mu\text{m}$). A ferrografia não é capaz de identificar que tipo de material está sendo atacado, mas é uma tarefa fácil para a espectrometria.

4.7.9 Aplicações da ferrografia

A ferrografia vem sendo utilizada em máquinas para os mais variados tipos e aplicações, sejam lubrificadas por óleo ou por graxa.

As condições básicas para sua aplicação:

- Existência de lubrificante
- Possibilidade de coleta preferencialmente com a máquina em operação
- Possibilidade de coleta em partes da máquina com a menor interferência de contaminação possível

4.7.9.1 Tipos de máquinas

As mais variadas aplicações e ramos de atividades se beneficiam da ferrografia. Citamos alguns exemplos:

- Caixas de engrenagem - redutores e multiplicadores.

- Máquinas alternativas - compressores e motores a explosão, motores hidráulicos.
- Turbomáquinas - turbinas e turbocompressores.
- Máquinas rotativas - compressores de parafuso e motores elétricos.
- Circuitos hidráulicos - de potência ou de controle.
- Mancais diversos - rolamento ou deslizamento.
- Transformadores elétricos - como técnica de apoio à cromatografia.

4.7.9.2 Limites de conversão de resultados para outras técnicas

Considerando-se que a ferrografia possui uma faixa de detecção bastante grande, abrangendo tamanhos e tipos de compostos não detectáveis por outras técnicas, seria um erro básico tentar a conversão dos resultados ferrográficos para outras unidades.

Da mesma forma, o limite de alerta para cada máquina é único, pois, assim como a análise de vibração no nível de espectro, a ferrografia é sensível aos mínimos detalhes individuais. Seria um erro muito grande o estabelecimento de níveis genéricos para famílias de máquinas.

Portanto, apesar de trabalhoso, os analistas de vibração e ferrografia devem calcular os níveis de alerta individualizados para cada máquina que monitoram.

4.8 ENSAIO POR ULTRASSOM

O ensaio por ultrassom é um dos principais métodos de ensaio não destrutivo aplicado na indústria, porque permitem analisar todo o volume da peça.

A utilização de tecnologia ultrassônica tem resultado em aumento da produção, redução do custo de manutenção e consumo de energia, bem como tornar mais eficaz a utilização de pessoal. As empresas acabam gerando maior rentabilidade.

O ensaio de ultrassom detecta descontinuidades internas pelo modo de propagação das ondas sonoras através de uma peça. Os instrumentos ultrassônicos têm sido empregados para a sua capacidade de detectar vazamentos. A sua capacidade de medição pontual de vazamentos de pressão e vácuo em tanques, tubulações, trocadores de calor, válvulas e armadilhas de vapor têm evitado que as empresas percam muito dinheiro.

Estes instrumentos compactos e portáteis também são usados para avaliar tendências de falhas em rolamentos, detectar as condições (ou seja, falta de lubrificação e fricção, bem como inspecionar aparelhos de alta tensão e efeito corona).

O modo de propagação é função da densidade e da velocidade da onda. A isso chamamos impedância acústica: $Z = d \times V$.

4.8.1 O que é ultrassom?

O ultrassom é uma onda mecânica que se propaga de uma fonte emissora até uma fonte receptora, através de um meio físico. Os sons com frequências abaixo de 20 Hz são chamados de infrasons e os sons com frequência acima de 20.000Hz são chamados de ultrassons.

A forma mais comum de produzir o ultrassom para os ensaios é a que utiliza os cristais piezelétricos, como o sulfato de lítio, o titânio de bário, quartzo etc.

Observa-se que determinados materiais (como o quartzo) cortados em lâminas, quando submetidos a cargas mecânicas, geravam cargas elétricas em sua superfície. Também se descobriu que o inverso da observação era verdadeiro. Aplicando-se cargas elétricas na superfície dos cristais piezelétricos, originavam-se deformações no cristal. Quando se aplica corrente elétrica alternada, há uma vibração no cristal, na mesma frequência da corrente. Esse princípio é utilizado na geração e recepção do ultrassom.

Ao se aplicar corrente alternada de alta frequência num cristal piezelétrico, ele vibrará na mesma frequência, gerando o ultrassom. Na recepção ocorre o inverso; o ultrassom fará vibrar o cristal, gerando um sinal elétrico de alta frequência.

Em geral, para os ensaios utilizam-se frequências na faixa de 0,5 a 25 MHz (500.000 a 25.000.000 Hz).

4.8.2 Aplicando o ultrassom

O uso do ultrassom como ensaio é largamente difundido nas indústrias para detectar descontinuidades em todo o volume do material a analisar, tanto em metais (ferrosos ou não) como em não metais.

O ensaio consiste em fazer com que o ultrassom emitido por um transdutor, percorra o material a ser ensaiado, efetuando-se a verificação dos ecos recebidos de volta, pelo mesmo ou por outro transdutor. Transdutor é todo dispositivo que converte um tipo de energia em outra. Nos ensaios, os transdutores são necessários para converter energia elétrica em energia mecânica de vibração (ultrassom) e vice-versa.

4.8.3 Técnicas de ensaio

Pelo tipo de transdutor utilizado, podemos classificar o ensaio por ultrassom em quatro técnicas: por transparência, pulso-eco, duplo cristal e transdutores angulares.

4.8.3.1 Transparência

Não havendo descontinuidades no material, o receptor recebe aproximadamente 100% do sinal emitido. Havendo descontinuidades, o receptor recebe uma porcentagem inferior ao sinal emitido.

Esta técnica é mais indicada para processos automáticos que envolvem grandes produções. Ela não é adequada para processos de medições manuais, por diversas razões:

- Cansaço em segurar dois transdutores.
- A face posterior da peça pode ser inacessível.
- Dificuldade de bom acoplamento dos dois lados.
- Dificuldade de posicionar corretamente os dois transdutores.
- Dificuldade de manusear o equipamento e os dois transdutores ao mesmo tempo.

4.8.3.2 Pulso-eco

Nos ensaios por ultrassom em processos manuais, geralmente, usamos os transdutores do tipo monocristal, emissor e receptor (pulso-eco), pela facilidade de manuseio e de operação.

É possível fazer uma medição precisa quando o transdutor não está emitindo sinal durante a chegada de um eco. Neste caso, as ondas ultrassônicas têm de ser pulsantes para que o cristal possa receber os ecos de retorno nos intervalos de pulsação.

É fácil entender que, se o pulso emissor bater numa descontinuidade muito próxima da superfície, haverá um eco retornando, antes de terminar a emissão. Neste caso, o sinal de descontinuidade não é percebido.

Zona morta é a área próxima da superfície na qual não se detectam ecos durante o tempo de emissão.

4.8.3.3 Duplo cristal

Para ensaiar peças com pouca espessura, nas quais se espera encontrar descontinuidades próximas à superfície, os transdutores pulso-eco não são adequados pelos motivos já vistos. Neste caso, usamos outro tipo de transdutor: o TR - Transmissor e Receptor, por duplo cristal. A zona morta, neste caso, é menor.

Os transdutores TR são usados frequentemente para verificar dimensões de materiais e detectar, localizar e avaliar falhas subsuperficiais.

4.8.3.4 Transdutores angulares

Imagine a colocação de qualquer dos transdutores vistos anteriormente sobre um cordão de solda. Não teríamos acoplamento suficiente para o ensaio. Neste caso, usamos os transdutores angulares, que possibilitam um acoplamento perfeito e a detecção das descontinuidades.

4.8.4 Identificando e confirmando problemas

Todos os equipamentos operacionais produzem uma ampla gama de sons. As altas frequências ultrassônicas dos componentes destes sons são ondas extremamente curtas e tendem a ser bastante direcionais e localizadas. Como resultado, é fácil de isolar esses sinais e os ruídos de fundo da planta e detectar sua exata localização.

Além disso, como as alterações começam a ocorrer no equipamento mecânico, a sutil natureza do ultrassom permite que estes possíveis sinais possam ser detectados cedo, antes do real fracasso. Algumas versões mais recentes também incluem instrumentos de bordo que gravam som para a análise espectral.

Os instrumentos permitem que inspetores confirmem um diagnóstico sobre o local, pois claramente discriminam sons entre os vários equipamentos. Um processo eletrônico converte em ultrassonografias que são detectadas pelo instrumento para a faixa audível, onde os utilizadores podem ouvir e reconhecê-las através de auscultadores. Este processo permite gravar o som através de gravação convencional.

Ultrassons têm magnitudes menores que os da faixa audível, características que favorecem a condição da análise. Uma vantagem é que a amplitude de um ultrassom gerado decresce exponencialmente a partir da origem, tornando a emissão localizada e facilmente isolada de detecção e análise. Alguns instrumentos têm a capacidade de sintonizar a frequência de resposta entre 20 - 100 kHz. Um transmissor ultrassônico, muitas vezes referido como um tom gerador, é habitualmente incluído.

Muitas destas características são úteis para ajudar um usuário a se adaptar a uma situação específica. Por exemplo, se uma fonte de ultrassom for demasiadamente difícil de localizar devido a um intenso sinal, um ajuste da sensibilidade irá ajudar a localizar o local exato. Em outro exemplo: se ocorrer vazamento de gás atrás de uma parede ou no subterrâneo, a frequência poderá ser ajustada em sintonia com a fuga.

Os módulos permitem aos usuários ajustar a diferentes tipos de problemas. O modo de digitalização é utilizado para a detecção de ultrassonografias que viajam na atmosfera (pressão ou um vazamento, descarga corona), enquanto o modo de contato é usado para detectar ultra-sons gerados dentro de um invólucro, como em um suporte, bomba, válvula ou vapor-armadilha.

4.8.4.1 Variações de aplicação

Os ensaios de ultrassons se dividem nas seguintes categorias: medição de espessura, avaliação de trincas e porosidades, detecção de vazamento, inspeção mecânica e inspeção elétrica.

1. Medição de espessura

Em muitas situações a espessura do material define a condição de um componente ou do próprio equipamento. Exemplos típicos é a espessura de chapa de um vaso de pressão, a espessura da parede de uma carcaça de bomba e a espessura de parede de tubulações. Estes

três exemplos, encontrados na maioria das indústrias, apresentam requisitos diferentes para medição e acompanhamento da espessura.

Enquanto a medição de espessura pode ser feita por instrumentos mais elementares, além dos convencionais como paquímetros e micrômetros para peças usinadas, o maior desafio e interesse está na medição da espessura de parede em equipamentos de grande porte ou cujo acesso é impossível para estes instrumentos.

O uso de ultrassom permite que a medição seja feita a partir de um só lado, conforme mostrado na figura 138.

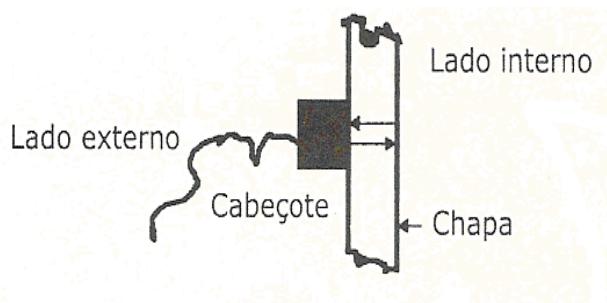


Figura 138- Medição de Espessura com o Ultrassom [5]

Existem vários tipos de aparelhos de ultrassom, disponíveis para aplicações diversas. Normalmente, o aparelho de ultrassom usado para medir espessura é de dimensões reduzidas com cabeçote e visor de leitura digital, onde é indicada a espessura medida.

O princípio utilizado é o do pulso-eco. Um sinal sonoro de alta frequência é aplicado, através do cabeçote, à parede de um vaso e refletido da parede mais distante ao passar através do material. O tempo decorrido entre o sinal passar através do material e ser refletido é lido diretamente no instrumento.

2. Avaliação de trincas e porosidades

As trincas e outras descontinuidades no material devem ser objetos de rigorosa investigação, primeiro para detectar se existem e, em segundo lugar, para, analisando-as, definir quanto à integridade ou não do material e sua conformidade para a utilização pretendida.

Existem vários processos para se fazer essa detecção, podendo ser específicos para detecção de defeitos internos no material, ou defeitos superficiais.

Os instrumentos de ultrassom são bastante adequados à detecção de defeitos internos. Entre eles podem ser detectadas trincas, dupla laminação e porosidades. Enquanto o desempenho dos instrumentos de ultrassom é excelente em laminados, sua utilização em fundidos apresenta certas dificuldades.

Para facilitar a sua utilização, os instrumentos de ultrassom podem ser adquiridos com uma grande variedade de cabeçotes. O cabeçote para utilização numa tubulação é diferente de um cabeçote para chapas grossas, por exemplo.



Figura 139 - Aparelho de Ultrassom Portátil e Detalhe de Trinca em Peça Metálica [5]

3. Detecção de fugas

Uma grande vantagem é que os instrumentos de ultrassom podem ser usados em uma série de situações de fuga, incluindo armadilhas de vapor, válvulas e sistemas pressurizados (tubos e tanques). Quando um fluido (líquido ou gás) se move, a partir da alta tensão lateral para o lado de baixa pressão, através da fuga, sempre se expande rapidamente e produz um fluxo turbulento. Esta turbulência tem fortes componentes ultrassônicos. A intensidade do sinal ultrassônico decresce rapidamente a partir da fonte. Por esta razão, pode-se localizar o local exato de uma fuga.

As aplicações incluem vazamentos de ar comprimido e outros gases, vazamentos de vácuo, condensadores, trocadores de calor e fugas através de paredes ou rede subterrânea. Os defeitos nos selos e juntas, a infiltração de ar e fugas em sistemas, que são muito difíceis para localizar com pressão normal ou teste de vácuo, são facilmente detectáveis pelo ensaio de tom ultrassônico.

Um transmissor ultrassônico é colocado em um lado (ou no interior) do objeto de ensaio e o inspetor faz a leitura com um transdutor ultrassônico. Vazamentos de ar são facilmente detectados com tecnologia ultrassônica e pode-se medir o custo do desperdício.

4. Inspeção mecânica

O monitoramento ultrassônico de rolamentos proporciona o aviso antes de ocorrer o desgaste, e a falha é detectada antes de ser indicada pelas mudanças na temperatura ou na vibração. Os estudos mostram que um aumento na amplitude da frequência ultrassônica de 12 a 50 vezes do valor inicial, indica as falhas iniciais dos rolamentos.

Todos os equipamentos mecânicos produzem uma assinatura sonora que pode ser utilizada para determinar a condição de operação normal. Quando os componentes começam a falhar, no entanto, há uma mudança na assinatura sônica. Um inspetor pode notar que se trata de uma mudança na qualidade do som, através de auscultadores, tal como uma mudança em amplitude (ou dB). As amostras do som podem ser gravadas para um analisador de vibração, capturadas por um gravador, ou diretamente para um computador portátil com uma placa de som.

Existem três fases distintas do rolamento com falha. Na fase de pré-quebra (inanição de lubrificação), os níveis de lubrificação diminuem e os de ultrassom aumentam, sem qualquer mudança dramática na qualidade do sinal. A amplitude aumenta e é acompanhada por uma mudança na qualidade do som, piorando as condições e iniciando a pré-falha.

Na fase dois, o aparecimento de uma falha, um rolamento começa a emitir uma variedade de sons que muitas vezes pode ser confirmada quando visto em espectros ou em análise de vibração. Como essa condição agrava, níveis sonoros aumentam rapidamente e a temperatura também. Infelizmente, se um rolamento chegar a esta fase, o resultado poderá ser catastrófico (fase três).

Para determinar se um rolamento está bom ou falhou de algum modo, o inspetor emite uma referência sobre o alojamento do rolamento utilizando o instrumento de contato da sonda. Ajusta a sensibilidade para obter uma determinada intensidade de leitura e compara esta leitura, na mesma sensibilidade de uma definição semelhante, tendo um ponto de referência sobre o rolamento que opera sob as mesmas condições - comparação de

assinaturas. A qualidade da leitura do som deve ser semelhante. O inspetor utiliza esta base (assinatura) inicial e avalia a tendência das novas leituras, para determinar falta de lubrificação ou avarias.

5. Inspeção elétrica

Mudanças produzidas nos padrões ultrassônicos potencialmente prejudiciais por defeitos/falhas em equipamentos elétricos tais como comutadores, disjuntores, transformadores, buchas e isoladores, são facilmente reconhecido acusticamente, quer como arcos ou corona (que não ocorre com tensão menor que 1.000 Volts), conexões soltas, baixos níveis de isolamento, equipamento defeituoso ou desgaste de componentes.

Quando ocorre uma perturbação elétrica, a eletricidade ioniza moléculas de ar, produzindo um distinto sinal detectável na ultrassonografia. Um detector ultrassônico sente estas mudanças sutis na assinatura acústica de um componente e pode identificar potenciais fontes de defeitos/falha, antes de danos dispendiosos. Sons de alta frequência tendem a não penetrar em sólidos, mas irão ‘escorregar’ através das aberturas menores.

Portanto, detectores ultrassônicos são um meio ideal para solucionar problemas de segurança elétrica através de compartimentos fechados por varredura em porta selos e aberturas de ventilação.

Normalmente, o material elétrico deve ser silencioso, apesar de alguns transformadores produzirem um ciclo constante de 60 Hz, ou um zumbido constante devido a ruídos mecânicos. Estes sons não devem ser confundidos com sons problemáticos. Alguns fabricantes de equipamentos de ultrassons oferecem boas amostras para ajudar os usuários a aprender a reconhecer sons problemáticos.

Muitas vezes, em inspeções nos equipamentos elétricos, técnicos utilizam tanto infravermelho quanto ultrassom. Ultrassons detectam eventos acústicos, enquanto instrumentos infravermelhos detectam problemas relacionados ao calor. Podemos ter dificuldades de acesso ao equipamento elétrico para inspeções termográficas, especialmente se o equipamento estiver fechado. Suas condições de iluminação e refrigeração também podem afetar os resultados.

Ultrassom oferece uma alternativa a estas condições. Para inspeções em alta tensão, como em subestações, por motivos de segurança, utiliza-se um detector ultrassônico com parabólica e um microfone. Estes dispositivos têm um estreito campo de visão infravermelho e o ultrassom pode detectar problemas em mais do dobro da distância.

Ao longo dos anos, instrumentos ultrassônicos tornaram-se uma parte importante da manutenção preditiva, emissões evasivas e programas de conservação de energia. Sua versatilidade, facilidade de utilização e portabilidade permite aos gestores planejar e programar os processos de inspeção.

Ao localizar vazamentos, detectar emissões elétricas e alertar de falha mecânica, estes instrumentos contribuem para a redução de custos e melhoria na eficiência, reduzindo a indisponibilidade.

4.8.5 Vantagens e desvantagens do ensaio por ultrassom

Vantagens:

- Localização precisa das descontinuidades existentes na peça, sem processos intermediários, como por exemplo, a revelação de filmes.
- Alta sensibilidade ao detectar pequenas descontinuidades.
- Maior penetração para detectar pequenas descontinuidades internas na peça.
- Respostas imediatas pelo uso de equipamentos eletrônicos.

Desvantagens:

- Exigência de bons conhecimentos técnicos do operador.
- Atenção durante todo o ensaio.
- Obediência a padrão para calibração do equipamento.
- Necessidade de aplicar substâncias que façam a ligação entre o equipamento de ensaio e a peça.

5. CONCLUSÕES ACERCA DOS OBJETIVOS DO TRABALHO

Conforme descrito no Capítulo 1, os objetivos deste trabalho são apresentar os conceitos e metodologias das técnicas preditivas no monitoramento elétrico e propor uma análise metodológica para a concepção de um sistema de manutenção preditiva de máquinas elétricas.

Estes objetivos foram alcançados, tendo em vista que, com base na análise de uma vasta bibliografia pertinente e nas boas práticas do mercado, o estudo identificou, descreveu e detalhou as diversas técnicas envolvidas com as atividades de manutenção preditiva.

O trabalho constatou que estas práticas têm larga aplicação na indústria, e seus usos e desenvolvimentos justificam-se, devido à importância econômica das máquinas rotativas em suas aplicações, geralmente críticas em relação às paradas para manutenção corretiva.

A apresentação das várias tecnologias de diagnóstico e o estudo de suas e correlações, permitem organizar um processo estruturado de tomada de decisões para identificar os defeitos/falhas, prever a eventual impossibilidade de um equipamento funcionar com as especificações desejadas e especificar as ações corretivas necessárias.

Buscou-se primeiro embasar a fundamentação e os conceitos sobre a ‘Função Manutenção’ e as ‘Máquinas Elétricas Rotativas’, para depois fazer uma síntese das principais técnicas de manutenção preditiva, em função da previsão ou avaliação das condições da degradação do material, por análise das condições operacionais e/ou do acompanhamento estatístico de parâmetros, para dar suporte às atividades de manutenção preventiva.

Foram apresentadas informações relevantes e relacionadas às atuais práticas e técnicas de manutenção preditiva, monitoramento, análise e diagnóstico em máquinas rotativas - vibrações, análise de lubrificantes, termografia, ferrografia, análise de corrente, análise de fluxo magnético, entre outras. Este conhecimento poderá ser usado no dia-a-dia, contribuindo para o aprimoramento da qualidade e produtividade das práticas de manutenção, produção e segurança industrial, criando subsídios e fundamentos para as decisões.

Foram enfatizados os exemplos retirados da bibliografia consultada e da iteração da autora com o assunto estudado e as práticas de manutenção industrial nas suas atividades

profissionais, como estagiária, *trainee* e funcionária do setor de manutenção de uma grande empresa.

Segundo Baroni [5], a missão da manutenção é: '*garantir a disponibilidade da função dos equipamentos e instalações de modo a atender a um processo de produção ou de serviço, com confiabilidade, segurança, preservação do meio ambiente e custos adequados*'.

Por outro lado sabemos que um grande salto nos resultados só acontece com mudança de paradigmas. Neste processo de evolução dos tipos de manutenção, temos mudança de paradigma quando a manutenção preventiva se baseia em técnicas preditivas, ou seja, quando no lugar de se parar o equipamento baseado apenas no tempo calendário, ele é mantido operando até um limite preestabelecido com base em levantamento de parâmetros que podem ser acompanhados, compatibilizando a necessidade da intervenção com a produção.

O aumento da disponibilidade, da confiabilidade, da melhoria do atendimento, da segurança operacional e pessoal, da preservação ambiental e da motivação da equipe, a médio e longo prazos, são sempre acompanhados da otimização dos custos.

Em todo programa de manutenção a ser implementado é recomendado, e imprescindível, que os gestores, executores, envolvidos e interessados sejam totalmente esclarecidos e devidamente treinados no uso das novas ferramentas.

Como contribuição, apresenta-se um guia geral de recomendações para a escolha das técnicas adequadas de monitoramento. As indicações da tabela 18 são apenas orientadoras e, cada caso deverá ser estudado individualmente levando em conta os detalhes específicos de aplicação.

Tabela 18 - Aplicabilidade de Técnicas de Monitoramento Regular [13]

Aplicabilidade de Técnicas de Monitoramento Regular											
	Legenda: U - Usual A - Aplicável R - Aplicável com Restrições ou Dificuldades										
Técnica	Aplicação										
Caixa de engrenagens											
Motores e geradores elétricos	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U
Máquinas alternativas (compressores, motores e bombas)											
Sistemas hidráulicos											
Estruturas											
Turbomáquinas (turbinas, compressores geradores)											
Vasos de pressão, caldeiras, cilindros e trocadores de calor											
Transformador elétrico											
Válvulas purgadores											
Bombas rotativas											
Painéis elétricos											
Aplicação											
Inspeção Sensitiva	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U
Ultrassom					U		U		A		
Análise de vibrações	U	U	R		A	U		A		U	
Ensaios elétricos		U						U			U
Ferrografia	U	A	U	A		U					
Termografia		A						A	U	A	U
Viscosidade	U	U	U	U							U
TAN ou TBN			U	U					U		
Teor de água	U	U	U	U				U			U
Insolúveis	R		R	R							
Espectrometria metais	U	A	U	A							
Espectrometria do infravermelho	A	A	U	A		A		A		A	
Contagem de partículas	R	A	A	U		U					
Óleo isolante								U			2

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ALMEIDA, Márcio Tadeu e GÓZ, Ricardo Damião Sales. *Apostila do Curso de Vibrações em Motores*. FUPAI, Itajubá, 1994.
- [2] _____. *Análise de Vibrações I – Medidas e Diagnósticos*. FUPAI, 2002.
- [3] _____. *Manutenção Preditiva: Benefícios e Lucratividade*. MTA.
<http://www.mtaev.com.br/download/mnt2.pdf>.
- [4] BACCARINE, L. M. R.; BRITO, J. N.; LAMIM FILHO, P. C. M. e PEDERIVA, R. *Influência do Desequilíbrio de Fase no Comportamento Dinâmico de Motores de Indução Trifásico*. Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 2001.
- [5] BARONI, Tarcísio et al. *Gestão Estratégica e Técnicas Preditivas*, Editora Qualitymark. Rio de Janeiro, 2002.
- [6] BONALDI, Erick e OLIVEIRA, Levy Ely de Lacerda de. *Proposição de um Procedimento de Aplicação da Técnica de Análise da Corrente Elétrica para Manutenção Preditiva de Motores de Indução*. 20 COMADEN – International Congress & Exhibition on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management. Portugal, Junho de 2007.
- [7] BONALDI, E. L. *Manutenção Preditiva em Motores de Indução Trifásicos através do Espectro de Corrente do Estator*. Dissertação de Mestrado, Escola Federal de Engenharia Itajubá, 2002.
- [8] BOWERS, S. V.; DAVIS, W. A. e PIETY, K. R. *Proactive motor monitoring*. CSI 1993. Conference, Louisville, 1993.
- [9] BRITO, Jorge Nei. *Detecção de Falhas em Motores Elétricos através da Análise de Corrente e Análise de Fluxo Magnético*. Dissertação de Mestrado, UFSJ - Universidade Federal de São João del Rei, 2004.
- [10] CSI User's Manual. *Induction Motor Analysis Software*. Computational Systems Incorporated, CSI, Rev 2, 1997.
- [11] ELGERD, Olle l. *Introdução à Teoria de Sistemas de Energia Elétrica*. Ed. MC Graw-Hill do Brasil.
- [12] FERREIRA, Dirceu. *Princípios de Acionamento de Corrente Contínua – Conversores CA/CC*. PWR Automação e Robótica, 2001.
- [13] GALVANI, Claudemir e SAITO, Antonio. LUBRIN Lubrificação Industrial Ltda, 2002.
- [14] GIL, Antônio Carlos. *Como Elaborar projetos de pesquisa*, Ed. Atlas. São Paulo, 1991.
- [15] _____. *Métodos e técnicas de pesquisa social*. São Paulo: Atlas, 1999.
- [16] Gilio. Seção Técnica – *Aplicação Termográfica na Manutenção*, 2006.

- [17] ITTNER, Edson Roberto. Palestra: *Aplicação da Técnica da Termografia em Motores Elétricos*. SEMEQ, 2007.
- [18] LEONARD, R. A.; THOMSON W. T. *Vibration and Stray Flux Monitoring for Unbalance Supply and Inter-turn Winding Fault Diagnosis in Induction Motors*. British Journal of NDT, 1986.
- [19] MAMEDE, J. *Instalações Elétricas Industriais*. 5^a edição. LTC – Livros Técnicos e Científicos. Ed. S.A., 1997.
- [20] MIRSHAWKA, Victor. Manutenção Preditiva – *Caminho para Zero Defeitos*, Ed. McGrawHill. São Paulo, 1991.
- [21] MOUBRAY, John. *RCM – Reliability Centered Maintenance*. Ed. SQL Brasil - 2^o edição, 1999.
- [22] NEMÉSIO SOUSA, Jorge. Técnicas Preditivas de Manutenção Elétrica - 22º Engeman. *Apostila da disciplina de Manutenção de Equipamentos e Instalações Elétricas - Capítulo 2 - 22º Engeman*. Rio de Janeiro: UFRJ, 2009.
- [23] OLIVEIRA, Thiago Mikail de. *Manutenção Preditiva de Motores de Corrente Contínua com Ênfase em MSCA – Motor Current Signature Analysis*. Dissertação de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, 2007.
- [24] PAIVA, Oiti G. *Treinamento de Princípios de Termografia Infravermelha*, 2008.
- [25] PENROSE, Howard. *Applications for Motor Current Signature Analysis*. All-Test Pro, 2003.
- [26] _____. *Practical Motor Current Signature Analysis – Taking the Mystery Out of MCSA*. <http://www.alltestpro.com/pdf/PracticalSignatureAnalysis.pdf>. Consultado em 13/03/2009.
- [27] ROBBA, J.E. *Sistema Elétrico de Potência* – Ed. Blucher. São Paulo, 1998.
- [28] ROSSI, Ronaldo. *Instalação e Manutenção de Motores*. FUPAI, 2001.
- [29] SEIXAS, Eduardo de Santana. *A situação da manutenção no Brasil* – Documento Nacional - ABRAMAN.
- [30] SEMEQ – Serviço de Monitoramento de Equipamentos. *Apostila de Análise de Vibração em Motores Elétricos*, 2003.
- [31] _____. *Palestra de Manutenção Preditiva*. São Paulo, 2006.
- [32] SILVA, Edna Lúcia da; MENEZES, Estera Muszkat. *Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação*, Ed. Atual. Florianópolis, 2005. Disponível em: <http://www.ppgep.ufsc.br>.
- [33] SIQUEIRA, I.P. *Manutenção Centrada na Confiabilidade: manual de implementação*, Ed. Qualitymark. Rio de Janeiro, 2005.

- [34] SMITH, Steven W. *Digital Signal Processing: A Practical Guide for Engineers and Scientists*. www.dspguide.com, 2002.
- [35] SOARES, Renata de Almeida. *Análise Comparativa dos Critérios Termográficos*. Monografia 17º Engeman, 2006.
- [36] TIMPERLEY, J. E. *Incipient Fault Identification through Neural RF Monitoring of Large Rotating Machines*. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, 1983.
- [37] TRIBOLAB – Laboratório de Ferrografia. *Ferrografia – Perguntas mais frequentes*. Disponível em www.tribolab.com.br. Consultado em 06/2009.
- [38] TURCATO, Thiago. *Biblioteca Virtual do Estudante Brasileiro – TC 2.000 – Profissionalizante – Ensaio de Materiais*, 1997.
- [39] VERATTI, Attílio Bruno. *A Termografia Aplicada à Manutenção Preventiva e Preditiva*. ICON Tecnologia, 1996.
- [40] _____. *Termografia – Princípios, Aplicações e Qualidade*. ICON Tecnologia, 1997.
- [41] VERGARA, Sylvia Constant. *Projetos e relatórios de pesquisa em administração*, Ed. Atlas. São Paulo, 2003.
- [42] _____. *Métodos de Pesquisa em Administração*. 1ª ed. São Paulo: Atlas, 2005.
- [43] VIEIRA, Fabiano. *Método e Técnicas de Análise de Vibração*. Treinamento na Empresa: Grupo Moura, 2006.
- [44] WEG. *Catálogo Geral de Motores Elétricos*, 1998.
- [45] WEG. *Características e Especificações de Motores de Corrente Contínua e Conversores CA/CC*. Jaraguá do Sul, 2003.
- [46] WEG. *Manual de Instalação e Manutenção – Motores de Corrente Contínua*. Jaraguá do Sul, 2003.