UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Ilha Solteira

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Diagnóstico Automático de Falhas em Grupos Geradores Hidroelétricos Utilizando Técnicas Preditivas de Manutenção e Redes Neurais Artificiais

Fabrício César Lobato de Almeida

Orientador: Prof. Dr. João Antonio Pereira
Co-orientador: Prof. Dr. Adyles Arato Junior

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia - UNESP – Campus de Ilha Solteira, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.
Área de Conhecimento: Mecânica dos Sólidos.

Ilha Solteira – SP
Setembro/2008

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação
Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP - Ilha Solteira.

Almeida, Fabrício César Lobato de.
A447d Diagnóstico automático de falhas em grupos geradores hidroelétricos utilizando técnicas preditivas de manutenção e redes neurais artificiais / Fabrício César Lobato de Almeida. -- Ilha Solteira : [s.n.], 2008.
277 f. : il., fots. color.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Mecânica dos Sólidos, 2008

Orientador: João Antonio Pereira
Co-orientador: Adyles Arato Junior
Bibliografia: p. 246-251

1. Manutenção preditiva. 2. Vibração. 3. Redes neurais (Computação). 4. Manutenção de turbinas hidroelétricas – Gestão.

DIAGNÓSTICO AUTOMÁTICO DE FALHAS EM GRUPOS GERADORES HIDROELÉTRICOS UTILIZANDO TÉCNICAS PREDITIVAS DE MANUTENÇÃO E REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

FABRÍCIO CÉSAR LOBATO DE ALMEIDA

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA** na área de concentração **MECÂNICA DOS SÓLIDOS** e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica.

_____

Prof. Dr. Vicente Lopes Junior / Coordenador do Curso

COMISSÃO EXAMINADORA:

_____

Prof. Dr. Adyles Arato Junior / Co-orientador

_____

Prof. Dr. Alberto Tamagna

_____

Prof. Dr. Luiz de Paula do Nascimento

Aos meus pais Galdino e Franceli pelo amor, educação, companheirismo e por sempre acreditarem no potencial de seus filhos.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Adyles Arato Junior pela dedicação, ensinamentos, tanto pessoais quanto profissionais e amizade durante todo esse trabalho.

Aos professores do Departamento de Engenharia Mecânica da UNESP – FEIS, em especial ao Prof. Dr. Amarildo Tabone Paschoalini, Prof. Dr. Luiz de Paula do Nascimento, Prof. Dr. Vicente Lopes Junior, Prof. Dr. Aparecido Carlos Gonçalves e Prof. Dr. João Antônio Pereira pelas discussões e contribuições ao longo do trabalho.

Ao Professor Mike Brennan e ao ISVR (Institute of Sound and Vibration Research) pela estrutura e discussões em parte deste projeto.

A minha namorada Poliana Morais de Lima por toda a dedição, paciência e companheirismo desde o início desta pesquisa.

Aos meus familiares que diretamente e indiretamente me apoiaram e me incentivaram durante esse trabalho, em especial meus irmãos Galdino e Francisco.

Aos técnicos dos laboratórios (vibração e fluidos) e oficina pela boa vontade e dedicação durante minha passagem pela UNESP – FEIS.

Aos meus amigos da República Cafarnaum e República VIP pelos momentos de alegria e amizade durante toda a minha vida acadêmica, bem como, todos os amigos e colegas que estiveram me apoiando em todos os momentos.

A CAPES e FEPISA pelo apoio financeiro.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da UNESP – FEIS pelas ótimas condições de trabalho oferecidas durante esse projeto.

O meu muito obrigado.

Fabrício César Lobato de Almeida – Setembro de 2008

RESUMO

ALMEIDA, F. C. L. Diagnóstico automático de falhas em grupos geradores hidroelétricos utilizando técnicas preditivas de manutenção e redes neurais artificiais. 2008. 277f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.

Neste trabalho se apresenta uma técnica de redução de dados para monitoração e diagnóstico automático de grupos geradores hidroelétricos com base na análise de vibrações, utilizando redes neurais artificiais. Os sinais de vibração são processados numericamente para se obter um espectro normalizado com no máximo doze freqüências, especialmente determinadas para cada máquina em particular, de tal forma a torná-lo representativo da condição da máquina. A definição das bandas de freqüência a serem usadas no processamento desse espectro especial é feita para cada equipamento a ser monitorado com auxílio de um ambiente computacional desenvolvido e apresentado neste trabalho. Um programa protótipo de monitoração baseado nestas técnicas foi desenvolvido e é apresentado com uso de exemplos de aplicação.

Palavras chaves: Manutenção preditiva, diagnóstico automático, gestão da manutenção, vibração, redes neurais artificiais.

ABSTRACT

ALMEIDA, F. C. L. Automatic fault diagnosis in hydroelectric turbo machineries of hydropower plants by the application of maintenance predictive techniques and artificial neural network. 2008. 277f. Dissertation (Master Science in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.

In this work a data reduction technique based on vibration analysis that can be applied to both monitoring and automatic diagnosis of rotating machineries together with use of neural networks is presented. Vibration signals are processed to obtain a normalized spectrum with up to 12 frequency bands that should be defined for each particular machine. In this manner this special spectrum can become representative of the machine's working condition. The definition of the spectrum's bands that will be used in data processing is carried out for each machine by use of a computational environment that has been developed. This environment is also shown in this work. A prototype monitoring program based in this technique also has been developed and its application is highlighted with examples.

Keywords: Predictive maintenance, automatic diagnosis, management of maintenance, vibration, artificial neural network.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Diagrama do conceito da manutenção segundo Liptrot e Palarchio (2000)....32

Figura 2.2 – Maturidade Organizacional da manutenção proposta por Crosby (1979) e adaptada por Antil (1991). 41

Figura 2.3. – Divisão da gestão da manutenção segundo Garg e Deshmukh. 42

Figura 2.4 – Visão geral da interligação das áreas aplicadas no trabalho de Tu et al. 43

Figura 2.5. – Polígrafo da gerência da manutenção no processo de auditoria realizado por Tu et ali no seu trabalho em outubro de 1997. 45

Figura 3.1 – Diagrama da base educacional e profissional que o especialista deve possuir54

Figura 3.2 – Sinal simples de uma senóide utilizado para exemplificar um ciclo. 56

Figura 3.3 – Ângulo de fase entre duas senóides em um mesmo ciclo, de mesma freqüência e amplitude. 57

Figura 3.4 – Sinal no tempo de uma senóide com freqüência fundamental de 1Hz. 59

Figura 3.5 – Sinal no tempo de uma senóide com adição da primeira harmônica 59

Figura 3.6 – Sinal no tempo de uma senóide com adição da segunda harmônica. 59

Figura 3.7 – Sinal no tempo de uma senóide com adição da terceira harmônica.....60

Figura 3.8 – Esquema representativo da instrumentação utilizada na aquisição e análise de sinais.....61

Figura 3.9 – Resposta do sinal no domínio da freqüência para os quatro tipos de filtro.....62

Figura 3.10 – (a) Sinal filtrado por um filtro passa banda ideal, onde B é a largura da banda (f_2-f_1) e f_0 é a freqüência central da banda. (b) sinal filtrado por um filtro tipo passa banda real. (c) definição da largura da banda de ruído de 3dB. 62

Figura 3.11 – Corte transversal de um transdutor de deslocamento sem contato. 64

Figura 3.12 – Curva de calibração de um transdutor sem contato. 65

Figura 3.13 – Exemplo hipotético da definição dos níveis de alarme e trip na tabela de calibração de um transdutor de deslocamento.....66

Figura 3.14 – Transdutor de velocidade e o corte transversal esquematizando seus elementos internos. 68

Figura 3.15 – Curva de calibração de um Pick-up de velocidade genérico 69

Figura 3.16 – Esquema do aparelho usado para calibração de um transdutor de velocidade. 70

Figura 3.17 – Corte de um acelerômetro piezelétrico.....72

Figura 3.18 – Curva de calibração típica de um acelerômetro.....73

Figura 4.1 – Gráfico exemplificando os principais parâmetros medidos e analisados para efetuar o monitoramento de máquinas. 77

Figura 4.2 – Valores globais de medida de vibração para um sinal de vibração complexo. (1) Nível do valor *RMS* (X_{RMS}). (2) Nível do valor médio [X_m]. (3) Valor pico a pico [X_{p-p}]. (4) Valor de zero a pico [X_{0-p}]. 78

Figura 4.3 – Carta de severidade segundo as normas ISO 2372, VDI2056 e B54675. 84

Figura 4.4 – Carta de severidade FUPAI 85

Figura 4.5 – Gráfico Fupai de severidade de vibração para redutores 86

Figura 4.6 - Esquema Ilustrativo da montagem de sensores indutivos para calcular o valor pico-a-pico, amplitude máxima ou amplitude máxima instantânea. 87

Figura 4.7 - Carta de amplitude máxima segundo a ISO 7919-5 88

Figura 4.8 – Carta de valor pico a pico segundo a norma ISO 7919-5. 89

Figura 4.9 – Carta de Rathbone. 90

Figura 4.10 – Carta de severidade IRD 91

Figura 4.11 – Carta de severidade de vibração da IRD em uma visão simplificada. 91

Figura 4.12 – Carta de severidade de vibração de Blake. 93

Figura 4.13 – As diversas formas de vibrações discretizadas e não discretizadas no domínio do tempo e a representação gráfica das amplitudes de cada fonte no domínio da freqüência, o espectro de vibração. 94

Figura 4.14 – Esquema de obtenção da média temporal síncrona 96

Figura 4.15 – Esquema da montagem dos sensores indutivos para análise do diagrama de órbita 97

Figura 4.16 – Sinais senoidais defasados simulando aquisição de sinais no sensor 1 e 2 respectivamente. 98

Figura 4.17 – Diagrama de Órbita dos sinais senoidais descritos acima. 98

Figura 5.1 – Sinal desbalanceado no domínio do tempo. 105

Figura 5.2 – Sinal desbalanceado no domínio da freqüência. 106

Figura 5.3 – Esquema do desbalanceamento estático. 106

Figura 5.4 – Esquema do desbalanceamento acoplado 107

Figura 5.5 – Esquema do desbalanceamento quase-estático 107

Figura 5.6 – Esquema do desbalanceamento dinâmico. 107

Figura 5.7 – Esquema ilustrativo dos diferentes tipos de desalinhamento: (A) Alinhamento angular; (B) Alinhamento linear; (C) Alinhamento composto. 109

Figura 5.8 – Desalinhamento angular e sua resposta na freqüência 110

Figura 5.9 – Desalinhamento linear e seu espectro 110

Figura 5.10 – Desalinhamento em mancal de deslizamento e rolamento respectivamente. 111

Figura 5.11 – Forças nos mancais devido o defeito de eixo empenado.....112
Figura 5.12 – Espectro de freqüência exemplo para o caso de falha por folga no mancal 114
Figura 5.13 – Espectro de freqüências ilustrativo da falha de whril oil 115
Figura 5.14 – Esquema do rodopio de óleo e as forças geradas devido este fenômeno. ...116
Figura 5.15 – Diagrama de órbita devido o defeito de rodopio de óleo. 117
Figura 5.16 – Sinal do defeito de "roçamento" do eixo no mancal e sinal do mesmo sistema sem defeito respectivamente.....118
Figura 5.17 – Sinal exemplo de um defeito no rolamento no domínio do tempo. 120
Figura 5.18 – Sinal exemplo de um defeito no rolamento no domínio da freqüência.....121
Figura 5.19 – Fontes de excitação provenientes do movimento de rotação de rolamentos. 121
Figura 5.20 – Estágio 1 da evolução de defeitos em rolamentos 122
Figura 5.21 - Estágio 2 da evolução de defeitos em rolamentos 123
Figura 5.22 - Estágio 3 da evolução de defeitos em rolamentos 123
Figura 5.23 - Estágio 4 da evolução de defeitos em rolamento.....124
Figura 6.1 – Esquema clássico de um neurônio. 133
Figura 6.2 – Gráfico da FA degrau e símbolo adotado.....135
Figura 6.3 – Gráfico da FA rampa e símbolo adotado.....135
Figura 6.4 – Gráfico da FA sigmóide e símbolo adotado 135
Figura 6.5 – Gráfico da FA tangente hiperbólica e símbolo adotado 136
Figura 6.6 – Esquema ilustrativo do modelo teórico estrutural de uma RNA de simples camada.....137
Figura 6.7 – Esquema ilustrativo do modelo teórico estrutural de uma RNA de multicamadas 138
Figura 6.8 - Esquema ilustrativo do modelo teórico estrutural de uma RNA reincidente.138
Figura 7.1 – Resposta do filtro ideal e do sinal editado. 145
Figura 7.2 – Sinal filtrado obtido pela técnica da edição do sinal e suas diferentes etapas. Na seqüência: (A) sinal real; (B) *FFT* do sinal; (C) *FFT* editada para a banda desejada e (D) sinal recuperado referente à banda desejada. 147
Figura 7.3. Sinal obtido por intermédio do uso de filtros. Na seqüência: (A) sinal real; (B) *FFT* do sinal; (C) sinal filtrado para a mesma banda da figura 7.2; (D) *FFT* do sinal filtrado. 148
Figura 7.4 – Espectro de freqüência do sinal adquirido na direção vertical no mancal escora da turbina kaplan usada para exemplificar a técnica da EBFPD. 149
Figura 7.5 – Espectro de freqüência do sinal adquirido na direção horizontal no mancal escora da turbina kaplan usada para exemplificar a técnica da EBFPD. 149
Figura 7.6 – Espectro de bandas de freqüência do mancal de escora da turbina kaplan utilizada como exemplo. 151

Figura 7.7 – Espectro de bandas de freqüência normalizado do mancal de escora da turbina kaplan utilizada como exemplo. 152

Figura 7.8 – Espectro de freqüência do sinal de falha devido ao desalinhamento adquirido na direção horizontal no mancal escora da turbina kaplan usada para exemplificar a técnica da EBFPD. 154

Figura 7.9 – Espectro de freqüência do sinal de falha devido ao desalinhamento adquirido na direção vertical no mancal escora da turbina kaplan usada para exemplificar a técnica da EBFPD. 154

Figura 7.10 – Espectro de bandas de freqüência do defeito de desalinhamento apresentado pela turbina kaplan 155

Figura 7.11 – Sinal pré-processado do espectro de bandas de freqüência do defeito de desalinhamento apresentado pela turbina kaplan 155

Figura 7.12 – Algoritmo global da rotina responsável pelo diagnóstico automático da condição do equipamento utilizando a técnica EBFPD e uma cadeia de RNA's 157

Figura 7.13 – Grupo 1 de bandas de freqüências provenientes do treinador 158

Figura 7.14 – Grupo 18 de bandas de freqüências provenientes do treinador 158

Figura 7.15 – Grupo 44 de bandas de freqüências provenientes do treinador 159

Figura 7.16 – Grupo 86 de bandas de freqüências provenientes do treinador 159

Figura 7.17 – Grupo 89 de bandas de freqüências provenientes do treinador 160

Figura 7.18 – Grupo 100 de bandas de freqüências provenientes do treinador 160

Figura 7.19 – Grupo 1 de bandas de freqüências provenientes do treinador falha.....162

Figura 7.20 – Grupo 22 de bandas de freqüências provenientes do treinador falha.....162

Figura 7.21 – Grupo 62 de bandas de freqüências provenientes do treinador falha.....163

Figura 7.22 – Grupo 96 de bandas de freqüências provenientes do treinador falha.....163

Figura 7.23 – Grupo 97 de bandas de freqüências provenientes do treinador falha.....164

Figura 7.24 – Grupo 100 de bandas de freqüências provenientes do treinador falha.....164

Figura 8.1 – Visão da janela principal do software IMSLVI 167

Figura 8.2 – Visão geral da janela referente ao ambiente arquivo 168

Figura 8.3 – Interface com o usuário do comando "abrir" localizado no ambiente arquivo. 169

Figura 8.4 – Habilitação do ambiente análise após o carregamento do sinal.....169

Figura 8.5 – Visão geral da janela principal de comando do ambiente análise.....171

Figura 8.6 – Sensor indutivo horizontal montado no mancal a montante da turbina kaplan (canal 6). 172

Figura 8.7 – Multiplicador de engrenagens helicoidais utilizado como fonte de medida de vibração para validação das ferramentas do ambiente análise. 172

Figura 8.8 – *Worksheet* do *DASYLAB*® desenvolvido para efetuar as comparações dos resultados obtidos pelas ferramentas do ambiente análise. 173

Figura 8.9 – Sinal no domínio do tempo proveniente do software *DASYLAB®*. (a) sinal do *trigger* (V). (b) sinal do sensor 5 – direção vertical (10^{-3}mm). (c) sinal do sensor 6 – direção horizontal (10^{-3} mm). (d) sinal do sensor 8 – vertical ao mancal de entrada do multiplicador (mm/s). 174

Figura 8.10 – Sinais no domínio do tempo utilizando o software IMSLVI. (a) Sinal do *trigger*. (b) sinal do sensor 5. (c) sinal do sensor 6. (d) sinal do sensor 8. 174

Figura 8.11 – Espectro de freqüências obtido com uso da Transformada rápida de Fourier dos sinais dos sensores 5 (vertical) e 6(horizontal) utilizando o software *DASYLAB®*. 175

Figura 8.12 – Gráfico referente ao espectro de freqüências obtido com uso da *FFT* do sinal dos sensores dos canais 5(horizontal) e 6(vertical) utilizando o software IMSLVI. 175

Figura 8.13 – Espectro de freqüências do sinal do sensor 8 (perpendicular ao mancal de entrada do multiplicador) utilizando o software *DASYLAB®*. 176

Figura 8.14 – Gráfico referente à *FFT* do sinal do sensor do canal 8 (perpendicular ao mancal de entrada do multiplicador) obtida por intermédio do software IMSLVI 176

Figura 8.15 – Média temporal síncrona (MTS) no domínio do tempo – canal 8 (acelerômetro montado perpendicularmente ao mancal de entrada do multiplicador).....177

Figura 8.16 – Média temporal síncrona (MTS) no domínio da freqüência – (acelerômetro montado perpendicularmente ao mancal de entrada do multiplicador). 177

Figura 8.17 – (a) Valor amplitude instantânea máxima do canal 5 (proxímetro na direção vertical) e 6 (proxímetro na direção horizontal) calculado pelo uso do software *DASYLAB®*. (b) valor *RMS* do canal 8 (acelerômetro montado perpendicularmente ao mancal de entrada do multiplicador) calculado pelo uso do software *DASYLAB®*. 178

Figura 8.18 – Valor amplitude instantânea máxima do canal 5 (proxímetro na direção vertical) e 6 (proxímetro na direção horizontal) calculado pelo uso do software IMSLVI. 178

Figura 8.19 - Valor *RMS* do canal 8 (acelerômetro montado perpendicularmente ao mancal de entrada do multiplicador) calculado pelo uso do software IMSLVI.....179

Figura 8.20 – Filtro aplicado aos canais 5 (proxímetro na direção vertical) e 6 (proxímetro na direção horizontal) para o cálculo do diagrama de órbita. 180

Figura 8.21 – Resposta do filtro aplicado aos canais 5 (proxímetro na direção vertical) e 6 (proxímetro na direção horizontal) para o calculo do diagrama de órbita. 180

Figura 8.22 – Diagrama de órbita obtida pelo uso do software IMSLVI utilizando o sinal dos canais 5 (proxímetro na direção vertical) e 6 (proxímetro na direção horizontal).....181

Figura 8.23 – Diagrama de órbita obtida pelo uso do software *DASYLAB®* (média de 5 blocos) utilizando o sinal dos canais 5 (proxímetro na direção vertical) e 6 (proxímetro na direção horizontal). 181

Figura 8.24 – Visão geral do ambiente configuração. 183

Figura 8.25 – Janela de *set up* dos valores globais e do número de bandas de freqüência que será utilizado na construção da EBFPD. 184

Figura 8.26 – Janela de configuração local para o canal 5 e 6. 186

Figura 8.27 – Espectro de Bandas de Freqüências Pré-Definidas e sua utilização no IMSLVI. 187

Figura 9.1 – Esquema ilustrativo das características da rede neural proposta nesse trabalho. 191

Figura 9.2 – (a) Sinal esperado. (b) Sinal totalmente oposto ao esperado (situação oposta). 192

Figura 9.3 – Vista externa da PCH de Salto Jauru 194

Figura 9.4 – Esquema da montagem. Grupo gerador 01 – PCH Salto Jauru. 195

Figura 9.5 – Visão geral do gerador e multiplicador – PCH Salto Jauru.....196

Figura 9.6 – Vista do rotor da turbina e das pás diretrizes – PCH Salto Jauru. 196

Figura 9.7 – Instrumentação do MGT. Transdutor indutivo horizontal (1), indutivo vertical (2) e *trigger* (3) – PCH Salto Jauru.....197

Figura 9.8 – Instrumentação do MCT. Transdutor indutivo horizontal (1) indutivo vertical (2) – PCH Salto Jauru. 198

Figura 9.9 – Espectro de freqüência do canal 5 (proxímetro direção vertical) e 6 (proxímetro direção horizontal) para o equipamento em boas condições – PCH Salto Jauru. 199

Figura 9.10 – Diagrama de órbita da turbina em boas condições de funcionamento - canal 5 (proxímetro direção vertical) e 6 (proxímetro direção horizontal) – PCH Salto Jauru. 199

Figura 9.11 – Severidade de Vibração para a máquina em boas condições – PCH Salto Jauru (101,89 μm).....201

Figura 9.12 – EBFPD adquirido previamente para análise das amplitudes e definição dos valores e *trips* locais – PCH Salto Jauru. 202

Figura 9.13 – Espectro de bandas de freqüências normalizado na condição boa de funcionamento – PCH Salto Jauru.....204

Figura 9.14 – Detecção da condição boa pela RNA – PCH Salto Jauru.....208

Figura 9.15 – Detecção do defeito de desalinhamento pela RNA – PCH Salto Jauru. 209

Figura 9.16 – Espectro de freqüência da máquina com desalinhamento – PCH Salto Jauru. 210

Figura 9.17 – Diagrama de órbita da maquina com desalinhamento – PCH Salto Jauru. .211

Figura 9.18 – Amplitude instantânea máxima da máquina com a falha de desalinhamento (64,64 μm) – PCH Salto Jauru. 211

Figura 9.19 – Vista externa da UHE Limoeiro.....212

Figura 9.20 – Esquema ilustrativo do grupo gerador da UHE Limoeiro. 213

Figura 9.21 – Grupos geradores da UHE Limoeiro.....213

Figura 9.22 – Espectro de freqüência do sensor H1 e V1 para o equipamento em boas condições – UHE Limoeiro. 215

Figura 9.23 – Diagrama de órbita da turbina em boas condições de funcionamento – UHE Limoeiro 216

Figura 9.24 – Severidade de Vibração para a máquina em boas condições (77,4µm) – UHE Limoeiro. 217

Figura 9.25 – EBFPD adquirido previamente para análise das amplitudes e definição dos valores e *trips* locais – UHE Limoeiro....218

Figura 9.26 – Espectro de bandas de freqüências normalizado para a condição boa de funcionamento – UHE Limoeiro 220

Figura 9.27 – Detecção da condição boa pela RNA – UHE Limoeiro 223

Figura 9.28 – Detecção do defeito de desalinhamento pela RNA – UHE Limoeiro. 224

Figura 9.29 – Espectro de freqüência da máquina com desalinhamento – UHE Limoeiro 225

Figura 9.30 – Diagrama de órbita da maquina com desbalanceamento – UHE Limoeiro 225

Figura 9.31 – Amplitude instantânea máxima da máquina com a falha de desalinhamento (107,8µm). 226

Figura 9.32 – Vista externa da PCH Buriti. 226

Figura 9.33 – Esquema da montagem. Grupo gerador 01 – PCH Buriti. 227

Figura 9.34 – Conduto forçado e um dos grupos geradores de energia da PCH Buriti....228

Figura 9.35 – Instrumentação do MCT. Transdutor indutivo horizontal (1), indutivo vertical (2) e acelerômetro (3). 228

Figura 9.36 – Instrumentação do MGG. Transdutor indutivo horizontal (1) indutivo vertical (2). 229

Figura 9.37 – Espectro de freqüência do sensor MCT Horizontal (canal 1) e MCT Vertical (canal 2) para o equipamento em boas condições – PCH Buriti. 230

Figura 9.38 – Diagrama de órbita da turbina em boas condições de funcionamento – PCH Buriti 230

Figura 9.39 – Severidade de Vibração para a máquina em boas condições (34,25 µm) – PCH Buriti. 232

Figura 9.40 – EBFPD adquirido previamente para análise das amplitudes e definição dos valores e *trips* locais – PCH Buriti. 233

Figura 9.41 – Espectro de bandas de freqüências normalizado para na condição boa de funcionamento – PCH Buriti. 235

Figura 9.42 – Detecção da condição boa pela RNA – PCH Buriti....238

Figura 9.43 – Detecção do defeito de baixo desalinhamento pela RNA – PCH Buriti. 239

Figura 9.44 - Detecção do defeito de baixo desalinhamento pela RNA – PCH Buriti.....240

Figura 9.45 – Espectro de freqüência da máquina com baixo desalinhamento – PCH Buriti 241

Figura 9.46 – Espectro de freqüência da máquina com severo desalinhamento – PCH Buriti 241

Figura 9.47 – Diagrama de órbita da maquina com baixo desalinhamento – PCH Buriti.242

Figura 9.48 – Diagrama de órbita da maquina com severo desalinhamento – PCH Buriti242

Figura 9.49 – Amplitude instantânea máxima da máquina com a falha de baixo desalinhamento (44,56µm).....243

Figura 9.50 – Amplitude instantânea máxima da máquina com a falha de severo desalinhamento (42,8µm).....243

Figura A1 – Fluxograma da rotina de cálculo do EBFPD 252

Figura A2 – Fluxograma da rotina para a construção do gráfico do EBFPD 261

Figura A3 – Fluxograma da rotina de detecção de falhas pelas RNA's 264

Figura A4 – Fluxograma da rotina de cálculo dos alarmes instantâneo e dinâmico locais e globais de 3dB 268

Figura A5 – Fluxograma da rotina de geração de amostras e treinamento das RNA's.....272

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – *Check Points* descritos por Tu et al. em seu trabalho. 44

Tabela 3.1 – Sensibilidade dos transdutores de deslocamento em relação aos materiais de superfície. 66

Tabela 4.1 – Severidade de vibração definida pela NBR 10082 para as diversas classes de máquinas.....84

Tabela 4.2 - Fatores de serviço de Blake 92

Tabela 5.1 – Principais fontes de desbalanceamento.....104

Tabela 7.1 – Freqüências de interesse relativas a rotação da turbina. 150

Tabela 7.2 – Freqüências de interesse relativas a rotação das pás do rotor. 150

Tabela 7.3 – Freqüências de interesse relativas a passagem das pás. 151

Tabela 8.1 – Freqüências de interesse, alarme e *trip* relativos a rotação da turbina. 185

Tabela 8.2 – Freqüências de interesse relativas a rotação das pás do rotor. 185

Tabela 8.3 – Freqüências de interesse relativas a passagem das pás. 186

Tabela 9.1 – Severidade de vibração segundo a norma ISO – PCH Salto Jauru. 200

Tabela 9.2 – Freqüências de interesse, alarme e *trip* relativos à rotação da turbina – PCH Salto Jauru. 202

Tabela 9.3 – Freqüências de interesse, larguras das bandas e valores de alarme e *trip* relativas rotação das pás do rotor.....203

Tabela 9.4 – Freqüências de interesse, larguras das bandas e valores de alarme e *trip* relativas a passagem das pás – PCH Salto Jauru. 203

Tabela 9.5 – Variação das porcentagens de amplitude de cada banda relativa a boa condição e falhas – PCH Salto Jauru. 205

Tabela 9.6 – Resultados obtidos pela rede responsável pelo diagnóstico da boa condição nos testes aplicados – PCH Salto Jauru 206

Tabela 9.7 – Resultados obtidos pela rede responsável pelo diagnóstico da falha de desalinhamento nos testes aplicados – PCH Salto Jauru 206

Tabela 9.8 – Resultados obtidos pela rede responsável pelo diagnóstico da falha de desbalanceamento nos testes aplicados – PCH Salto Jauru. 207

Tabela 9.9 – Valores de saída das RNA's treinadas para a PCH Salto Jauru 210

Tabela 9.10 – Severidade de vibração segundo a norma ISO – UHE Limoeiro 217

Tabela 9.11 – Freqüências de interesse, alarme e *trip* relativos a rotação da turbina – UHE Limoeiro. 219

Tabela 9.12 – Freqüências de interesse, larguras das bandas e valores de alarme e *trip* relativas rotação das pás do rotor – UHE Limoeiro.....219

Tabela 9.13 – Variação das porcentagens de amplitude de cada banda relativa a boa condição e falhas – UHE Limoeiro.....221

Tabela 9.14 – Resultados obtidos pela rede responsável pelo diagnóstico da boa condição nos testes aplicados – UHE Limoeiro.....222

Tabela 9.15 – Resultados obtidos pela rede responsável pelo diagnóstico da falha de desalinhamento nos testes aplicados – UHE Limoeiro.....222

Tabela 9.16 – Resultados obtidos pela rede responsável pelo diagnóstico da falha de desbalanceamento nos testes aplicados – UHE Limoeiro.....222

Tabela 9.17 – Valores de saída das RNA's treinadas para a UHE Limoeiro.....224

Tabela 9.18 – Severidade de vibração segundo a norma ISO – PCH Buriti.....231

Tabela 9.19 – Freqüências de interesse, alarme e trip relativos a rotação da turbina – PCH Buriti. 233

Tabela 9.20 – Freqüências de interesse, larguras das bandas e valores de alarme e *trip* relativas rotação das pás do rotor – PCH Buriti. 233

Tabela 9.21 – Freqüências de interesse, larguras das bandas e valores de alarme e *trip* relativas a passagem das pás – PCH Buriti. 234

Tabela 9.22 – Variação das porcentagens de amplitude de cada banda relativa a boa condição e falhas – PCH Buriti 236

Tabela 9.23 – Resultados obtidos pela rede responsável pelo diagnóstico da boa condição nos testes aplicados – PCH Buriti.....237

Tabela 9.24 – Resultados obtidos pela rede responsável pelo diagnóstico da falha de desalinhamento nos testes aplicados – PCH Buriti.....237

Tabela 9.25 – Resultados obtidos pela rede responsável pelo diagnóstico da falha de desbalanceamento nos testes aplicados – PCH Buriti.....237

Tabela 9.26 – Valores de saída das RNA's treinadas para a UHE Limoeiro.....240

LISTA DE ABREVIATURAS

A -	Disponibilidade.
ABNT -	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
A/D -	Conversor Analógico – Digital.
ALARM -	Valor de Alarme de um Sinal.
DC -	Corrente Contínua.
DFT -	Transformada Discreta de Fourier.
DSA -	Analisador Dinâmico de Sinais.
DIN -	Instituto Alemão de Normatização.
EBFPD -	Espectro de Bandas Pré-Definidas.
FA -	Função de Ativação.
FFT -	Transformada Rápida de Fourier.
FUPAI -	Fundação de Pesquisa e Assessoramento à Indústria.
HFD -	Alta Freqüência de Detecção.
IMSLVI -	Sistema de Integrado de Gerenciamento do Laboratório de vibração e Instrumentação.
ISO -	Organização Internacional de Normatização.
KPI -	Chave Indicativa de Performance.
MA -	Manutenção Autônoma.
MCC -	Manutenção Centrada na Confiabilidade.
MPT -	Manutenção Produtiva Total.
NPT -	Não Produtividade Total.
MTBF -	Tempo Médio entre Falhas.
MTTF -	Tempo Médio para a Falha.
MTTR -	Tempo Médio para Reparo.
NBR -	Normas Brasileiras desenvolvidas pela ABNT.
PCH -	Pequena Central Hidroelétrica.
R -	Confiabilidade.
RMS -	Raiz Média Quadrada.

RNA -	Rede Neural Artificial.
RT -	Taxa de multiplicação.
SGMC -	Sistema de Gerenciamento da Manutenção Computadorizado
SSD -	Sistema de Suporte as Decisões.
STFT -	Transformada Curta de Fourier.
TRIP -	Valor de Emergência de um Sinal.
TTT -	Tempo Total de Trabalho.
UHE -	Unidade Hidroelétrica.
VDI -	Associação de Engenheiros Alemães.

LISTA DE SÍMBOLOS

a -	Vetor de Saída da RNA.
A -	Disponibilidade.
d -	Diâmetro do Elemento Rolante.
F -	Freqüência.
ff -	Freqüência de Giro da Peça.
k -	Velocidade de Propagação da onda.
L -	Comprimento do Componente mais as Correções da Extremidade.
MTBF -	Tempo Médio entre Falhas.
MTTF -	Tempo Médio para a Falha.
MTTR -	Tempo Médio para Reparo.
n -	Vetor de entrada da RNA.
N -	Velocidade de Rotação do eixo em rpm.
NPB -	Número de Pontos por Bloco.
p -	Diâmetro Primitivo do Elemento Rolante.
r -	Número do Bloco.
R -	Confiabilidade.
S -	Modulo do Valor máximo da Amplitude da onda
SE -	Sinal de Entrada Utilizado na RNA.
SB -	Severidade da Banda.
SBR -	Severidade da Banda de Rotação.
t -	Tempo.
T -	Período.
TA -	Taxa de Aquisição.
Y -	Amplitude Dinâmica.
φ -	Ângulo de Fase.
v_{ef} -	Velocidade Eficaz ou Velocidade RMS.
v_{RMS} -	Velocidade Eficaz ou Velocidade RMS.
v -	Sinal de Vibração.

$y(iT)$ -	Média Temporal Síncrona.
$x(iT)$ -	Bloco Original.
N_f -	Freqüência Fundamental do Trem de Rolamento.
N_b -	Freqüência dos Elementos Rolantes.
N_o -	Freqüência da Pista Externa.
N_i -	Freqüência da Pista Interna.
n_z -	Número de Elementos Rolantes.
F_B -	Freqüência Fundamental dos defeitos nos Elementos Rolantes.
f_{pr} -	Freqüência da Passagem de Pás do Rotor.
f_{dr} -	Freqüência da Passagem das Pás Diretrizes e Passagem das Pás do Rotor.
f_{rh} -	Freqüência de Ressonância Hidráulica.
θ -	Ângulo de Contato.
Z_r -	Número de Pás do Rotor.
σ -	Coeficiente de Cavitação.
H_a -	Altura Manométrica da Pressão Absoluta.
H_b -	Altura Manométrica da Entrada de Aspiração.
H_v -	Altura Manométrica de Vapor.
w_n	Pesos da RNA.
X -	Valor da Severidade de Vibração.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 25

1.1 OBJETIVO DO TRABALHO 27
1.2 DESCRIÇÃO DO TRABALHO 28

2. ASPECTOS GERAIS DA MANUTENÇÃO, GESTÃO DA MANUTENÇÃO E GESTÃO DA PRODUÇÃO DE ENERGIA COM FOCO NA UTILIZAÇÃO DE TÉCNICAS PREDITIVAS 30

2.1. INTRODUÇÃO A MANUTENÇÃO. 30
2.2. TÉCNICAS USUAIS E NÃO USUAIS IMPLEMENTADAS PARA GARANTIR A EFICIÊNCIA E QUALIDADE DA AÇÃO MANENTEDORA. 33
2.3. PRINCIPAIS ÍNDICES DE MONITORAÇÃO DA MANUTENÇÃO. 45
2.4. A GESTÃO DA PRODUÇÃO COM FOCO NA GERAÇÀO DE ENERGIA EM PEQUENAS UNIDADES HIDROELÉTRICAS. 49

3. OS ESPECIALISTAS, A INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA EM TÉCNICAS PREDITIVAS DE MONITORAÇÃO DA VIBRAÇÃO DE MÁQUINAS ROTATIVAS E AS CARACTERÍSTICAS GERAIS DE FUNCIONAMENTO DOS TRANSDUTORES DE VIBRAÇÃO 52

3.1. OS ESPECIALISTAS. 53
3.2. CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS SINAIS UTILIZADOS PARA DIAGNÓSTICOS DE EQUIPAMENTOS UTILIZANDO O PARÂMETRO VIBRAÇÃO. 54
3.3. VISÃO GERAL DOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA AQUISIÇÃO DE SINAIS NA MANUTENÇÃO PREDITIVA. 60
3.4. PRINCIPAIS TRANSDUTORES APLICADOS NA MONITORAÇÃO CONDICIONAL UTILIZANDO O PARÂMETRO VIBRAÇÃO 63
3.4.1. TRANSDUTOR DE DESLOCAMENTO SEM CONTATO *63*
3.4.2. TRANSDUTOR DE VELOCIDADE *68*
3.4.3. ACELERÔMETROS *71*

4. TÉCNICAS CLÁSSICAS E NORMAS DE MONITORAMENTO UTILIZANDO ANÁLISE DE VIBRAÇÃO 75

4.1. CARACTERÍSTICAS GERAIS DA QUANTIFICAÇÃO DA VIBRAÇÃO. 76
4.2 ANÁLISE DE VIBRAÇÃO. 79
4.3 NÍVEL GLOBAL DE VIBRAÇÃO. 80
4.3.1 DEFINIÇÃO DO ALARM E TRIP PARA UM SINAL VIBRATÓTIO. *81*
4.3.2 VELOCIDADE EFICAZ DE VIBRAÇÃO OU VELOCIDADE RMS (Root Mean Square). *82*
4.3.3 NORMA ISO 2372, VDI2056 E B54675 ..... *83*
4.3.4 GRÁFICO DE SEVERIDADE DE VIBRAÇÕES FUPAI *85*
4.3.5 OSCILAÇÃO DO EIXO. *86*
4.3.6 CARTA DE SEVERIDADE DE VIBRAÇÃO DA OSCILAÇÃO DO EIXO SEGUNDO A NORMA ISO 7919-5 ..... *88*

4.3.7 CARTA DE RATHBONE. *89*
4.3.8 CARTA DE SEVERIDADE DA IRD *90*
4.3.9 CARTA DE SEVERIDADE DE BLAKE *92*
4.4 ESPECTRO DAS VIBRAÇÕES. 93
4.5 MÉDIA TEMPORAL SÍNCRONA. 96
4.6 DIAGRAMAS DE ÓRBITA 97
4.7 DEMODULAÇÃO. 98
4.8 MISCELÂNEA DE OUTRAS TÉCNICAS 99

5. PRINCIPAIS FALHAS EM UNIDADES GERADORAS DE ENERGIA E SEUS DIAGNÓSTICOS 101

5.1 DIVISÃO GERAL DAS FALHAS APRESENTADAS POR UNIDADES HIDROELÉTRICAS 102
5.2. VIBRAÇÕES DEVIDAS EXCITAÇÕES MECÂNICAS 104
5.2.1 DESBALANCEAMENTO DE MASSA ROTATIVAS *104*
5.2.2 EIXO EXCENTRICO. *108*
5.2.3 DESALINHAMENTO *109*
5.2.4 DEFEITOS EM MANCAIS DE DESLIZAMENTO *113*
5.2.4.1 FOLGAS EXCESSIVAS NO MANCAL DE DESLIZAMENTO 114
5.2.4.2 RODOPIO DO ÓLEO OU ESPIRRO DE ÓLEO (WHRIL OIL) 115
5.2.4.3 LUBRIFICAÇÃO DEFICIENTE DOS MANCAIS 117
5.2.5 DEFEITOS EM MANCAIS DE ROLAMENTO *118*
5.3 EXCITAÇÕES ELÉTRICAS 124
5.4 EXCITAÇÕES HIDRÁULICAS 126
5.4.1. VIBRAÇÕES DEVIDAS AO DESBALANCEAMENTO HIDRÁULICO *127*
5.4.2 VIBRAÇÕES DEVIDAS A INTERAÇÃO ENTRE O ROTOR E O DISTRIBUIDOR. *127*
5.4.3 PULSAÇÃO DE PRESSÃO NO DUTO DE ADMISSÃO *128*
5.4.4 TURBULÊNCIA *129*
5.4.5 RESSONÂNCIAS HIDRÁULICAS *129*
5.4.6 VIBRAÇÕES E RUÍDOS ORIGINADOS PELO APARECIMENTO DE CAVITAÇÕES *130*

6. FUNDAMENTOS DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS 132

6.1 VISÃO GERAL DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS 133
6.2 PRINCIPAIS FUNÇÕES DA ATIVAÇÃO OU TRANSFERÊNCIA 134
6.3 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ARQUITETURA DE UMA RNA 136
6.4 PROCESSO DE APRENDIZADO OU TREINAMENTO DE UMA RNA 139
6.5 ALGORITIMO DE TREINAMENTO BACKPROPAGATION 139
6.6 APLICAÇÃO DE RNA A PROBLEMAS DE ENGENHARIA 141

7. TÉCNICA DO ESPECTRO DE BANDAS DE FREQUÊNCIAS PRÉ DEFINIDAS E A APLICAÇÃO DA REDE NEURAL ARTIFICIAL NA DETECÇÃO E DIAGNÓSTICO DE FALHAS 142

7.1 A TÉCNICA DO ESPECTRO DE BANDAS DE FREQÜÊNCIA PRE DEFINIDAS (EBFPD). 144
7.2 APLICAÇÃO DA TÉCNICA EBFDP NA REDUÇÃO DE DADOS DE ENTRADA DE UMA REDE NEURAL 152
7.3 TREINAMENTO DA REDE NEURAL E A APLICAÇÀO DA MESMA NA DETECÇÃO E DIAGNOSE DAS FALHAS EM MÁQUINAS ROTATIVAS DO TIPO TURBINA HIDRÁULICA. 156

8. TÉCNICA DO EBFPD APLICADA NA GESTÃO DA MANUTENÇÃO E PRODUÇÃO – SOFTWARE MODELO 166

8.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DO SOFTWARE IMSLVI. 167
8.2 AMBIENTE ARQUIVO 168
8.3 AMBIENTE ANÁLISE 170
8.4 AMBIENTE CONFIGURAÇÃO 182
8.4 AMBIENTE MONITORAÇÃO 187

9. APLICAÇÃO DA TÉCNICA DO EBFPD E RESULTADOS 188

9.1 – REDE NEURAL UTILIZADA, SIMULADOR DE SINAIS PARA O TREINAMENTO E PADRÕES SEGUIDOS NA DEFINIÇÃO DE ALARMES E TRIPS. 189
9.2 – APLICAÇÃO E RESULTADOS DA TÉCNICA DO EBFPD 194
9.2.1 – PCH DE SALTO JAURU. *194*
Características construtivas dos grupos geradores. 194
Equipamentos e montagem experimental 197
Análise inicial do equipamento antes da configuração do EBFPD 198
Configuração das freqüências de interesse, bandas de freqüências e alarmes e trips (global e local). 201
Treinamento das RNA's 204
Treinamento e testes com as RNA's 206
Diagnóstico automático 207
Análise de dados posterior ao diagnóstico da falha 210
9.2.2 – UHE LIMOEIRO. *212*
Características construtivas dos grupos geradores. 212
Equipamentos e montagem experimental 214
Análise inicial do equipamento antes da configuração do EBFPD 215
Configuração das freqüências de interesse, bandas de freqüências e alarmes e *trips* (global e local). 218
Treinamento das RNA's 220
Treinamento e testes com as RNA's 221
Diagnóstico automático 222
Análise de dados posterior ao diagnóstico da falha 224
9.2.3 – PCH BURITI. *226*
Características construtivas dos grupos geradores. 227
Equipamentos e montagem experimental 228
Análise inicial do equipamento antes da configuração do EBFPD 229
Configuração das freqüências de interesse, bandas de freqüências e alarmes e *trips* (global e local). 232
Treinamento das RNA's 234
Treinamento e testes com as RNA's 236
Diagnóstico automático 238
Análise de dados posterior ao diagnóstico da falha 241

10. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 244

REFERÊNCIAS 246
APÊNDICE A 252
APÊNDICE B 261
APÊNDICE C 264
APÊNDICE D 268
APÊNDICE E 272

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Todo processo industrial necessita de energia para movimentar sua cadeia produtiva. Dentre as diversas fontes de energia possíveis a mais utilizada, sem sombra de dúvidas, é a energia elétrica seja direta ou indiretamente. Além de ser utilizada para movimentar as grandes linhas de produção industrial a energia elétrica também proporciona conforto e facilidades na vida doméstica e particular dos seres humanos, movimentando a economia.

No Brasil a geração de energia elétrica é fortemente baseada em usinas hidroelétricas, devido ao potencial hídrico do país. No entanto, nos anos de 2001 e 2002, a fragilidade do modelo adotado até então, e a necessidade vital de energia elétrica vieram à tona com a crise denominada "apagão". Tal fato se deu devido a uma conjunção de vários fatores tais como: falta de investimento no setor, ausência de chuvas no período ocasionando a diminuição dos níveis dos reservatórios e o modelo adotado para planejamento e construção das usinas hidroelétricas.

Inicialmente, as características construtivas das usinas hidroelétricas, denominadas UHE, baseavam-se na geração de mais de 100MW em cada unidade, onde grandes barragens foram construídas visando represar uma grande quantidade de água para funcionamento das turbinas, em grande número ou grande porte como, por exemplo, Itaipu, Tucuruí e Ilha Solteira. Esse represamento e também as imensas construções decorrentes geram grande impacto ambiental (morte de parte da fauna local bem como inundações da flora nativa). Um modelo com este nível de impacto ambiental, só se

justifica para grande geração de energia com alta produtividade, tomando-se como parâmetros a geração por vazão de água e volume de água represada.

Em alguns casos, ocorreu a construção de UHEs de pequeno porte (potencia gerada em torno de 50MW) mas com mau planejamento construtivo, ou melhor, um planejamento como as de grande porte. Um exemplo de mau planejamento construtivo de uma UHE é a de Curuá-Una, onde parte da floresta que se encontrava no local onde hoje é o lago foi submersa. Neste caso, a geração em função do impacto ambiental não atingiu o nível de produtividade das outras UHEs construídas até então.

Além do fator ecológico as áreas propícias para a exploração de grandes potenciais hidrelétricos se esgotaram, fazendo com que uma outra forma de aproveitamento hidráulico fosse incentivada. Após o "apagão", o setor energético do Brasil foi aberto a iniciativa privada, onde atualmente os principais investimentos se fazem por concessões. A construção da usina hidroelétrica se da por meio de investimento privado sendo que as concessionárias podem explorar tal potencial até no máximo 20 anos, renováveis mediante procedimentos de auditorias e processos de re-concessão. Devido ao grande número de UHEs já construídas no país, a maioria dos aproveitamentos disponíveis atualmente são para no máximo 30MW de potência gerada

As características construtivas dessas unidades geradoras de energia também mudaram. Quando a potência instalada não for maior que 30MW, trata-se de uma PCH - Pequena Central Hidroelétrica, e não é permitido mais represamento ou grandes barragens com o objetivo de controlar o nível dos lagos. Essas unidades podem ser do tipo:

- PCH a fio d'agua – é a mais comum encontrada. Empregada quando as vazões de estiagem do rio são iguais ou maiores que a descarga necessária a potência a ser instalada para atender a demanda máxima prevista;
- PCH de acumulação, com regularização diária do reservatório – empregado quando as vazões de estiagem do rio são inferiores à necessária para fornecer a potência para suprir a demanda máxima do mercado consumidor e ocorrem com risco superior ao adotado no projeto;
- PCH de acumulação, com regularização mensal do reservatório - considera dados de vazões médias mensais no seu dimensionamento energético.

Devido a ausência de controle do nível de água a montante da turbina (ou barragem) não é possível obter um controle total do desperdício de água, tornando esse tipo de planta, do ponto de vista da produção, mais dispendiosa (maior custo) se comparada com as UHE's. Por esse motivo, manter a disponibilidade de seus equipamentos é uma característica vital de sua sobrevivência, pois o lucro obtido será diretamente proporcional a disponibilidade do mesmo (geração de energia).

Um outro ponto interessante atualmente nas PCH's é a forma de operação, transmissão e gestão. É comum um centro de operação ser o responsável por várias unidades que geralmente são distantes umas das outras, como ocorre no interior do estado do Mato Grosso e Mato Grosso do Sul. Sistemas de intranet especiais foram desenvolvidos para essas PCH's, onde é possível tele opera-las e acessar qualquer informação operacional dos equipamentos, como: temperatura de mancais, velocidades angulares (turbina, gerador e em alguns casos do multiplicador), nível de óleo, potência gerada dentre outras.

Dessa maneira, como todos os dados podem ser enviados e analisados em um centro de controle e monitoramento, as decisões podem ser tomadas por especialistas e ações de gerenciamento (manutenção e produção) podem ser realizadas globalmente considerando o conjunto das várias unidades interconectadas ao sistema.

1.1 OBJETIVO DO TRABALHO

Com o objetivo de auxiliar no processo de gerenciamento da manutenção e produção propôs-se uma técnica de monitoração do desgaste, detecção e diagnóstico automático de falhas de máquinas utilizando como parâmetro comparativo e de análise a vibração do equipamento, neste estudo, voltada especialmente para turbinas hidráulicas.

Essa técnica consiste no uso de redes neurais artificiais cujos dados de entrada para discriminação são as amplitudes de no máximo doze bandas de freqüência do sinal vibratório da máquina, selecionadas de modo a formar um espectro totalmente representativo da condição de funcionamento do equipamento. O processo de definição destas bandas é auxiliado por computador e totalmente customizável, ou seja, leva em conta, depois de configurado, os diferentes tipos de turbinas (Kaplan, Pelton, Francis, Bulbo, outras) bem como, as diferentes velocidades de rotação, número de pás do rotor e numero de pás diretrizes.

Outro ponto do trabalho é a possibilidade dos dados e diagnósticos serem transmitidos via intranet, dado que, depois de customizado e instalado, a monitoração e diagnóstico passa a ser realizada totalmente por via computacional, possibilitando a transmissão dos dados e sinais de alerta como mais um parâmetro operacional das PCH's levando o processo de monitoração para manutenção preditiva ao mesmo patamar do processo de operação e monitoração dos dados operacionais nas unidades tele-operadas.

1.2 DESCRIÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está divido em 11 (onze) capítulos cujas descrições serão dadas abaixo.

O presente capítulo (capítulo 1) apresenta uma visão geral sobre a influência da geração de energia elétrica nos dias atuais, bem como a forma atual de aproveitamento do potencial hidroelétrico do país mostrando de maneira geral como se dá a sua gestão e monitoração.

No capítulo 2 faz-se uma explanação dos principais métodos e características de gestão da manutenção, bem como a descrição dos principais programas de gerenciamento como: 5S, Manutenção Produtiva Total, Manutenção Concentrada na Confiabilidade e Manutenção Autônoma. Faz-se também uma pequena revisão bibliográfica sobre os trabalhos desenvolvidos visando uma melhor gestão da manutenção aliados a produção.

No capítulo 3 faz-se uma revisão bibliográfica e teórica geral dos principais instrumentos utilizados na medição de vibração, bem como, uma revisão básica de análise de sinais que se faz necessária para o entendimento e aplicações desse trabalho.

No capítulo 4 faz-se uma revisão de normas técnicas utilizadas para quantificar níveis de severidade de vibração utilizando o parâmetro vibração, bem como, descrição e expressões utilizadas em ferramentas preditivas para diagnosticar as falhas como: espectro clássico de freqüências por meio da transformada rápida de Fourier, técnica do envelope ou demodulação, diagramas de órbita, severidades de vibração (*RMS* e deslocamento eixo mancal) e média temporal síncrona.

No capítulo 5 faz-se uma revisão geral das principais falhas que podem ocorrer nas unidades geradoras de energia tanto do ponto de vista mecânico, hidráulico e eletromagnético. Faz-se também uma revisão da aplicação das técnicas usuais preditivas utilizadas em seu monitoramento e identificação.

No capítulo 6 faz-se uma revisão e explanação sobre redes neurais artificiais para um melhor entendimento de sua aplicação nesse trabalho.

No capítulo 7 faz-se a explicação detalhada da nova técnica de redução de dados desenvolvida, denominada Espectro de Bandas de Freqüências Pré-definidas, bem como todo o processo envolvido em sua obtenção utilizando um sinal adquirido em uma PCH. Neste capítulo é explano também de que forma essa técnica pode ser usada juntamente com redes neurais artificiais para detecção e diagnóstico de falhas em máquinas rotativas.

No capítulo 8 faz-se a demonstração e explicação de como o software modelo foi confeccionado e seu funcionamento, pois, será utilizado no capítulo referente aos resultados experimentais e aplicação da técnica desenvolvida. Faz-se também a comparação dos dados desse software com dados provenientes do *DASYLAB*® comprovando assim seu correto funcionamento.

No capítulo 9 faz-se a aplicação da técnica e do software no diagnóstico e qualificação das falhas mais comuns em turbinas hidráulicas (desalinhamento e balanceamento) de duas PCH's e uma UHE que se assemelha as características construtivas encontradas em PCH's. Comprova-se a eficiência do método, bem como, a montagem de um histórico de operação que o software modelo proporciona.

No capítulo 10 fazem-se os comentários finais, bem como, conclusões e propostas para trabalhos futuros que devem ser feitos utilizando novas formas de aplicação para esta nova técnica e também uma melhor revisão sobre a aplicação e características construtivas da rede.

O capítulo 11 é a referência bibliográfica tomada como base na pesquisa e elaboração desse trabalho.

CAPÍTULO 2

ASPECTOS GERAIS DA MANUTENÇÃO, GESTÃO DA MANUTENÇÃO E GESTÃO DA PRODUÇÃO DE ENERGIA COM FOCO NA UTILIZAÇÃO DE TÉCNICAS PREDITIVAS

Neste capítulo serão explanadas técnicas desenvolvidas por diversos pesquisadores visando contribuir para melhoria contínua da gestão da manutenção, bem como, inovações tecnológicas utilizadas para automatizar o diagnóstico de gerenciamento. Tais técnicas podem ser tomadas como base no desenvolvimento de planos e estratégias de manutenção em Unidades Hidroelétricas. Não será desenvolvida nenhuma técnica de gerenciamento de Usinas, pois, para a criação de um plano de manutenção e escolha da técnica de gerenciamento adequada necessita-se de uma análise prévia da planta, bem como, problemas apresentados, equipamentos, layout de produção, equipamentos de medição das condições dos equipamentos, estrutura de transmissão de dados entre outros parâmetros de análise.

2.1. INTRODUÇÃO A MANUTENÇÃO.

A manutenção pode ser definida como um conjunto de atividades utilizadas em um sistema para preservar ou sustentar sua habilidade de desenvolver o serviço de uma

maneira eficiente. Formalmente pode ser definida como o gerenciamento, controle, execução, e qualidade de atividades que assegura ótimos níveis de disponibilidade e o total desempenho da planta para alcançar seus objetivos comerciais (RANGANATH; HUANG; LEEP, 2004).

Foi-se o tempo, antes da segunda guerra mundial, quando ninguém se preocupava em prevenir uma determinada falha antes que a mesma ocorresse. Os meios de produção não possuíam uma linha altamente mecanizada e os equipamentos eram de simples reparo. Então, itens eram trocados quando eles quebravam o que chamamos de manutenção corretiva, e não existia a necessidade de uma manutenção preventiva exceto por um simples serviço. Durante e depois da segunda guerra mundial, a necessidade de elevada mecanização dos sistemas, bem como o limitado recurso e capacidade de trabalho humano foram fatores importantes para a mudança da postura da manutenção.

Com o aumento da complexidade dos sistemas mecânicos, não existia mais espaço para as falhas e o tempo necessário aos reparos afetava a indústria, tornando-se necessário reduzi-lo. Originava-se então o conceito de manutenção preventiva. Mas somente em meados dos anos 70, quando o mundo da mecanização estava em uma fase de grande desenvolvimento e, simultaneamente, as pessoas vieram a se conscientizar quanto aos danos à saúde e ao meio ambiente que as falhas poderiam ocasionar, a manutenção preventiva se generalizou, e passou a ter papel fundamental na sobrevivência das companhias. Nessa época se iniciou o desenvolvimento de instrumentos capazes de realizarem medidas de parâmetros que podiam descrever a condição de determinados itens. Mas foi nos anos 80 que a tecnologia de informação e computação digital ocasionou um grande impacto no monitoramento da condição dos equipamentos devido a integração dos aparelhos de medição com os computadores, originando os sistemas coletores de dados, filtros digitais e outros instrumentos (SARANGA, 2002).

Water (2000) definiu a manutenção de acordo com o fluxograma mostrado na figura 2.1.

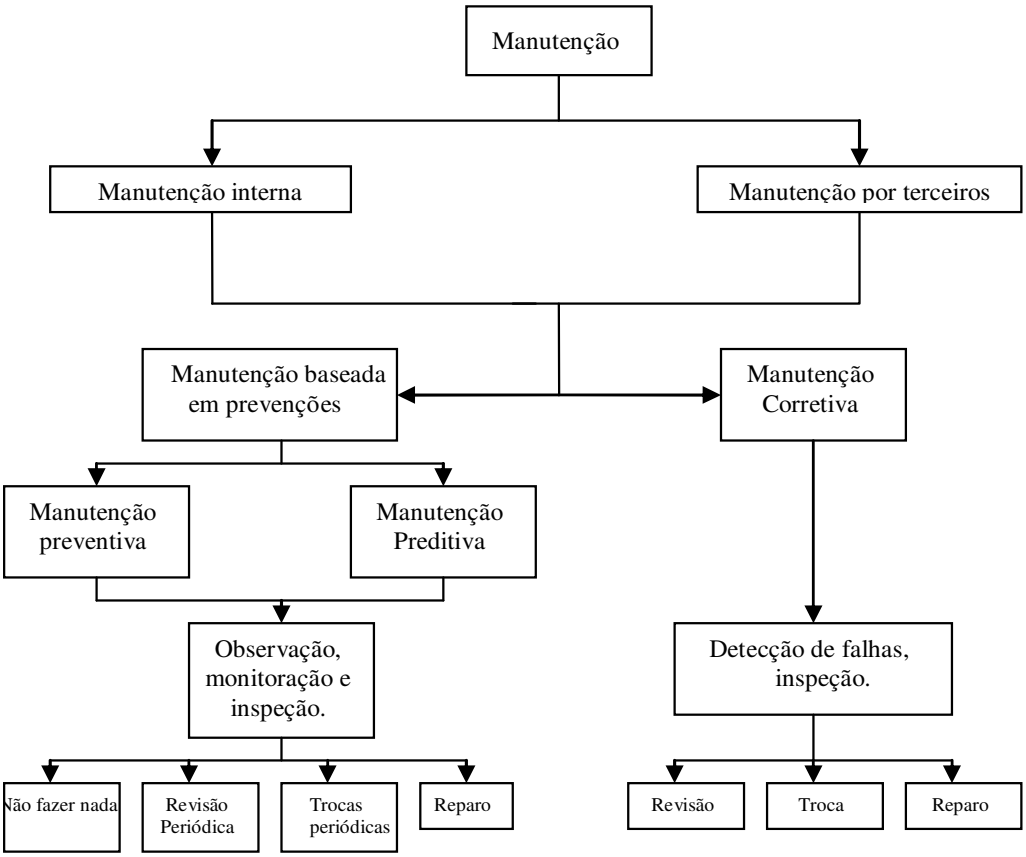


Figura 2.1 – Diagrama do conceito da manutenção segundo Liptrot e Palarchio (2000)

Com o passar do tempo, o papel da manutenção nos mais diversificados setores e processos vem aumentando consideravelmente. O mercado globalizado está forçando as organizações a competirem não somente em preços e qualidade de seus produtos, mas também em produtividade, ou seja, tecnologia, diminuição do tempo ocioso, inovação, confiabilidade e tecnologia de informação (MADU, 2002, citado por FERNANDES, 2003). Hoje a manutenção não é mais vista como o "quebra galho da unidade" e sim como fonte de lucratividade. Com o crescente processo de modernização das unidades de produção (e.g. energia, manufaturados, entre outros), a manutenção vem ganhando papel fundamental nos resultados das empresas principalmente naquelas onde a automação se encontra em nível bastante elevado.

Indubitavelmente, houve uma substancial mudança de paradigma. Até bem pouco tempo atrás, o conceito predominante era de que a missão da manutenção era a de restabelecer as condições originais dos equipamentos/sistemas. Hoje, já se compreende que a missão da manutenção é mais ampla, ou seja, é a de garantir a disponibilidade da função

dos equipamentos e instalações de modo a atender a um processo de produção ou serviço, com confiabilidade, segurança, preservação do meio ambiente e custos adequados. Resumindo, a manutenção deve ser organizada de tal maneira que o equipamento ou sistema pare de produzir somente de forma planejada (MARCONI; LIMA, 2003).

O valor despendido com a manutenção vem aumentando proporcionalmente aos investimentos feitos com o objetivo de modernização das plantas e grau de automatização requerido pelos equipamentos utilizados. Existem várias interpretações sobre o valor da manutenção. Alguns autores chamam esse valor de custos da manutenção, outros normalmente consideram esse valor como parte do custo da produção, mas atualmente muitos pesquisadores utilizam o termo investimento em manutenção, visto que, uma manutenção bem elaborada evita parada não programada dos equipamentos, quebras catastróficas além de garantir a proteção ao meio ambiente e funcionários.

2.2. TÉCNICAS USUAIS E NÃO USUAIS IMPLEMENTADAS PARA GARANTIR A EFICIÊNCIA E QUALIDADE DA AÇÃO MANENTEDORA.

Para garantir uma boa aplicação das técnicas de manutenção preventiva e preditiva é necessário um eficiente gerenciamento e controle de todo o processo de manutenção. Para que isso ocorra, técnicas gerenciais estão constantemente sendo desenvolvidas e algumas já estão consolidadas, tais como: Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC), Manutenção Produtiva Total (MPT), Sistema 5S de gerenciamento, Manutenção autônoma (MA). Todas têm aplicações em diversos setores onde se busca a excelência na qualidade da manutenção resultando na confiabilidade e disponibilidades dos equipamentos. O objetivo dessa gerência é obter o controle total das ações manutendoras minimizando investimentos desnecessários, e manter de modo geral a efetividade de seus equipamentos no melhor nível, ou pelo ao menos no nível desejado.

A metodologia 5S é uma das mais poderosas ferramentas, essencial à obtenção de condições mais favoráveis à aplicação de técnicas mais avançadas. O 5S é o início de um processo de mudança de postura diante da função manutenção. É por si só, técnica suficiente para baixar os custos da manutenção e da indisponibilidade, consistindo em ferramenta preditiva (MARCONI; LIMA, 2003).

Apesar de obter-se uma maior eficiência desta ferramenta na aplicação em manutenção preventiva, devido aos seus conceitos de utilização (seiri), organização (seiton), limpeza (seiso), padronização (seiketsu) e disciplina (shitsuke), pode ser aplicada à manutenção preditiva visando estabelecer um ambiente e condições adequadas, visto que, nesta última são utilizados equipamentos sofisticados e de elevado custo, onde os mesmos podem ficar instalados em locais vulneráveis e/ou em contato com os equipamentos monitorados, cabos transmissores de dados interligando sensores e equipamentos de coleta de dados. Se não houver, pelo ao menos, limpeza e organização, com certeza não faltarão problemas com quebras de equipamentos de medição e ruídos na aquisição de dados.

Em muitos casos o conceito de limpeza é mais que somente manter a estética da empresa, e sim, observar mais criticamente algum vazamento ou ponto em que a máquina esteja mais suja, pois, é de consenso comum que existe grande probabilidade de ocorrer quebra na máquina em lugares onde está acumulando sujeira.

Apesar de ser uma técnica que se adequa a todos os setores, esses processos têm aplicação direta no chão de fábrica e na melhoria das condições de operação e manutenção das máquinas, trazendo grande redução de custos, com a diminuição de desperdício e das falhas provocadas por excesso de sujeira (MARCONI; LIMA, 2003)

Pode-se entender por manutenção autônoma (MA) aquela realizada pelos próprios operadores. É uma ferramenta muito eficaz de manutenção preventiva e preditiva, com baixo custo (MARCONI; LIMA, 2003). A manutenção autônoma pode ser encarada como uma forma de reduzir os custos com pessoal de manutenção e aumentar a vida útil do equipamento, concentrando-se, basicamente, em limpeza, lubrificação, “reapertos” e inspeção diária (TAKAHASHI; OSADA, 1993).

Outra maneira de entendimento do conceito de manutenção autônoma é a redução de custos e de falhas e a melhora do equipamento como os principais benefícios, enfatizando que a redução de custos é reflexo da eliminação de pequenas paradas e diminuição do tempo de reparo, devido ao envolvimento constante do operador (HARTMANN, 1992).

Ambos os conceitos definidos por Hartmann (1992) e Takahashi e Osada (1993) podem ser utilizados em técnicas preditivas. No primeiro, pode ser utilizada a monitoração dos parâmetros periodicamente, substituindo ou aliando a inspeção diária do equipamento. Este monitoramento pode ser intensificado após a detecção da falha para observar a evolução da mesma. “Reapertos” pode ser entendido como intervenção na parte do

equipamento onde está se propagando a falha. Não adianta "reapertar" o equipamento em todos os lugares se somente um ou alguns pontos são de elevada criticidade, seria desperdício de mão-de-obra e talvez retrabalho em alguns casos. No segundo caso, a eliminação de pequenas paradas pode ser concretizada pelo acompanhamento de um determinado parâmetro quantificando e/ou qualificando a falha, fazendo com que o equipamento funcione até alcançar um valor máximo do parâmetro analisado, podendo também gerenciar e estimar a manutenção.

A manutenção centrada na confiabilidade (MCC) é apresentada como uma filosofia de trabalho, sendo um processo usado para determinar o que deve ser feito para assegurar que qualquer ativo físico continue a fazer o que seus usuários querem que ele faça no seu contexto operacional (MOUBRAY, 2000). Esta filosofia visa definir ações a serem tomadas pela equipe de manutenção para manter em operação os equipamentos existentes em uma cadeia produtiva. A MCC estuda a confiabilidade de cada sistema, sendo por isso, um método que envolve um tratamento científico mais apurado.

Nesse processo, cabe à manutenção identificar o índice da confiabilidade de cada equipamento e do processo como um todo e como essa confiabilidade pode ser melhorada. Pela sua característica científica, requer uma equipe de manutenção mais especializada para o desenvolvimento dos estudos de confiabilidade. É a chamada Engenharia de Manutenção (MARCONI; LIMA, 2003). Por este enfoque, a manutenção é relacionada diretamente com a confiabilidade, que é um dos objetivos da engenharia para equipamentos e máquinas.

Devido à incerteza das operações de cálculo modelos e testes experimentais utilizados na ciência da engenharia associados à aplicação de tensões e a resistência dos materiais, teorias de probabilidade são utilizadas para descrever a confiabilidade dos sistemas. Fontes potenciais que causam a baixa confiabilidade normalmente são: falhas devidas ao ambiente de trabalho e distribuição de tensões, inadequado desenvolvimento do projeto (e.g. inadequada resistência), erro humano (na operação e manutenção), baixos valores admissíveis de tensões causados por defeitos no material, projeto deficiente ou processos de manufatura que induz a falha, manutenção práticas de inspeção pobres e mau uso do equipamento.

MCC é um conceito que aplica uma metodologia analítica ou lógica para planejar a atribuição específica de técnicas preventivas e preditivas para sistemas complexos. Em

uma visão geral, MCC é a identificação de falhas críticas e mecanismos de deterioração entre uma análise de engenharia e experiência de campo para determinar as conseqüências e a melhor distribuição das atividades de manutenção (PUSEY; ROEMER, 1999).

Novamente, aqui, os resultados compensam os custos. Um bom estudo de confiabilidade pode dar ao sistema maior racionalidade na aplicação dos recursos destinados à manutenção e melhor controle do estoques de peças, das ordens de serviço e das paradas programadas. A MCC contribui para otimizar o índice de disponibilidade de máquinas e custos, podendo reduzir de 40% a 70% as intervenções periódicas. (MOUBRAY, 2000).

Utilizando técnicas preditivas na MCC, os dados e históricos de falhas dos equipamentos existentes na cadeia produtiva têm alta confiabilidade, podendo assim, serem tratados com ferramentas estatísticas adequadas de forma a auxiliar a manutenção.

Um conceito geral de manutenção produtiva total (MPT) é: *manutenção do sistema de produção com um envolvimento de todos*. Este envolvimento é desde a concepção até o fim da vida útil da instalação/ equipamento, com a finalidade de alcançar perda zero no equipamento e o zero defeito no produto, participando da meta global de uma empresa que é a produtividade. Os conceitos associados ao termo Manutenção Produtiva Total são:

- Manutenção – ação de reparar e restaurar o equipamento, visando quebra zero no equipamento e zero defeito no produto, através da eliminação das perdas e pequenas paradas. Superada esta etapa, as ações naturalmente vão se tornando de ordem gerencial.
- Produtiva – Manter a máquina em atividade, durante um período em que ela está programada para trabalhar, cumprindo com as metas de produção estabelecidas e padrões de qualidade.
- Total – Comprometimento e participação de todos: operadores, manutenção, engenharia, administração, chefias, entre outros.

A MPT está baseada em alguns pilares, entre os quais estão melhorias específicas, manutenção autônoma, manutenção planejada, educação e treinamento, engenharia de aquisição, manutenção da qualidade, controle administrativo e meio ambiente, higiene e segurança. Algumas ferramentas citadas acima já foram mencionadas anteriormente, mas a filosofia MPT não conflita ou faz redundância aos conceitos já estabelecidos e citados

anteriormente e sim, reúne tais ferramentas em torno de uma filosofia de manutenção da produtividade.

Como se pôde notar, a filosofia de MPT envolve várias técnicas e conceitos de gerenciamento da produção. As técnicas preditivas podem ser utilizadas na estimativa e controle de falhas auxiliando o "pilar" da manutenção planejada. É sabido que através desta técnica se consegue ótimos resultados na detecção e prevenção de falhas, contribuindo significantemente na gestão e qualidade da manutenção. A qualidade da manutenção realizada afeta diretamente o nível de qualidade do produto final, ou seja, tenderá ao "zero defeito no produto", filosofia tão empregada e pretendida quando se usa a ferramenta MPT.

Apesar dessas metodologias de gestão estarem consolidadas, a aplicação errônea das mesmas bem como, o não comprimento de qualquer doutrina utilizada por cada uma pode causar resultados desastrosos. Um outro ponto a se observar é a capacidade técnica do pessoal envolvido. Não adianta possuir equipamentos sofisticados para os processos de manutenção utilizando técnicas preditivas se a empresa e/ou equipe não possuir organização ou planejamento na hora de executá-la e, não deter a tecnologia necessária.

A necessidade de sobrevivência das empresas em ambientes competitivos, causou a redescoberta da importância da manutenção. Nesse novo contexto, a necessidade de técnicas de manutenção mais eficazes que possam prever com segurança o tempo entre falhas e, por conseqüência, um maior aproveitamento de tempo na utilização do equipamento e elaboração de um plano de manutenção consistente em dados colhidos no equipamento, vem ajudando na chamada engenharia de manutenção.

Esta nova postura inclui uma crescente conscientização do quanto uma falha de equipamento afeta a segurança, meio ambiente e a produtividade. A maior conscientização da relação entre a manutenção e o insumo e saída, além da crescente pressão para se conseguir alta disponibilidade e confiabilidade da instalação, ao mesmo tempo em que se busca a redução de custos, são outros fatores a estimular a reorganização do setor de manutenção das empresas.

Do ponto de vista da produção, as máquinas mais críticas são aquelas que estão seqüenciadas, ou seja, paralisam toda a produção quando sofrem uma quebra. Porém, do ponto de vista da manutenção, a máquina crítica é aquela que oferece uma maior

complexidade na solução dos defeitos ou até mesmo aquela que fisicamente impõe dificuldades de acesso para uma eventual ação corretiva.

As atuais ferramentas de manutenção, como a MPT, por exemplo, são bastante eficazes e conseguem precisar a criticidade das máquinas do pondo de vista do processo produtivo, porém não oferecem um tratamento diferenciado para estas máquinas, possibilitando uma ação incisiva de manutenção.

Uma vez identificada uma máquina crítica, do ponto de vista do processo produtivo, torna-se imprescindível um gerenciamento de manutenção eficaz desta máquina. As ferramentas de gerenciamento de manutenção existentes trabalham muito com o fator histórico da manutenção e dados de fabricação, o que é realmente de suma importância.

O setor de manutenção deve possuir cinco objetivos claros e devem ser aplicados com o seguinte foco:

- *Qualidade:* o pressuposto básico do objetivo qualidade é "fazer certo". Uma manutenção realizada corretamente, com mão-de-obra especializada e peças que não comprometam o funcionamento por quebras prematuras, pode ser considerada de qualidade. A equipe de gestão da manutenção bem como a de produção espera que o equipamento revisado funcione sem falhas por um determinado período.
- *Rapidez:* a rapidez pode ser considerada como o tempo que a equipe de produção ganha no recebimento do equipamento defeituoso em condições de uso. A diminuição do tempo de manutenção aumenta a disponibilidade dos equipamentos e reduz o custo de horas paradas da cadeia produtiva. No entanto, não adianta fazer um trabalho de recondicionamento de um determinado equipamento em um tempo inferior ao estimado se isso afetar a qualidade da manutenção que por sua vez afetará a disponibilidade do equipamento.
- *Confiabilidade:* deve existir algum processo de manutenção mais adequado ao equipamento de forma que o tempo estabelecido no planejamento da manutenção deva ser cumprido não afetando a cadeia produtiva bem como a gestão da produção que a empresa possui. Esse tempo estimado para manutenção deve ser próximo ao estimado pela equipe de manutenção aumentando assim a confiabilidade da programação.

- *Flexibilidade:* capacidade de adaptar um tipo padrão de manutenção ou de gestão da manutenção aplicando-a a cada equipamento particular.
- *Custos:* não é somente o custo da manutenção que importa e sim o custo/benefício que a mesma agrega ao processo. O interessante é a disponibilidade versus o custo da manutenção. Se a disponibilidade do equipamento para produzir certa quantidade de manufaturados suprir ou igualar ao custo da manutenção realizada então, o processo de manutenção utilizado é adequado para a linha produtiva.

Tu et al. (2001), aplicou seu trabalho de gestão de manutenção em uma grande empresa de produção de componentes eletrônicos avançados. O principal problema da empresa inicialmente era que o departamento de manutenção não possuía objetivos claros, o que fazia a empresa limitar o capital de investimento nessa área. Apesar de a companhia ter implementado sistemas de gerência de manutenção como a MPT, encontraram-se alguns problemas com alguns equipamentos sofrendo excesso de manutenção, e outros equipamentos críticos do ponto de vista da cadeia produtiva, sem a manutenção adequada. Algumas áreas de interesse da manutenção foram investigadas profundamente e outras completamente ignoradas deixando a desejar ou inexistindo qualquer forma de gerência eficiente nesse local. Isto prova que não adianta somente implementar técnicas de gerência, suas doutrinas devem ser seguidas.

Um recente estudo da prática da gerência da manutenção mostra que existem três principais problemas que são comuns nas plantas modernas (TSE; ATHERTON, 1999 citado por TU et al., 2001):

- Como aplicar pré-planos e pré-cronogramas de trabalhos de manutenção para equipamentos sofisticados em operação nos ambientes complexos?
- Como reduzir o alto custo com peças sobressalentes?
- Como evitar o risco de falhas catastróficas e eliminar a interrupção forçada não programada dos equipamentos?

Para lidar com os problemas mencionados, um apreciável número de ferramentas computacionais foi desenvolvido para processar os chamados sistemas de suporte as decisões (SSD) na gestão da manutenção. As ferramentas incluem base de conhecimento, processo de hierarquia analítica, redes de Petri, redes neurais, lógica fuzzy, neuro-fuzzy, e a teoria de Bayesian. Essas ferramentas computacionais vêm acrescentando mais

inteligência aos sistemas SSD auxiliando as tomadas de decisões no gerenciamento da planta industrial (TU et al., 2001).

Como pode ser notado, não são somente os equipamentos e a linha de produção que sofrem inovações, todo o processo de gerenciamento tem sofrido transformações devido ao nível de informatização atual e domínio das técnicas existentes.

Fernadez et. al. (2003), utiliza um modelo de evolução da manutenção adaptado por Antil (1991) do modelo original idealizado por Crosby (1979) conforme mostrado na figura 2.2. Nesse modelo cinco estágios (que reflete a cultura da função da manutenção) podem ser identificados. Nos primeiros estágios a manutenção tem predominantemente a transição de ações reativas (espera a falha acontecer) para uma ação preventiva e, nos últimos estágios começam ser utilizadas técnicas preditivas. Para essa transição ser possível é essencial que os gerentes de manutenção sênior (especialistas) entendam o papel que a manutenção exerce na empresa não somente como uma ferramenta chave para economizar capital devido redução da freqüência de falhas, mas também melhorando a disponibilidades dos equipamentos e dos produtos de saída gerados. Nesse modelo é empregado o sistema de gerenciamento de manutenção computadorizado (SGMC) que são softwares computacionais utilizados para verificar o controle das atividades de trabalho e recursos despendidos, bem como monitorar e reportar trabalhos executados.

Em seu trabalho Garg, A. e Deshmukh (2006), fizeram uma revisão bibliográfica sobre os principais artigos produzidos sobre a gerência da manutenção. Conforme os autores a gerência da manutenção está dividida em cinco áreas, que são:

- Modelos de otimização da manutenção;
- Técnicas de manutenção;
- Programa de manutenção;
- Medidas de performance da manutenção;
- Sistemas de informação desenvolvidos e aplicados para a área de manutenção;
- Políticas de manutenção.

Cada uma dessas áreas está dividida em sub-áreas, conforme mostra a figura 2.3.

	Estágio 1: Incertezas	Estágio 2: Consciência	Estágio 3: Esclarecimentos	Estágio 4: Critérios	Estágio 5: Certeza
Entendimento da gerência e atitude	Não compreensão da manutenção como uma ferramenta de gerência.	O reconhecimento que a gerencia da manutenção possivelmente tem valor	Aprender mais sobre a gestão da manutenção; servir de apoio.	Reconhecida e participativa é o seu papel agora.	A manutenção é uma parte essencial do sistema da companhia.
Tratamento do problema	Problemas são combatidos conforme eles aparecem.	Ainda reativa, mas com peça sobressalente disponível quando a falha acontecer.	Problemas resolvidos pela interferência da manutenção, operação, engenharia e controle de qualidade.	Preditiva utilizando técnicas de monitoração.	Os problemas são prevenidos aumentando a disponibilidade dos equipamentos e portanto, a produtividade
Postura de manutenção da companhia	"Nós não sabemos por que nós temos problemas na manutenção."	"É necessário ter problemas com a manutenção?"	"Nós identificamos e resolvemos os problemas"	"Produtos de qualidade não podem ser produzidos com manutenção ineficiente dos equipamentos, por essa razão a manutenção é uma rotina".	"Nós não esperamos paradas inesperadas, pelo contrário, nós ficamos surpresos quando isso ocorre".
SGMC	Nenhum SGMC é usado.	O sistema já possui módulos de gerencia de ativos e materiais	Um módulo do resultado da manutenção condicional é integrado ao sistema.	Capaz de criar seu próprio plano de manutenção. Um SSD é usado auxiliar decisões no processo.	Totalmente automatizado, desde a detecção da falha até a geração das ordens de trabalho baseadas em confiáveis e significativas informações.

(medida da performance)

Figura 2.2 – Maturidade Organizacional da manutenção proposta por Crosby (1979) e adaptada por Antil (1991).

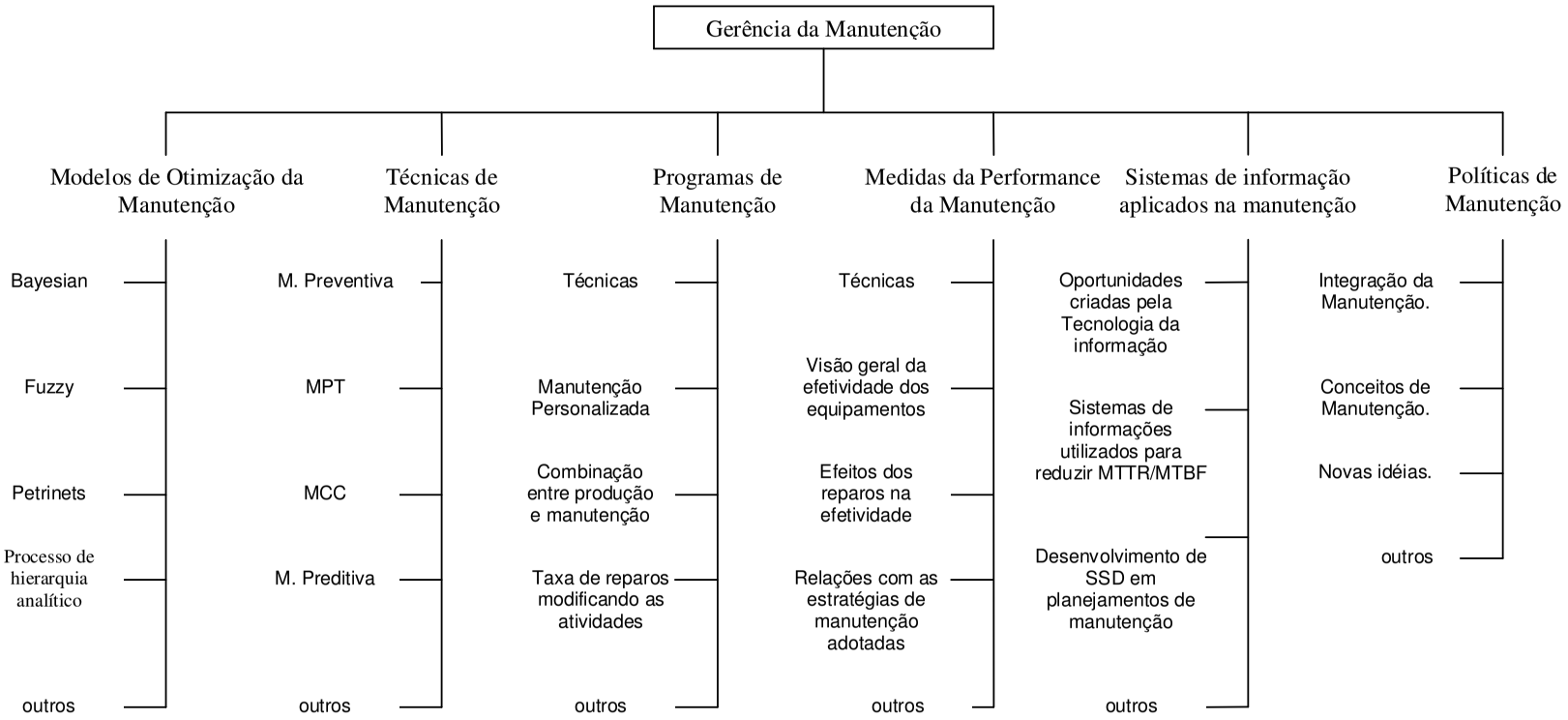


Figura 2.3. – Divisão da gestão da manutenção segundo Garg e Deshmukh.

Conforme se pode observar, segundo Garg, A. e Deshmukh (2006), a gerência da manutenção atual não se limita a aplicação de uma ou mais técnicas e sim, a utilização de cinco áreas que o setor da manutenção deve conter para otimizar ao máximo a sua utilização. Pode-se notar que modelos de otimização da manutenção foram e continuam sendo desenvolvidos, aliados aos sistemas de gerência bem como as técnicas de manutenção. A utilização dos sistemas de informação para transmissão de dados está mais comumente utilizada para o envio e recebimento de informações, visando rapidez e qualidade nos parâmetros analisados e confecções de relatórios para auxiliar a o andamento da manutenção. Um planejamento ou estratégia da manutenção também deve estar bem definido, para que todas as áreas sejam utilizadas de uma forma racional.

Tu et al. (2001), desenvolveu um processo de gerenciamento da manutenção que foi dividido em 15 áreas relacionadas a três pilares da companhia conforme ilustra a figura 2.4. A tabela 2.1 descreve os pontos a serem checados em cada área.

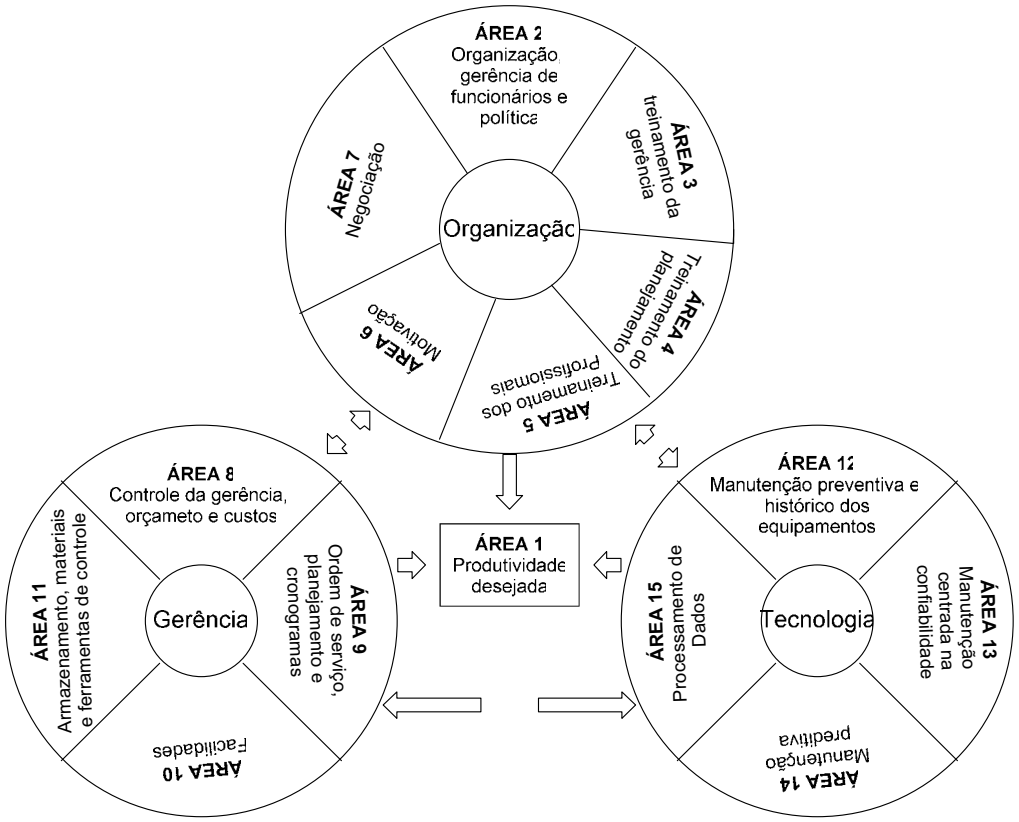


Figura 2.4 – Visão geral da interligação das áreas aplicadas no trabalho de Tu et al.

Tabela 2.1 – *Check Points* descritos por Tu et al. em seu trabalho.

AREAS	PONTOS A SEREM CHECADOS
1. Produtividade desejada.	Utilização × Performance × Grau de Qualidade.
2. Organização, gerência de funcionários e política.	Consciência de organização, descrição do trabalho, supervisão do suporte, igualar os suportes, política de funcionários e satisfação.
3. Treinamento da gerência.	Plano de treinamento, todos os treinamentos realizados, relatórios dos treinamentos, ligado ao suporte da companhia.
4. Treinamento do planejamento	Função de planejar/estimar, plano de treinamento, contém o plano de manutenção, ligado ao suporte da companhia.
5. Treinamento dos profissionais.	Plano de treinamento, treinamento de métodos, quantidade de treinamentos, todos os treinamentos realizados, ligado ao suporte da companhia, satisfação.
6. Motivação.	Satisfação com o trabalho, ambiente de trabalho, habilidade no trabalho é requerida, necessidades insatisfeitas, identificação dos itens que contribuem, trabalhadores ausentes, porcentagem da não produtividade total (NPT)/tempo total de trabalho(TTT).
7. Negociação.	União dos empregados, greves, queixas pessoais, determinação, satisfação
8. Controle da gerência, orçamentos e custos.	Métodos de estimativa de gastos, otimização do controle do orçamento, relatórios gerenciais claros, freqüência de relatórios gerenciais, otimização do controle gerencial.
9. Ordem de serviço, planejamento e cronograma.	Porcentagem do tempo de trabalho planejado/TTT, trabalhos bem aplicados contra trabalhos mal feitos, planejamento ótimo do tempo ocioso, ordens de serviços claras, taxa das paradas planejadas/paradas de emergência, verificação do trabalho e resposta.
10. Facilidades.	Clara alocação dos equipamentos, administração interna, operação correta, manutenabilidade, disponibilidade.
11. Armazenamento, materiais e ferramentas de controle.	Otimização do controle de inventários de peças sobressalentes, materiais e ferramentas consumidos, contra custos de paradas.
12. Manutenção preventiva e histórico dos equipamentos.	Gravação do histórico dos equipamentos, freqüência de análise de dados, freqüência e otimização de rotinas de manutenção preventiva.
13. Manutenção Centrada na Confiabilidade.	Usar e otimizar essa técnica.
14. Manutenção Preditiva	Usar e otimizar essa técnica.
15. Processamento de dados.	Suporte por computador on-line, otimização e precisão do processamento de dados.

Cada uma dessas áreas possui de um até uma dúzia de pontos a serem checados, sendo que a pontuação de cada área varia entre 0 e 10. Diferentes pesos são relacionados a cada um dos pontos a serem checados de acordo com a influência dos mesmos nos custos da produção e manutenção. Dessa forma uma pontuação final pode ser obtida e dessa maneira confeccionado um polígrafo onde se podem observar os pontos falhos da gerência. A figura 2.5 mostra um polígrafo implementado por Tu em seu trabalho em outubro de 1997.

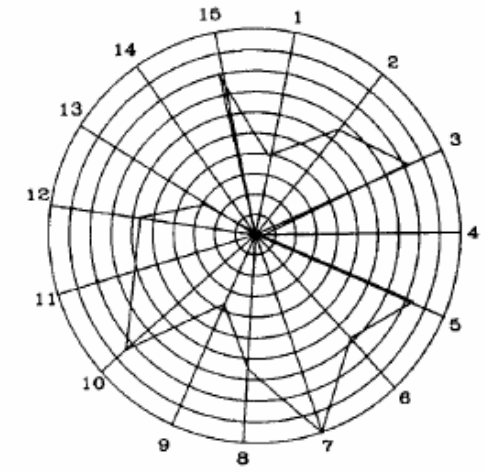


Figura 2.5. – Polígrafo da gerência da manutenção no processo de auditoria realizado por Tu et ali no seu trabalho em outubro de 1997.

2.3. PRINCIPAIS ÍNDICES DE MONITORAÇÃO DA MANUTENÇÃO.

A manutenção está a cada dia quebrando as barreiras do passado. Hoje no desenvolvimento de um grande número de empreendimentos já se pensa na gestão da manutenção como atividade de investimento e não como uma fonte de gastos. Essa mudança está ocorrendo no mundo da manutenção e tem criado a necessidade do crescimento substancial e sustentado do resultado operacional e financeiro de empreendimentos, por esse motivo existe uma progressiva busca por aplicações de técnicas mais novas e eficientes aliadas às práticas gerenciais de planejamentos e medidas do desempenho dos negócios.

A gestão da manutenção com os indicadores técnicos e financeiros de uma organização são a representação gráfica da situação da manutenção, em outras palavras, da abreviação do inglês KPI (Key Performance Indicator).

Neste trabalho será dada ênfase aos indicadores de manutenção, e não aos indicadores de desempenho financeiro.

Os indicadores técnicos relativos a manutenção são relacionados com a qualidade de gerência e técnicas aplicadas que possibilita a observação do comportamento operacional da instalação, sistemas, equipamentos e aparelhos onde tem-se adicionalmente medidas de qualidade do trabalho e o nível de recomendações de planos da manutenção.

As principais medidas de desempenho da manutenção são:

- **Tempo Médio para Falha (*MTTF – Mean Time to Fail*)**: é um valor esperado ou uma média do tempo para que ocorra uma falha aleatória qualquer. Esse indicador mensura a média do tempo que um equipamento pode operar com sua capacidade total sem qualquer interrupção no período considerado, e é comum expressar a probabilidade da falha em um gráfico exponencial, onde a abscissa é o tempo e a ordenada a probabilidade de ocorrer a falha. Pode ser calculada pela seguinte formulação:

$$MTTF = \frac{\sum \text{horas de operação dos componentes}}{\text{n}^{\text{o}} \text{ de falhas dos componentes}} \qquad (2.1)$$

- **Tempo Médio para Reparo (*MTTR - Mean Time to Repair*)**: é a medida de distribuição do tempo de reparo do equipamento ou sistema.

$$MTTR = \frac{\text{total de horas em manutenção}}{\text{n}^{\text{o}} \text{ total de falhas}} \qquad (2.2)$$

- **Tempo Médio entre Falhas (*MTBF – Mean Time Between Fail*):** é um índice de medida utilizado para estiar as intervenções em função do histórico do equipamento.

$$MTBF = \frac{\text{n}^{\text{o}} \text{ de compoenetes} * \text{horas de operação}}{\text{n}^{\text{o}} \text{ de intervenções deste componente}} \qquad (2.3)$$

- **Disponibilidade (*A - Availability*):** é definida como a capacidade de um equipamento ou instalação realizar sua função em condições específicas em

um determinado período de tempo, levando em conta fatores externos a que está provido.

$$A = \frac{\text{h. tot. do equip. (parado ou não) - h. de manut. - h. diversas}}{\text{horas totais do equip. (parado ou não)}} \times 100 \qquad (2.4)$$

ou

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \qquad (2.5)$$

- **Confiabilidade (*R – Reliability*):** é um dos principais atributos que determina a eficácia de um equipamento ou sistema. É definida como a probabilidade de um equipamento ou sistema desempenhar satisfatoriamente sua função a qual foi projetado ou é requerido, sobre condições de operações especificadas, durante um período pré–estabelecido de tempo.

$$R = \left(\frac{\text{MTBF}}{\text{tempo de operação estimado pelo fabricante (preventiva)}} - 1 \right) \times 100 \qquad (2.6)$$

Todos esses itens podem ser afetados pela qualidade da manutenção realizada. O tempo provável de uma falha ocorrer será menor quanto mais baixa for a qualidade da manutenção realizada, onde as trocas de peças ou reajustes no equipamento possam inserir defeitos no sistema que não eram observados antes da operação de manutenção.

Pode-se fazer uma comparação entre os três principais métodos de manutenção aplicados neste trabalho (corretiva, preventiva e preditiva) utilizando os índices descritos anteriormente, caracterizando cada método.

Analisando a manutenção corretiva, sabe-se que suas falhas são catastróficas onde os danos geralmente são irreversíveis e de grande magnitude. Após a manutenção corretiva realizada no equipamento, os futuros valores da *MTTF* podem ser iguais ou inferiores ao valor da *MTTF* anterior a falha, sendo o valor maior ou menor uma variável dependente da severidade da quebra e qualidade no reparo dos danos. A *MTTR* seria muito elevada devido a gravidade das falhas, fazendo com o lucro cessante fosse elevado, além do risco de perda

do equipamento pelos graves danos ou de voltar a condição de operação com qualidade de funcionamento inferior. A disponibilidade também seria baixa, visto que este índice é função das horas paradas do equipamento. A confiabilidade seria drasticamente afetada pela insegurança do valor da *MTBF* devido à grande probabilidade da não normalização das condições iniciais do equipamento.

Por outro lado, a manutenção preventiva é mais eficiente que a citada anteriormente, pois, as *MTTF* e *MTBF* são normatizadas pelos fabricantes fazendo com que os valores destes dois índices sejam regulares ao longo das manutenções. A qualidade da manutenção pode ser garantida pela escolha de peças adequadas e pela mão de obra qualificada para execução da mesma. A disponibilidade do equipamento pode ser afetada devido a somatória das paradas para a realização da manutenção preventiva. A confiabilidade do equipamento passa a ser nula se *MTBF* for igual ao prazo de manutenção estipulado pelo fabricante. A vantagem desta manutenção é a certeza da disponibilidade do equipamento podendo-se assim, planejar a produção aliada a manutenção.

Visto a análise das duas metodologias aplicadas à manutenção, a metodologia da manutenção preditiva visa somente a parada necessária do equipamento, fazendo acompanhamentos e análise de parâmetros definidos para cada tipo de equipamento. Para esta metodologia não ocorrerão falhas nos componentes do equipamento, visto que, o acompanhamento de um parâmetro qualquer é feito ao longo do tempo. O que ocorrerá é a parada antes da falha do componente. Desta maneira a *MTTF* e *MTBF* serão altas e confiáveis, já que, o equipamento só parará depois de esgotada a vida útil de um determinado componente. A *MTTR* será pequena e pré-estabelecida, isto é, uma organização tanto na gestão da manutenção, gestão da cadeia produtiva onde o equipamento faz parte e também de peças sobressalentes, terão sua máxima otimização com a utilização desta metodologia. A disponibilidade do equipamento aumenta devido as diminuições do tempo de manutenção, ou seja, diminuição das *MTTR*, e quantidades de paradas necessárias para as atividades manutendoras da funcionalidade do equipamento, acarretando na diminuição dos lucros cessantes devido a parada do equipamento e logo, da cadeia produtiva ao qual ele faz parte. A confiabilidade aumenta, visto que, as peças só serão trocadas após a comprovação de uma falha eminente, isto é, após a utilização da vida útil real que é diferente da estimada pelo fabricante. Desta forma a *MTBF* será maior e a confiabilidade do equipamento será diretamente proporcional ao crescimento da *MTBF*.

2.4. A GESTÃO DA PRODUÇÃO COM FOCO NA GERAÇÀO DE ENERGIA EM PEQUENAS UNIDADES HIDROELÉTRICAS.

A produção, parte da empresa onde estão localizados os equipamentos da cadeia produtiva foi durante anos tratada como sendo um mal necessário. Os outros setores enxergavam a esta área como a origem principal dos problemas, afinal era a parte da empresa sem carpete, barulhenta, muitas vezes suja, onde trabalhavam pessoas resistentes à mudanças, com aparência cansada e sempre apressadas em resolver o último problema, ou "apagar o último incêndio". Esta segregação da função produção vem mudando nos últimos anos, através de um movimento de revalorização do papel da produção na criação dos insumos de saída visando atender os objetivos estratégicos da organização (CORRÊA; GIANESI, 2001 citado por ALMEIDA, 1999).

A produtividade, elemento comum nas estratégias competitivas, parte de um conceito básico representado pela relação entre o resultado e o esforço despedido. Um processo será mais produtivo quando o objeto de saída de interesse (resultado) possuir menor esforço despendido em sua obtenção em relação aos processos anteriores.

Uma definição simples do conceito de produtividade é uma relação entre quantidade de saídas e a quantidade de entradas necessárias para produzir. Neste caso, a saída pode ser entendida como um produto, por exemplo, energia, ou um serviço ao final do processo, enquanto as entradas serão os recursos utilizados na produção de um bem ou na execução de um serviço. Os principais recursos são os trabalhos, representado pela mão de obra envolvida, e o capital, este envolvendo materiais, serviços, ferramentas e equipamentos (PICANÇO, 2003 citado por ALMEIDA, 1999).

Na produção existem diversos fatores envolvidos, que são os recursos humanos, materiais, equipamentos e instalações (SCHAFRANSKI, 2002 citado por ALMEIDA, 1999). Usando esta visão no fornecimento de energia elétrica, a gestão da produção ou produtividade está relacionada justamente com a administração desses insumos de forma a obter maior quantidade de estoque energético (KW/h) em um determinado período sem afetar a disponibilidade e confiabilidade dos equipamentos da cadeia produtiva, se comparados em períodos em que se deseja uma menor escala de energia.

Do ponto de vista do setor energético, a primeira causa da mudança na visão da produção e sua conseqüente valorização, é a necessidade estratégica do produto, ou seja, a

energia elétrica é fundamental para o desenvolvimento do país porque que é insumo básico para outros setores produtivos.

O segundo fator na revalorização é que além da constante necessidade do crescimento do potencial energético pelo menos proporcionalmente ao crescimento do setor industrial e residencial, com pontos de demanda dispersos por todo o país. A solução adotada, a interligação do sistema de geração, fez com que o gerenciamento da produção enérgica não fique limitado somente em uma planta e sim, a um conjunto de centrais geradoras de energia. Desta forma, a disponibilidade de energia é fundamental, o que exige a atualização e desenvolvimento de novas tecnologias de processo e de gestão da produção e manutenção. As operadoras ainda não possuem um plano de gestão completamente desenvolvido, mas por exigência legal, cada PCH deve possuir: um gerente, mais dois administrativos, três equipes de operadores/manutendores, um mecânico, um auxiliar e dois zeladores. Já para cada grupo de PCHs, com até 15, existe uma equipe de operadores na central de operação, uma gerência geral, uma gerência de manutenção, duas equipes de manutenção, mais administrativos, incluindo compras, mas tudo isso são tentativas, por enquanto.

A necessidade de aumentar a produção, os grandes níveis de disponibilidade e segurança exigidos e a redução os custos com a manutenção, têm contribuído para um crescimento de popularidade dos métodos de manutenção preditiva que substituem a manutenção preventiva e/ou melhoram o planejamento da mesma nas unidades geradoras de energia, juntamente com o controle operacional.

De uma forma mais direta, o aumento do uso da automação afasta o operador do equipamento, colocando-o, muitas vezes à quilômetros de distância. Com isto, perde-se a monitoração da condição da máquina baseada na experiência e sentimento das pessoas que trabalhavam muitos anos com elas. Este fato confere aos equipamentos maior vulnerabilidade a defeitos que surjam sem causar maiores transtornos iniciais ao processo produtivo e evoluam para uma quebra não programada, provocando perdas econômicas substanciais, devido ao lucro cessante durante o tempo parado do equipamento, custo da restauração do equipamento para uma condição operável que pode ser inferior a situação anterior, além de representar riscos à saúde/segurança e ao meio ambiente, onde as penalizações envolvidas despendem grandes recursos financeiros.

Neste contexto, um sistema de manutenção preditiva pode ser apto na monitoração das condições de operação do equipamento, emitindo alertas antecipados das possíveis falhas e predizendo o período de vida de um componente da máquina defeituoso antes de uma quebra fatal, evitando paradas não previstas, aumentando a confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos, diminuindo as paradas programadas da produção.

CAPÍTULO 3

OS ESPECIALISTAS, A INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA EM TÉCNICAS PREDITIVAS DE MONITORAÇÃO DA VIBRAÇÃO DE MÁQUINAS ROTATIVAS E AS CARACTERÍSTICAS GERAIS DE FUNCIONAMENTO DOS TRANSDUTORES DE VIBRAÇÃO

Com o avanço da automação dos equipamentos bem como, o aumento do custo de reparo e manutenção dos mesmos fizeram com que os métodos de manutenção preditiva utilizando análise de vibrações se popularizarem nos últimos anos. Isso também se deve ao fato do acesso mais fácil e diminuição dos custos dos avanços tecnológicos. Outro fator importante foi a grande evolução da interface hardware-software-instrumentação melhorando a qualidade dos sinais e logo, a capacidade de diagnóstico de falhas.

Nesse contexto começaram a surgir pessoas que devido ao acúmulo da experiência em trabalhos e nível de conhecimento teórico bastante "sólido" tornavam-se essenciais na monitoração e diagnóstico de falhas dos equipamentos, estas pessoas são comumente chamadas de especialistas.

As técnicas e conceitos da análise de sinais são aplicados em todo o processo de monitoração. A escolha do sensor de vibração adequado e o restante dos dispositivos utilizados são de vital importância para que o trabalho seja realizado com confiabilidade resultando em um diagnóstico real da condição do equipamento. Devido a esse fato vários tipos de sensores foram e continuam sendo desenvolvidos para uso em determinadas aplicações.

Neste capítulo faz-se uma análise global da iteração especialista-equipamento, os conceitos básicos da análise de sinais e principais tipos de transdutores de vibração, bem como, seus princípios de funcionamento e aplicações na manutenção preditiva.

3.1. OS ESPECIALISTAS.

O desenvolvimento de novos equipamentos tem sido sinônimo de progresso tecnológico na atualidade. Este aumento tem resultado em uma tendência dos equipamentos industriais migrarem para um crescimento na complexidade de seu funcionamento, altas velocidades de regime e uma grande sofisticação. A roda d'agua evoluiu para plantas hidroelétricas, o motor rudimentar a vapor foi base para a criação da turbina a gás e os dispositivos mecânicos rústicos foram substituídos por circuitos eletrônicos.

Devido essa evolução da sofisticação tecnológica, novas indústrias e ocupações estão sendo criadas. Em décadas recentes, especialistas responsáveis por diagnósticos sobre o estado de funcionamento de máquinas têm aparecido dentro do setor de engenharia da manutenção de algumas organizações. Esses indivíduos geralmente possuem um grande conhecimento em construção e projetos de máquinas, onde dominam os procedimentos de reparos e também possuem o conhecimento de funcionamento (dinâmica) dos equipamentos. Isso inclui a familiarização do sistema de vedação e lubrificação, esquemas do processo e controles do equipamento, entre outros quesitos. Especialistas são geralmente instruídos para o monitoramento de máquinas ou supervisão da instrumentação que as mesmas utilizarão.

Claramente o especialista deve ser qualificado em algumas disciplinas técnicas. A figura 3.1 mostra um diagrama exemplificando as características que um especialista deve apresentar.

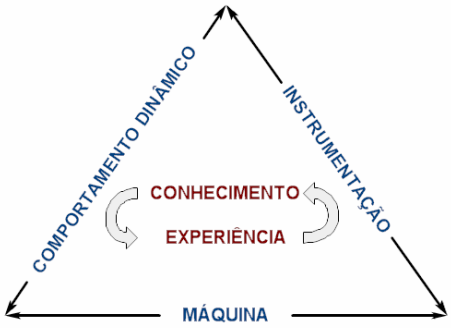


Figura 3.1 – Diagrama da base educacional e profissional que o especialista deve possuir

As áreas básicas que um especialista deve conter incluem: o conhecimento de máquinas, conhecimento do comportamento dinâmico dos equipamentos e um adicional conhecimento de instrumentação. O conhecimento da máquina deve ser completo e este fato pode permitir ao especialista um foco mais realístico e correto do mecanismo de falha ao invés de teorias sem fundamento. A categoria do conhecimento do comportamento físico do equipamento adota uma variedade de conceitos provenientes da estática, dinâmica, cinética, comportamento mecânico dos materiais, dinâmica dos fluidos, transferência de calor, matemática, dinâmica de rotores entre outras que venham a contribuir para o entendimento de funcionamento da máquina em estudo. O conhecimento nessas áreas pode ser completamente integrado com aspectos da instrumentação e medições, cujas requerem um bom conhecimento de dinâmica das máquinas.

3.2. CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS SINAIS UTILIZADOS PARA DIAGNÓSTICOS DE EQUIPAMENTOS UTILIZANDO O PARÂMETRO VIBRAÇÃO.

Transdutores industriais usados para medidas de características dinâmicas dos equipamentos tipicamente são divididos em três categorias distintas: sensores de proximidade utilizados principalmente para medir oscilações eixo, sensores de velocidade e acelerômetros. Cada tipo de transdutor exibe um conjunto de pontos positivos bem como negativos em suas aplicações. As inovações tecnológicas não chegaram a criar um transdutor universal, ou seja, não existe um sensor universal que possa ser utilizado para obtenção de todas as medidas, em todas as máquinas e sobre todas as condições de funcionamento possíveis. Deste modo, o diagnóstico de máquinas deve ser intimamente

familiar com as características de cada tipo de transdutor e a aplicação desses dispositivos em que cada um possua uma melhor vantagem.

Transdutores dinâmicos medem eventos que ocorrem em pequenos intervalos de tempo. Por exemplo, um termopar utilizado em um equipamento pode ser usado para medir temperaturas que variam em minutos ou algumas horas. Transdutores dinâmicos utilizados para medir vibrações podem ser capazes de detectar um determinado fenômeno que ocorre em frações de segundos. Os sinais eletrônicos resultantes das medidas desses transdutores podem ser expostos em gráficos, geralmente complexos, que contem informações significantes, e esses dados são geralmente quantificados conforme os termos abaixo:

- Amplitude (magnitude ou severidade);
- Freqüência (taxa de ocorrência);
- Fase;
- Forma do sinal;
- Posição (geralmente usado quando aplicados proxímetros e *triggers* em máquinas rotativas).

A amplitude de um sinal dinâmico é geralmente proporcional a severidade de vibração do movimento, isto é, elevadas amplitudes são diretamente proporcionais com altos níveis de vibração e isso está geralmente associado com a ocorrência de um problema mecânico. Igualmente pode-se afirmar que uma baixa amplitude de vibração está diretamente associada com o comportamento próprio do equipamento e ausência de defeitos mecânicos. Em geral a degradação de uma peça do equipamento mecânico é observada pelo aumento das amplitudes de vibração. Existem exceções para essa regra geral, e ocasionalmente uma máquina poderá exibir um decréscimo na amplitude de vibração como uma condição mecânica degenerativa.

A freqüência do sinal é determinada pelo período do mesmo. Para exemplificar os pontos significantes de um sinal usar-se-á uma curva senóide dada pela equação 3.1.

$$Y = S \cdot sen(f \cdot t + \phi) \tag{3.1}$$

Onde:

- ***Y***: Amplitude dinâmica;
- ***S***: Módulo do valor máximo da amplitude;
- ***f***: freqüência;
- ***t***: Tempo;
- ***ø***: Ângulo de fase.

As características "construtivas" da senóide utilizada para descrever o ciclo exemplo são descritas abaixo. Seu gráfico é mostrado na figura 3.2.

- S = 2mm;
- f = 1Hz;
- t = 0 até 4,65 segundos;
- $\phi = 0^0$.

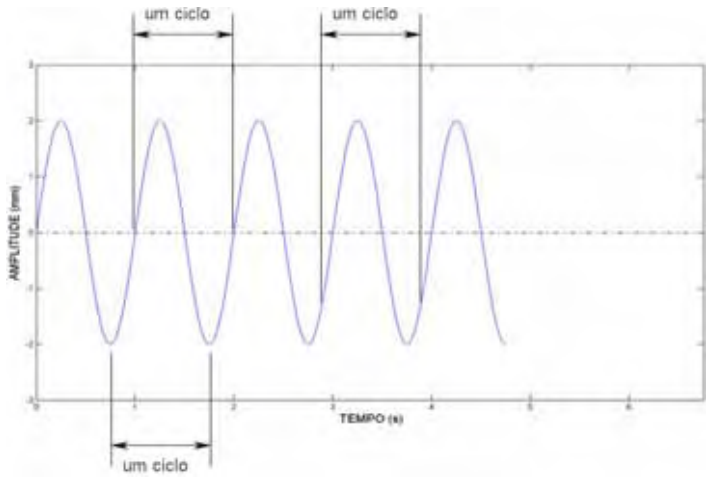


Figura 3.2 – Sinal simples de uma senóide utilizado para exemplificar um ciclo.

Observa-se na figura 3.2 que são identificados três tipos de faixas utilizadas para determinar um ciclo. Basicamente os três tipos de faixas são idênticas e cada uma define um ciclo. No primeiro caso, a amplitude zero é usada para definir um ciclo completo. Nas outras duas faixas, o tempo entre dois picos ou dois vales consecutivos é adotado. Não

importa qual parte do ciclo é usado para determinar o período, o interessante é obter um ponto de medida idêntico aos outros ciclos posteriores.

A freqüência (*f*) é inversamente proporcional ao período (*T*), isto é, quanto menor a freqüência do movimento maior será o período do mesmo e vice versa, ou seja, o tempo para realização de um ciclo poderá ser elevado ou não respectivamente. Essa relação básica não é somente importante durante a análise do comportamento do sistema mecânico, ela também deve ser observada durante a seleção de um transdutor de vibração apropriado e associado a instrumentação de diagnóstico.

$$f = \frac{1}{T} \tag{3.1}$$

Antes de entrar em detalhes sobre qualquer transdutor de vibração é necessário discutir o tempo entre os eventos. Esse é um ponto de vital importância, pois, é pequena a quantidade de problemas mecânicos que são resolvidos baseados sobre uma medida com um único transdutor. Em alguns casos, vários transdutores são aplicados e os sinais de saída são examinados por amplitudes relativas, conteúdo de freqüências, tempo e fases entre os sinais.

De uma forma simples, o ângulo de fase é somente o tempo retardado ou ângulo formado entre dois sinais como descrito na figura 3.3.

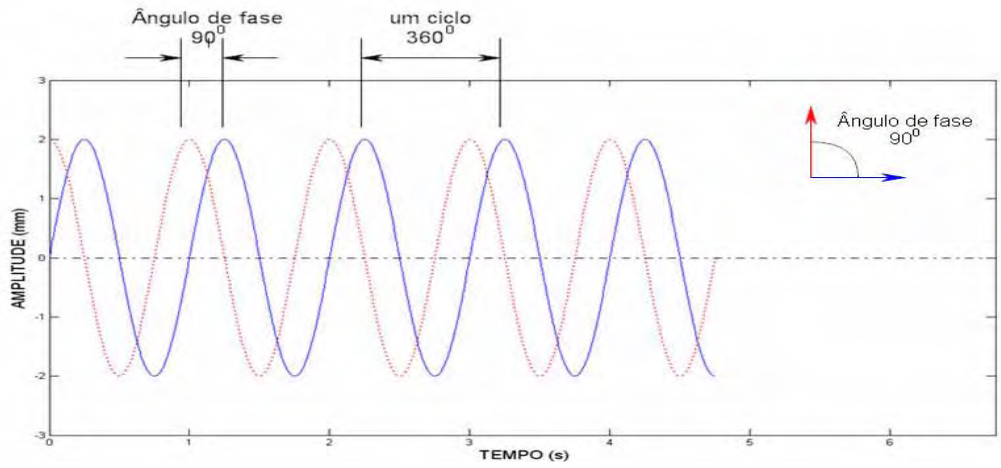


Figura 3.3 – Ângulo de fase entre duas senóides em um mesmo ciclo, de mesma freqüência e amplitude.

A seguir seis regras para ângulos de fases deverão ser consistentemente aplicadas em todo esse trabalho. São elas:

- Todas as medidas de fase requerem um mínimo de dois sinais ou dois parâmetros de um sinal, por exemplo, aceleração e velocidade;
- Medidas de fase devem ser feitas dentro de um mesmo ciclo;
- Ângulos de fase deverão ser expressos em graus de fase retardado. O termo retardado significa em ângulo de fase negativo, isto é, contrário a rotação e no sentido contrário do tempo.

Aplicam-se essas regras para todas as medidas de vibração, pulsação de pressão, sinais de força, entre outros. Vetores derivados de medidas de sinais dinâmicos deverão manter as mesmas regras e todos os cálculos analíticos deverão ser configurados conforme critério similar. Finalmente, a locação de massas de balanceamento e outras referências angulares específicas no rotor deverão ser consistentes com as regras citadas anteriormente.

Considere os gráficos no domínio do tempo mostrado na figura 3.4 até figura 3.7. Para a figura 3.4, a amplitude, freqüência fundamental (1X) e ângulo de fase são idênticos ao sinal seno utilizado na figura 3.2. Entretanto, pode-se notar que todas as amplitudes e a forma ou aparência geral das figuras 3.5 até 3.7 tiveram mudanças significativas se comparadas com o sinal seno inicial. Essas mudanças são devidas a adição de harmônicas da freqüência fundamental. Em todos os três casos, a adição de componentes harmônicos que são um conjunto de múltiplos da freqüência fundamental altera a forma básica do sinal. A resultante dessa somatória de harmônicas dos sinais senos com as mesmas amplitudes farão com que cada gráfico apresente formas distintas.

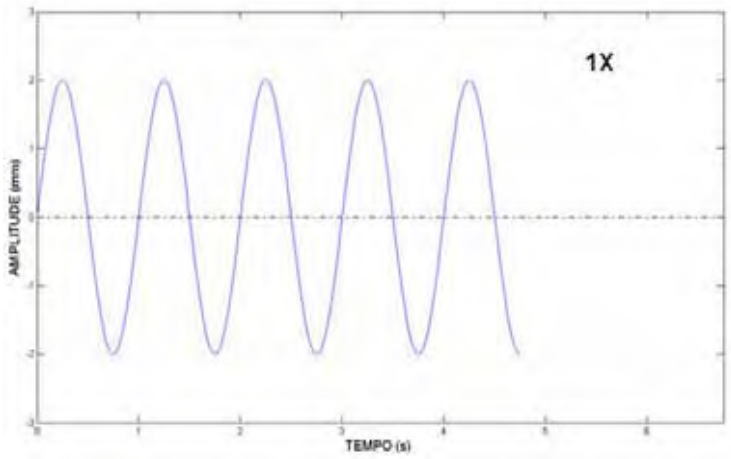


Figura 3.4 – Sinal no tempo de uma senóide com freqüência fundamental de 1Hz.

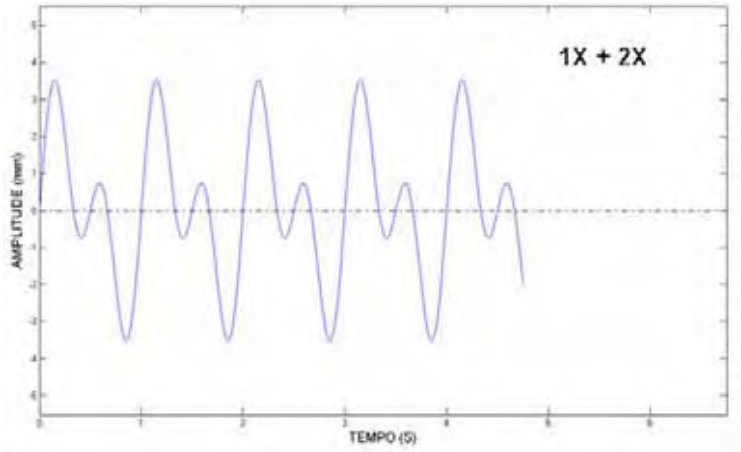


Figura 3.5 – Sinal no tempo de uma senóide com adição da primeira harmônica

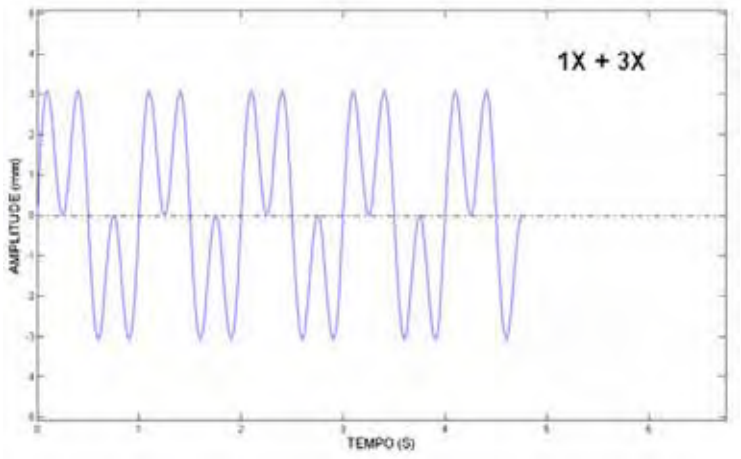


Figura 3.6 – Sinal no tempo de uma senóide com adição da segunda harmônica.

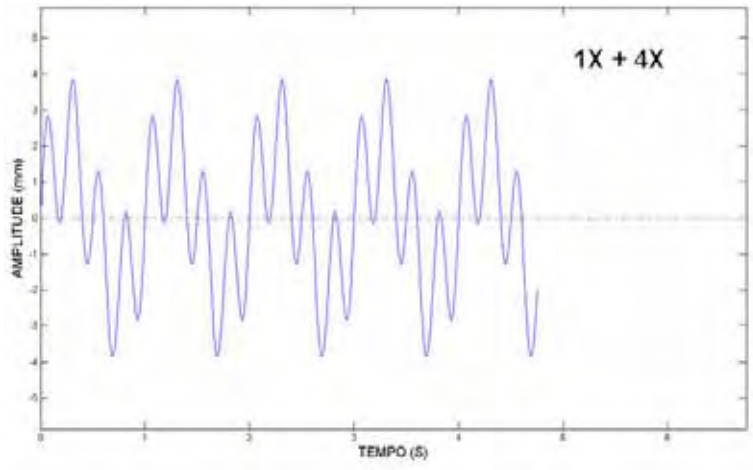


Figura 3.7 – Sinal no tempo de uma senóide com adição da terceira harmônica.

A complexidade do sinal no domínio do tempo mostra a vastidão de formas que um sinal possa ter. É fácil visualizar e reconhecer alguns sinais que possuem combinações simples, mas quanto mais complexo o sinal maior a possibilidade do mesmo ser incompreensível no domínio do tempo. Por esta e outras razões, que técnicas mais avançadas, especiais para o processamento e análise de sinais são utilizadas na detecção de falhas.

3.3. VISÃO GERAL DOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA AQUISIÇÃO DE SINAIS NA MANUTENÇÃO PREDITIVA.

A medida de vibração é utilizada para diferentes fins, como por exemplo: diagnóstico da condição do equipamento, controle da vibração e detecção das principais fontes de ruído.

Geralmente a instrumentação utilizada para a aquisição de um determinado sinal possui os seguintes elementos:

- Transdutor;
- Condicionador de sinais;
- Processador de sinais;
- Armazenamento do sinal de dados;

- Display (tela do computador ou outro dispositivo).

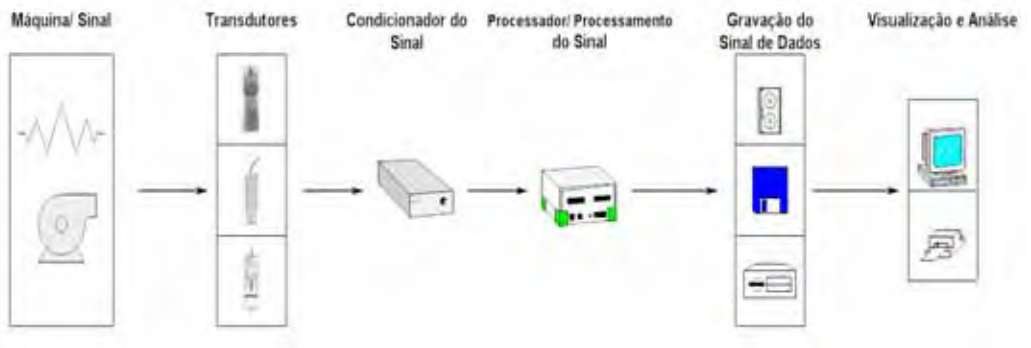


Figura 3.8 – Esquema representativo da instrumentação utilizada na aquisição e análise de sinais.

O primeiro elemento de qualquer medida de vibração é o transdutor, por esse motivo a escolha correta é de vital importância. Isso torna o transdutor o principal elemento dessa cadeia e por esse motivo que se discutirá mais detalhadamente esse dispositivo em tópicos futuros. Transdutor é um dispositivo que converte uma determinada forma de energia em outra diferente, no caso dos transdutores de vibração ocorre a conversão de energia mecânica em energia elétrica.

Normalmente o sinal elétrico obtido em um transdutor não é adequado para uma análise direta ou para leitura, por isso, faz-se necessário o uso do condicionador de sinais. Neste dispositivo se encontram o amplificador, conversor A/D e compensador da impedância do cabo.

Está incluso no processador do sinal os filtros, bem como pode ser encontrado também medidores dos valores *RMS*, medidores de valores de pico do sinal e integrador.

Os filtros são utilizados quando há necessidade de isolar uma determinada faixa de freqüência para a realização da análise. Existem dois principais tipos de filtros que são: filtro tipo passa alta e filtro tipo passa baixa. Outros dois tipos de filtros utilizados são derivados do tipo passa alta e baixa, são eles: filtro tipo passa-banda e corta banda (band stop). Para exemplificar, figura 3.9 mostra o sinal no domínio da freqüência sem a utilização dos filtros e após a utilização de cada um.

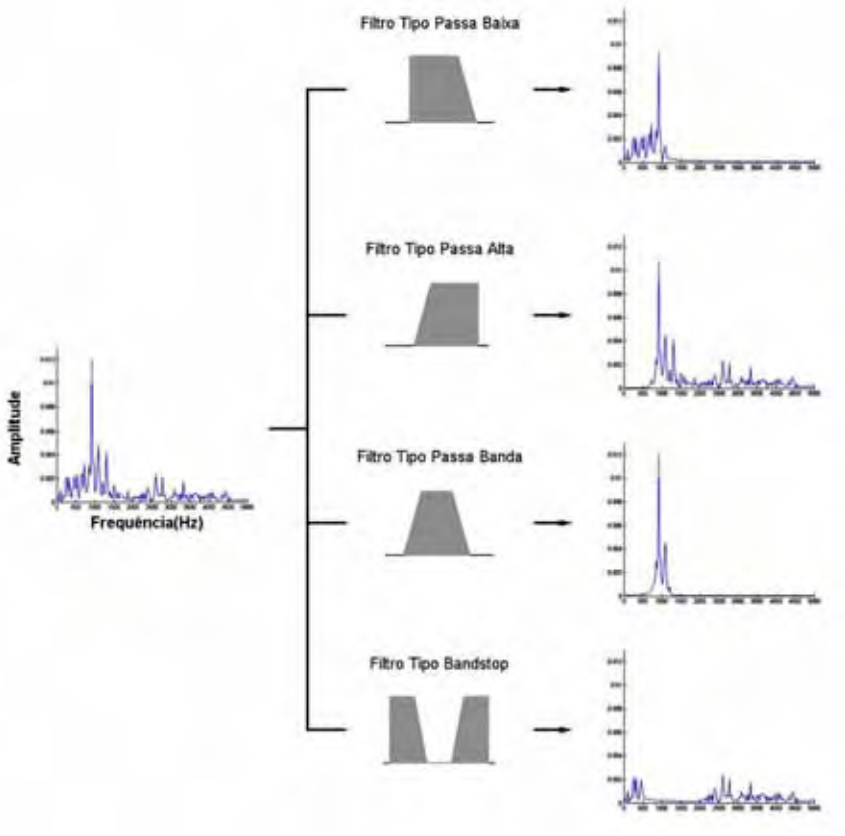
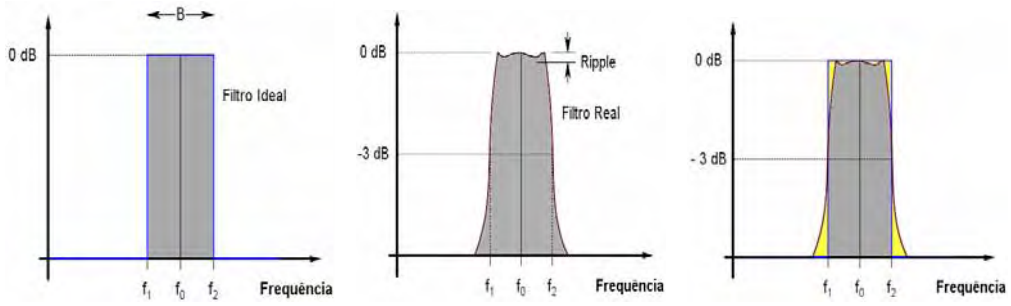


Figura 3.9 – Resposta do sinal no domínio da freqüência para os quatro tipos de filtro.

Como os filtros não são dispositivos ideais, isso se deve a razões construtivas e operacionais, os filtros não cortam o sinal bruscamente e sim, atenuam o mesmo de forma gradativa.



(a) (b) (c)

Figura 3.10 – (a) Sinal filtrado por um filtro passa banda ideal, onde B é a largura da banda (f_2-f_1) e f_0 é a freqüência central da banda. (b) sinal filtrado por um filtro tipo passa banda real. (c) definição da largura da banda de ruído de 3dB.

O armazenamento do sinal de dados pode ser feito por um gravador digital que utiliza fita cassete ou em um *hard disk* de computador. Comumente é a partir desse ponto que a análise do sinal é realizada.

E por fim, o display é o ultimo dispositivo onde se tem uma análise visual do sinal adquirido, que pode ser tanto no domínio do tempo quanto da freqüência. Pode ser visualizado na tela de um computador, em uma carta gráfica proveniente de um ploter e na tela do osciloscópio.

3.4. PRINCIPAIS TRANSDUTORES APLICADOS NA MONITORAÇÃO CONDICIONAL UTILIZANDO O PARÂMETRO VIBRAÇÃO

A aquisição e a análise do sinal de vibração dependem diretamente da qualidade das suas medidas. Essa qualidade está diretamente relacionada com o sinal proveniente do transdutor de vibração.

Três tipos de sensores são comumente utilizados para medição de máquinas rotativas, são eles:

- Transdutor de deslocamento sem contato ou Proxímetros;
- Transdutor de velocidade ou vibrômetros;
- Acelerômetros.

3.4.1. TRANSDUTOR DE DESLOCAMENTO SEM CONTATO

Proxímetros são utilizados para obter medidas de deslocamento relativo entre partes móveis e estacionárias de máquinas, comumente utilizado para medição do deslocamento relativo entre eixos e mancais.

Indiferentes das possíveis configurações físicas, todos os transdutores de deslocamento sem contato consistem da utilização dos mesmos componentes em sua confecção. Como exemplo, considere o esquema de um típico transdutor de deslocamento mostrado na figura 3.11. Nessa figura a bobina é confeccionada em plástico ou material cerâmico a qual está localizada na extremidade do transdutor onde é conectada por dois fios pertencentes a um cabo coaxial que liga o transdutor e o condicionador. Este cabo

coaxial deve ser eletricamente isolado e possuir um comprimento estipulado de forma a manter uma impedância adequada entre o transdutor e o condicionador. Se o tamanho do cabo interconectado for alterado, a calibração do transdutor também será influenciada.

Figura 3.11 – Corte transversal de um transdutor de deslocamento sem contato.

Três cabos externos são ligados no proxímetro: um cabo para o sinal de saída (cor branca), outro é um ponto comum (cor preta) e o terceiro é a alimentação do proxímetro (cor vermelha). A fonte de energia é fornecida por um sinal elétrico DC de 24 volts. Internamente o proxímetro possui um oscilador que converte parte da energia de entrada em um sinal de alta freqüência cuja faixa é da ordem de megahertz (MHz). Este sinal de alta freqüência é direcionado para a bobina do transdutor via cabo coaxial resultando na excitação do dispositivo. Tal excitação produz um campo magnético que se irradia da ponta do transdutor. Quando a ponta do sensor fica próxima a uma superfície condutora, correntes parasitas são induzidas na superfície do material, consumindo energia da excitação do transdutor e reduzindo sua amplitude. Como a distância entre a ponta do transdutor e o material condutor é variada, uma tensão DC correspondente é gerada na saída do proxímetro, que irá variar proporcionalmente à variação da distância entre a transdutor e o eixo. Normalmente o proxímetro é fixado nos mancais de equipamentos que se deseja a análise, onde o eixo faz o papel da superfície condutora podendo-se obter então o deslocamento relativo entre o eixo e o mancal.

Cartas de calibração para os proxímetros podem ser confeccionadas, bem como a sensibilidade de cada um pode ser determinada.

$$\text{Sensibilidade do proxímetro} = \frac{\Delta(\text{voltagem})}{\Delta(\text{deslocamento})} \qquad (3.2)$$

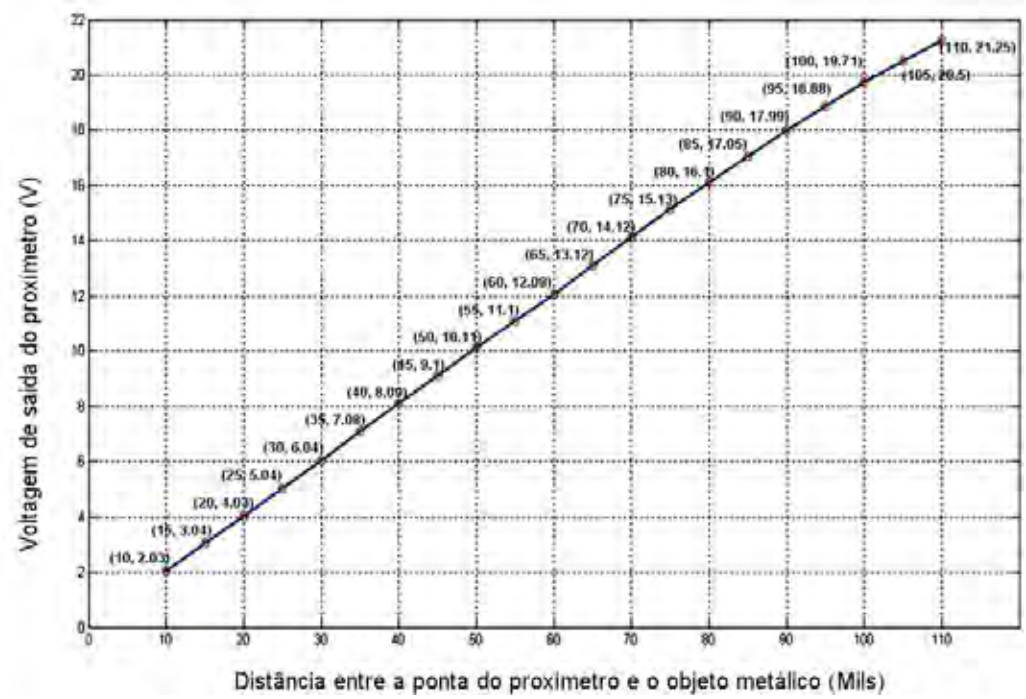


Figura 3.12 – Curva de calibração de um transdutor sem contato.

Utilizando a carta de calibração exibida na figura 3.12 pode-se encontrar a sensibilidade do transdutor cujos valores máximos e mínimos medidos respectivamente são: 10 e 110 Mils (1Mil = 0,001 polegadas).

$$sensibilidade = \frac{21{,}25 - 2{,}03 volts}{110 - 10 Mils} = 192{,}2\, milivolts/Mil \qquad (3.3)$$

A sensibilidade de cada proxímetro é influenciada diretamente pelo material da superfície que se visa a obtenção da medida. Nas medições, qualquer fenômeno que distorce o "crystal lattice" do condutor pode influenciar a sensibilidade do transdutor. Mudanças na resistividade elétrica, permeabilidade magnética, magnetismo residual ou concentração de tensão poderão parecer como ruído no sinal. Dependendo de suas magnitudes elas poderão alterar o fator de escala. Mudanças de materiais também têm grande efeito sobre a sensibilidade conforme mostrado na tabela 3.1

Tabela 3.1 – Sensibilidade dos transdutores de deslocamento em relação aos materiais de superfície.

MATERIAL	*SENSIBILIDADE DO TRANSDUTOR*
Cobre	380 millivolts/mil
Alumínio	370 millivolts/mil
Latão	330 millivolts/mil
Carboneto de Tungstênio	290 millivolts/mil
Aço Inoxidável	250 millivolts/mil
Aço – 4140 or 4340	200 millivolts/mil

Em muitos casos após a calibração dos transdutores, tabelas e gráficos são confeccionados visando a monitoração do equipamento pela definição de níveis de alerta e alarme conforme mostrado na figura 3.13. Os critérios de severidade de vibração são bastante usuais e existem uma grande gama de norma técnicas internacionais que estabelecem valores aceitáveis e não aceitáveis aplicáveis para alguns equipamentos mais comuns.

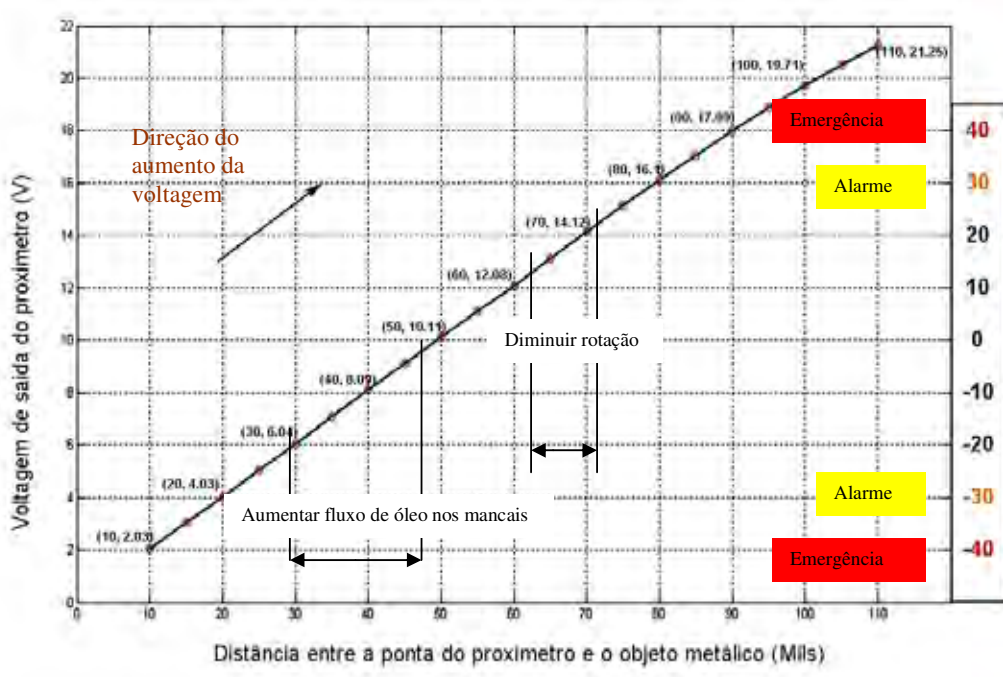


Figura 3.13 – Exemplo hipotético da definição dos níveis de alarme e trip na tabela de calibração de um transdutor de deslocamento.

Podem-se citar algumas vantagens e desvantagens na utilização do transdutor de deslocamento, são elas:

- Medidas dinâmicas do movimento do eixo;
- Medidas estáticas da posição do eixo;
- Excelente resposta do sinal;
- Montagem robusta e confiável;
- Simples calibração;
- Encontrado em várias configurações físicas;
- Instalação adequada em ambiente agressivo;
- Pode ser aplicado em uma grande variedade de máquinas;
- Não sofre efeitos de óleos e gases.

Também se podem citar algumas desvantagens desse transdutor que são:

- Sensível a imperfeições da superfície de medição e magnetismo;
- Sensível a propriedades do material;
- A superfície do eixo deve ser de boa condutibilidade;
- Uma fonte externa de energia é requerida;
- A impedância do cabo que liga o transdutor ao condicionador deve ser mantida;
- Sensível a interferências de outros transdutores de deslocamento próximos;
- Instalação potencialmente difícil em algumas instalações;
- Não pode ser submerso em água.
- Temperatura

Pode-se enfatizar ainda que, com o avanço tecnológico sensores a laser foram desenvolvidos e podem ser aplicados com a mesma finalidade dos proxímetros, porém, eliminando as desvantagens citadas acima.

3.4.2. TRANSDUTOR DE VELOCIDADE

Transdutores de velocidade representam de uma forma parecida com os acelerômetros, sendo comumente chamado de vibrômetro. Eles são utilizados para obtenção de medidas de velocidades absoluta em elementos não estacionários. Como exemplo a figura 3.14 mostra a secção transversal de um vibrômetro usual.

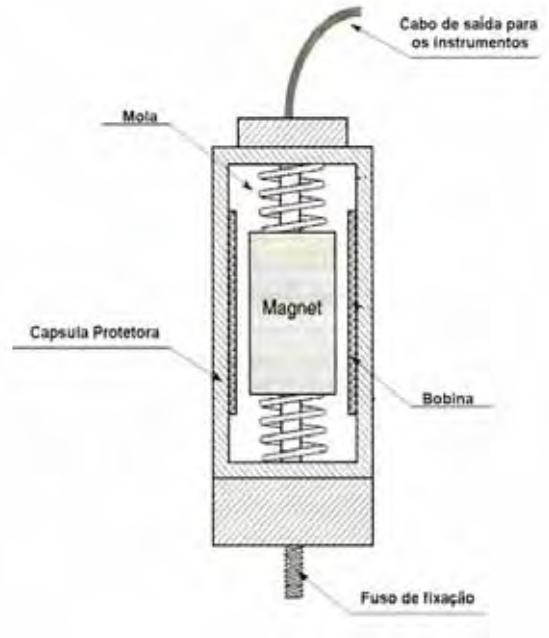


Figura 3.14 – Transdutor de velocidade e o corte transversal esquematizando seus elementos internos.

A cápsula do transdutor é diretamente conectada na superfície que se pretende a análise vibratória. Usualmente tal conexão é realizada por meio de roscas feitas na superfície de medida (fêmea) e outra no vibrômetro. Em todos os casos possíveis de fixação deve-se obter uma montagem rígida de modo que o movimento vibratório do transdutor de velocidade seja seguramente o mesmo que o da carcaça onde o dispositivo esteja montado. O transdutor sente a vibração da superfície por meio de uma bobina elétrica circunferencial que está presa a parede interna da cápsula de proteção. Essa bobina

move-se juntamente com a cápsula devido a união física entre esses dois elementos, consequentemente, o movimento da bobina será o mesmo da cápsula que por sua vez terá o mesmo movimento da superfície vibratória.

Um determinado material magnético (imã permanente) existente no interior da cápsula e localizado no centro da bobina é suportado por duas molas bastante flexíveis, cada uma presa em suas extremidades. Essas molas suportam o material magnético confinado de forma que o único movimento permissível do mesmo seja somente na direção do eixo principal (sentido para cima e para baixo no eixo principal do transdutor).

O funcionamento se dá pela movimentação relativa entre o material magnético e a bobina quando o vibrômetro entra em contato com a superfície vibratória. Esse movimento corta as linhas de fluxo, induzindo uma voltagem proporcional à velocidade de vibração. O sinal produzido que é gerado apenas pelo movimento é de baixa impedância podendo ser utilizado diretamente para análise ou monitoração.

Abaixo um exemplo de carta de calibração de um vibrômetro.

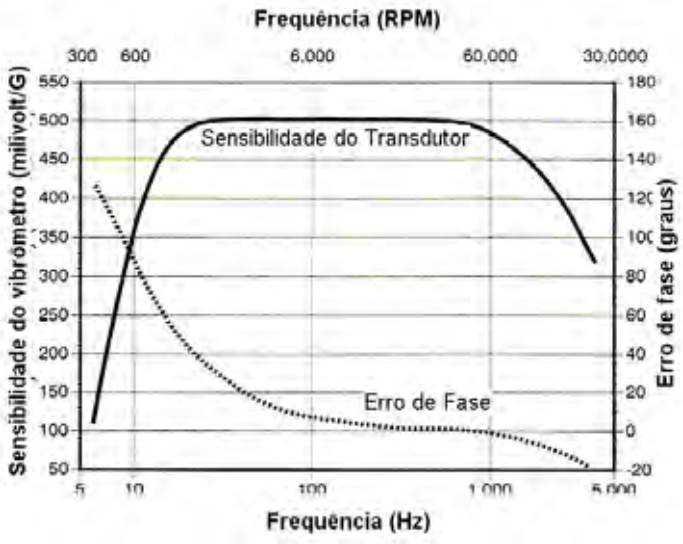


Figura 3.15 – Curva de calibração de um Pick-up de velocidade genérico

A calibração dos vibrômetros é um pouco complexa devido a grandes quantidades de equipamentos necessários para fazê-la conforme mostra a figura 3.16.

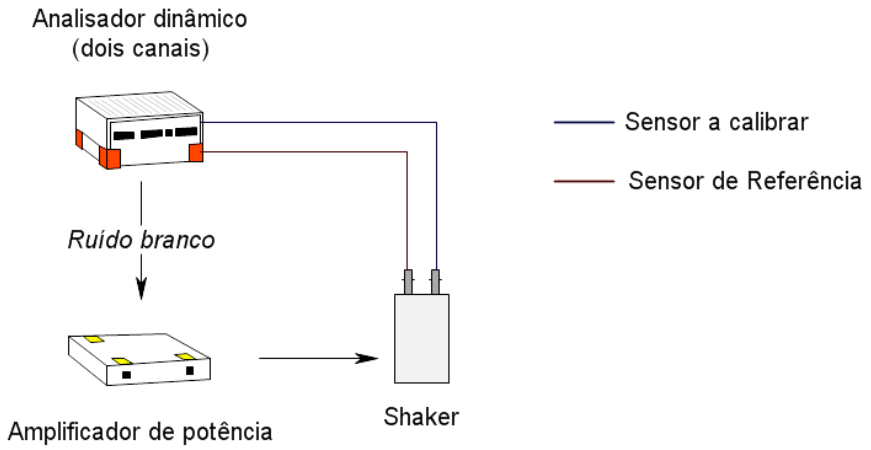


Figura 3.16 – Esquema do aparelho usado para calibração de um transdutor de velocidade.

Um analisador dinâmico de sinais (DSA– *Dynamic Signal Analyser*) é usado para gerar um ruído branco de saída, onde pode-se produzir simultaneamente várias freqüências dentro de uma mesma largura de banda. Por outro lado, esse tipo de excitação permite uma calibração rápida quando comparados aos osciladores de freqüências simples que é usado para fazer a varredura da faixa de operação do transdutor.

O ruído branco é utilizado como entrada no amplificador que passa o sinal amplificado para o *shaker* que por fim transmitirá o movimento nas mais diversas freqüências para o transdutor de referência e o de teste.

Os transdutores de velocidade contêm internamente molas e partes moveis que são propícios a falhas por fadiga ao longo do tempo. Serviços com temperatura e nível de severidade de vibração elevada diminuem drasticamente a vida útil desses componentes.

Podem-se citar as seguintes vantagens desse transdutor:

- Mede o movimento absoluto da superfície que se pretende a análise;
- Fácil conexão em máquinas, tubos, estruturas e bases;
- Bom sinal de resposta entre 900 e 90.000rpm (15 e 1,5kHz);
- Geração própria do sinal;
- Não requer instalação elétrica especial;
- Pode ser montado em qualquer direção;

- Disponível em várias configurações.

Também se podem citar as seguintes desvantagens:

- Sensível a fixação na montagem e orientação do transdutor;
- Incapaz de medir vibrações relativas ao eixo ou posição;
- Dificuldade de checar a calibração;
- Resposta ruim do sinal abaixo de 900rpm (15Hz) e acima de 90.000rpm (1.5kHz);
- Erros de fase e amplitudes abaixo de 1.800rpm (30Hz);
- Operar com o transdutor acima de 600rpm (10Hz) devido a sua freqüência natural;
- Grande probabilidade de falhas devido à fadiga (peças móveis);
- Sensível a temperatura;
- Dificuldade na instalação em áreas apertadas.

3.4.3. ACELERÔMETROS

Acelerômetros são transdutores de vibração versáteis para medidas de valores absolutos de partes estacionárias de máquinas ou estruturas. Esses dispositivos são de contato direto, isto é, são montados diretamente no elemento mecânico que se deseja efetuar a análise de vibração.

Apesar dos acelerômetros piezoelétricos serem fabricados em uma grande variedade de configurações físicas visando atender uma extensa faixa de aplicações, os elementos internos fundamentais em sua construção mantêm-se compatível entre si. A figura 3.17 mostra de forma esquematizada um transdutor piezelétrico.

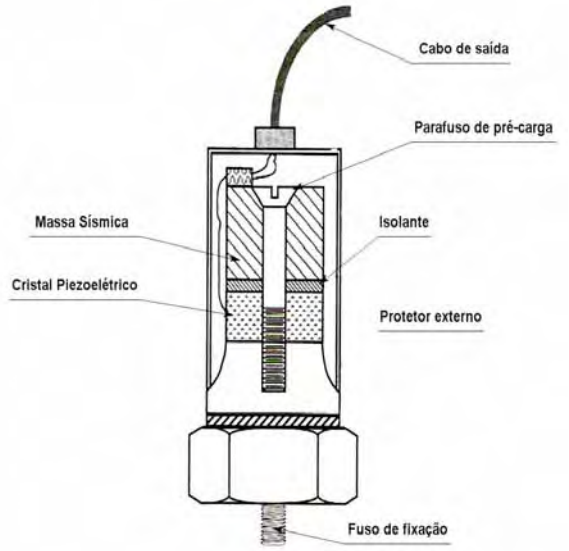


Figura 3.17 – Corte de um acelerômetro piezelétrico.

O sinal de saída deste tipo de transdutor de vibração é totalmente depende das propriedades eletromecânicas do cristal piezelétrico. Especificamente, o cristal emitirá uma carga elétrica quando forças mecânicas ou deformações forem aplicadas. Inversamente, quando cargas elétricas são aplicadas no cristal ele deformará fisicamente na direção relacionada com a magnitude da carga elétrica. Esse conceito é aplicado em vários componentes eletrônicos variando desde computadores, equipamentos de comunicação até acelerômetros. Apesar de vários materiais exibirem propriedades piezelétricas a maioria dos acelerômetros industriais usam cristais de quartzo natural ou de materiais cerâmicos policristalinos. Cada tipo de material piezelétrico possui características específicas e a seleção final do cristal depende da eventual aplicação do transdutor.

A figura 3.17 representa um acelerômetro do tipo piezelétrico incluindo a base de aço que suporta o cristal mais a massa sísmica. Todo o contato entre a massa e o cristal é feito pelo parafuso de pré-carga que une a massa sísmica, o cristal piezelétrico e a base, todos internamente a uma estrutura de proteção. Quando esse tipo de montagem é fixada em uma superfície que está vibrando, a massa sísmica aplicará uma força definida sobre o cristal. De acordo com a segunda lei de Newton, a força produzida é igual a massa pelo produto da aceleração. Dentro do acelerômetro, o cristal é submetido a uma força devido a atuação da massa sísmica sendo que, a carga de saída é proporcional a aceleração. Obviamente,

pequenas forças produzirão baixos níveis de vibração, e forças elevadas manifestarão uma alta aceleração.

Um cuidado que se deve tomar ao utilizar o acelerômetro é observar qual a faixa de freqüência que se pretende utilizá-lo, pois, este tipo de transdutor possui a limitação de sua freqüência natural. Uma resposta em freqüência característica de um acelerômetro é mostrado na curva de calibração na figura 3.18. Nessa curva é grafada a sensibilidade de saída do acelerômetro versus sua freqüência. O transdutor exemplo em particular exibe baixa freqüência atenuada antes de 900 rpm (15Hz) e faixa de ressonância acima 1.800.000 rpm (30 kHz). Claramente medidas feitas na vizinhança da freqüência de ressonância pode ser influenciada pela amplificação do sinal medido associada a ressonância. Pode-se ser observada uma faixa linear cuja sensibilidade de saída está entre 1.200 e 600.000 rpm (20 e 10 kHz), chamada de faixa de trabalho do transdutor, sendo que nesta faixa pode-se usar o transdutor a uma sensibilidade constante de 100 milivolts/g.

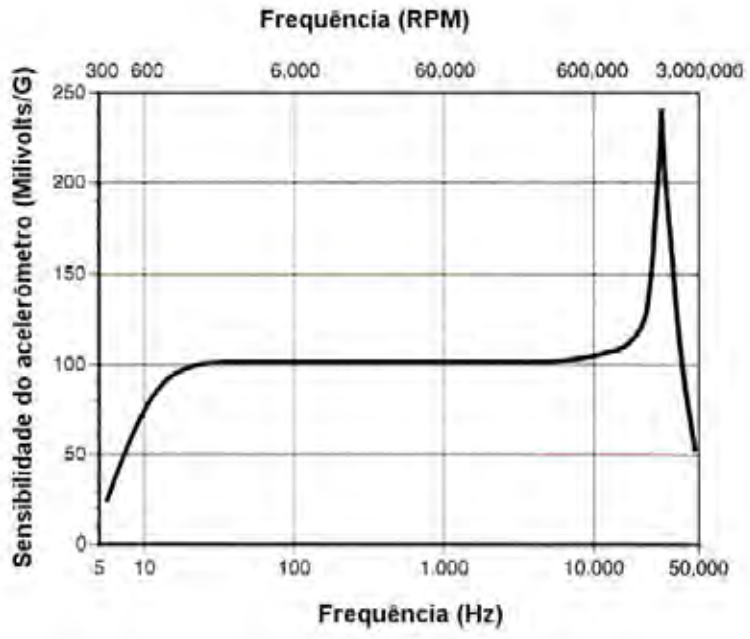


Figura 3.18 – Curva de calibração típica de um acelerômetro.

As principais vantagens desse transdutor são:

- Medidas em carcaças ou estrutura do movimento absoluto;

- Fácil fixação em máquinas, tubos, fundações ou estruturas;
- Bom sinal de resposta entre 900 e 600.000 rpm (15 e 10 kHz);
- Robusto e de construção de alta confiabilidade;
- Encontrado em vários tipos de configurações;
- Pequenos transdutores e de fácil montagem em áreas restritas.

As principais desvantagens deste transdutor são:

- Sensível a forma de montagem e condição das superfícies;
- Não mede vibração do eixo bem como sua posição angular;
- Péssima resposta de sinais abaixo de 600 rpm (10 Hz);
- Cabo do transdutor sensível a ruídos, movimento e interferências eletrônicas.

CAPÍTULO 4

TÉCNICAS CLÁSSICAS E NORMAS DE MONITORAMENTO UTILIZANDO ANÁLISE DE VIBRAÇÃO

Análise de óleo e vibração de um determinado equipamento são os dois métodos de diagnósticos mais utilizados atualmente. Neste trabalho somente será discutido a aplicação da análise da vibração no monitoramento da condição de máquinas rotativas.

Não é sabido exatamente quando a análise de vibração foi usada pela primeira vez como ferramenta de diagnóstico de falhas, mas é claro que as técnicas de diagnósticos da condição do equipamento usando assinaturas de vibração vêem sido usadas a algumas décadas. Os processos básicos de análise de vibração utilizam como captadores dos sinais acelerômetros para medir a aceleração absoluta em componentes fixos da máquina ou sensores de deslocamento (indutivos, capacitivos ou ópticos) para medir a oscilação relativa eixo-mancal ou estrutural. Para análise o foco são as seguintes áreas: análise no domínio no tempo, análise no domínio da freqüência, análise estatística e análise no domínio tempo – freqüência.

No domínio do tempo a técnica mais utilizada é a avaliação da severidade de vibração com base em alguma medida de nível global do sinal vibratório, tal como valor *RMS*, amplitude pico a pico ou zero a pico. Também se usa medidas de ângulos de fase

(PUSEY; ROEMER, 1999) e diagramas de órbita. Normas e recomendações foram e continuam sendo confeccionadas para quantificar a severidade de vibração. Todas são fontes de estudos de órgãos internacionais tais como a ISO, DIN no Brasil a ABNT e FUPAI. Todas utilizam características do sinal no domínio do tempo para cálculo dos parâmetros e assim estimar a condição de funcionamento do equipamento por meio de tabelas e cartas de severidade.

No domínio da freqüência, o diagnóstico utilizando análise espectral ainda é a técnica mais comumente usada, pois, com uso do algoritmo da *FFT* pode-se obter o espectro de freqüências do sinal sendo, cada uma, relacionada a uma fonte de ruído proveniente do equipamento, considerando que o sinal vibratório captado pelo acelerômetro é o somatório das diversas fontes excitadoras do equipamento. As fontes excitadoras mais comuns são: freqüência de giro dos eixos, freqüência de engrenamento para equipamentos mecânicos que possuem pares engrenados, freqüência de passagem das pás em ventiladores ou turbinas, freqüência dos elementos rolantes, entre outras.

Na análise estatística usam-se parâmetros estatísticos para estimar o nível de severidade de vibração, visto que, o sinal de um equipamento mecânico como o utilizado nesse trabalho é do tipo discreto aleatório. Os parâmetros mais utilizados são: valor *RMS* (*Root Mean Square*), Kurtosis, Skewness, variância, entre outras.

No domínio tempo – freqüência, técnicas menos usuais em campo, podem ser citadas a Transformada de Hilbert, Transformada Curta de Fourier, Wavelet, entre outras.

Cada uma possui seus benefícios e limitações e sempre é recomendado o uso de mais de uma técnica no diagnóstico do equipamento. Neste capítulo pretende-se mostrar as principais técnicas utilizadas na detecção de falhas de máquinas rotativas bem como seu diagnóstico. Também serão explanadas técnicas menos usuais, mas utilizadas na monitoração preditiva por análise de vibrações.

4.1. CARACTERÍSTICAS GERAIS DA QUANTIFICAÇÃO DA VIBRAÇÃO.

Para exemplificar de maneira simples as técnicas de monitoramento da severidade de vibração que virão a ser definidas neste trabalho, considere a figura 4.1 como o sinal harmônico adquirido por um transdutor de vibração no domínio do tempo. Nesta figura três diferentes medidas de amplitudes são mostradas.

A magnitude total da curva é representada pelo valor pico a pico. Como o nome do próprio termo diz, essa medida de amplitude é tomada da menor amplitude do sinal dinâmico para a maior amplitude desse mesmo sinal em um determinado ciclo. Da figura 4.1 tem-se que a menor amplitude é -2,0 e o pico máximo do sinal é igual a 2,0. Entretanto, a amplitude pico a pico é igual a distância total entre as cristas do sinal, isto é, o valor pico a pico é igual a 4,0. Ocasionalmente, referências históricas tomam o dobro da amplitude máxima de uma determinada medida como sendo o valor pico a pico.

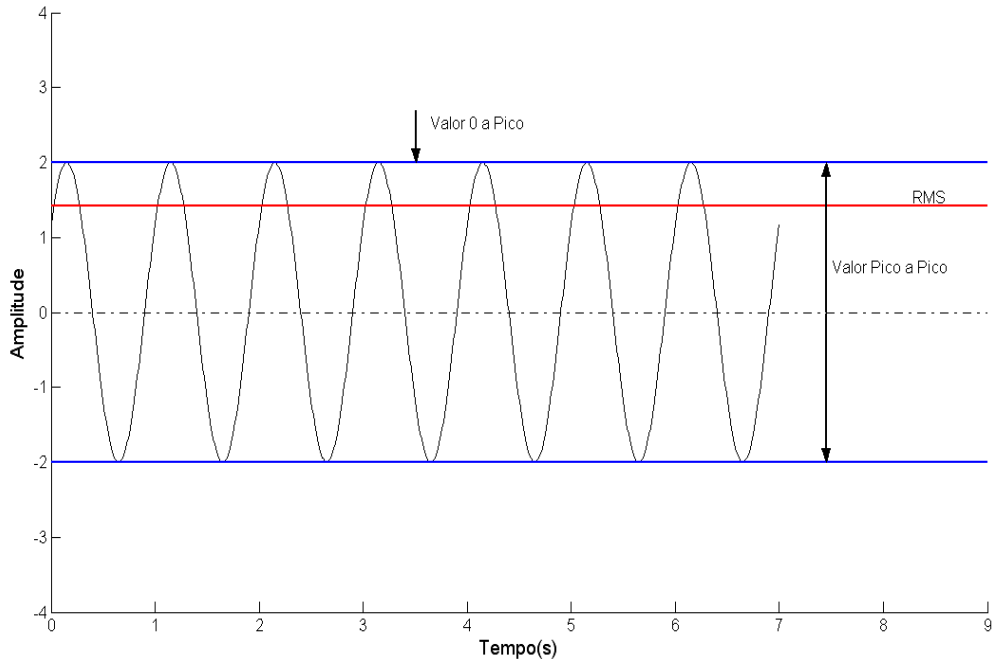


Figura 4.1 – Gráfico exemplificando os principais parâmetros medidos e analisados para efetuar o monitoramento de máquinas.

Medidas de vibração (oscilação) do eixo são geralmente calculadas por valores pico a pico. É conveniente usar o valor pico a pico quando se deseja obter a oscilação relativa eixo-mancal dos equipamentos.

O segundo tipo comum de medida de amplitude mostrada na figura 4.1 é o valor zero a pico (*zero to peak value*). Essa medida é tomada na referência origem do sinal, ou seja, é tomada do ponto de amplitude nula do sinal dinâmico para a crista de onda mais elevada. Do gráfico, o máximo pico é 2,0 então, o valor zero a pico desse sinal é igual a 2,0. A vibração das carcaças é normalmente expressa em valor zero a pico. Em alguns países como os EUA a unidade polegada por segundo (*Inches per Second* – IPS) e a aceleração da

gravidade (G's) são utilizadas como medida de velocidade e aceleração respectivamente. Claramente a relação entre o valor pico a pico e zero a pico para este caso (sinal harmônico simples) pode ser dada pela utilização da seguinte equação:

$$Amplitude_{\text{p-p}} = 2 \times Amplitude_{\text{0-p}} \tag{4.1}$$

O terceiro tipo comum de medida da amplitude de vibração é a velocidade *RMS*, ou do inglês, Root Mean Square. Como mostrado na figura 4.1, a amplitude *RMS* é menor que o valor zero a pico. Para um sinal harmônico puro (seno ou co-seno), a proporção entre o valor *RMS* e o valor zero a pico é igual a $\sqrt{2}/2$, ou 0,7071 conforme mostrado na equação 4.2 e 4.3.

$$Amplitude_{RMS} = 0{,}7071 \times Amplitude_{0-p} \tag{4.2}$$

$$Amplitude_{RMS} = 0{,}3536 \times Amplitude_{p-p} \tag{4.3}$$

O gráfico mostrado na figura 4.2 a seguir, mostra um sinal complexo formado por uma série de senóides e ruídos onde se podem notar os parâmetros descritos anteriormente:

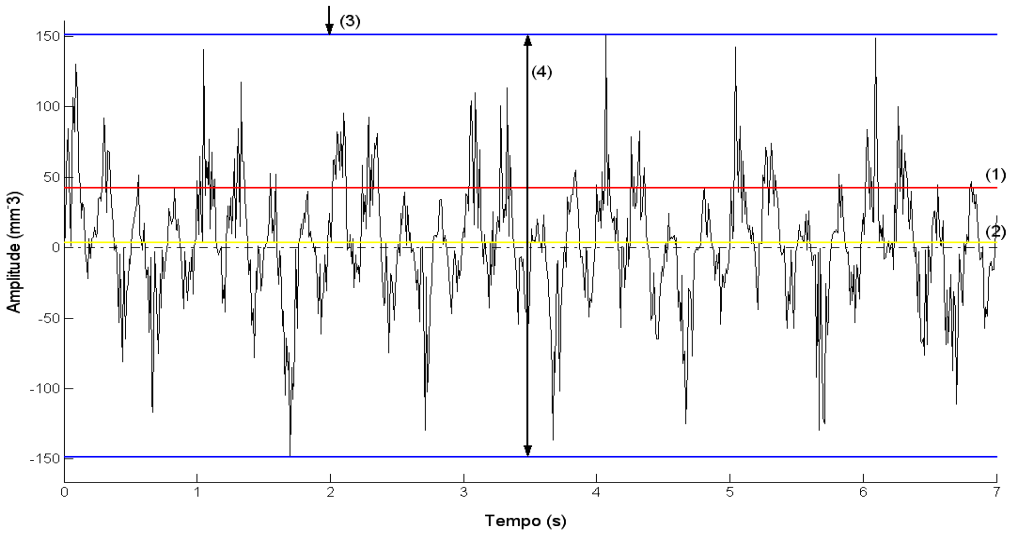


Figura 4.2 – Valores globais de medida de vibração para um sinal de vibração complexo. (1) Nível do valor *RMS* (X_{RMS}). (2) Nível do valor médio [X_m]. (3) Valor pico a pico [$X_{p\text{-}p}$]. (4) Valor de zero a pico [$X_{0\text{-}p}$].

Tendo essa visão geral dos métodos de monitoração da vibração, pode-se então descrever cada um mais profundamente bem como a teoria, normas e casos.

4.2 ANÁLISE DE VIBRAÇÃO.

Invariavelmente, toda máquina vibra devido o funcionamento de seus componentes, alguns níveis de vibrações são desprezíveis, outros são toleráveis, e existem os que são danosos ao equipamento. As falhas de equipamentos são principalmente devidas a fadiga proporcionada por folgas excessivas que geram impactos repetidos em determinados pontos do equipamento. Essas folgas aparecem na forma de freqüências de ressonância. O aparecimento dessas características no sinal são provavelmente causados por defeitos e eventualmente são indicativos de início de falha, da propagação da mesma até a quebra do equipamento.

Essencialmente o estudo de vibrações de máquinas visa a estimativa da vida dos componentes que determinam o tempo de funcionamento da máquina. O primeiro passo para identificar o problema de uma máquina é entender totalmente o porquê que ela vibra e então saber como ela vibra.

O monitoramento da vibração é utilizado quando se deseja analisar vibrações geradas de componentes dinâmicos, como máquinas rotativas. Geralmente cada componente geram modos distintos de vibração que podem indicar sua condição ou qualquer mudança da mesma. Isso possibilita gravar e identificar, através de análise, características específicas de vibração, “assinaturas”, que fazem desta técnica a melhor e mais utilizada para o monitoramento de máquinas rotativas. Associada com a relativa facilidade e pelo baixo custo de implementação (se comparada com as máquinas monitoradas), explica porque o monitoramento de vibrações é aplicado extensivamente em máquinas rotativas se comparada com outras técnicas.

Como dito no capítulo 2, na análise de vibração se aplicam normalmente transdutores para medir aceleração, velocidade e deslocamento. A escolha de um determinado transdutor depende das freqüências que se deseja a análise e das limitações do ambiente.

Outros sensores podem ser utilizados para efetuar a análise de vibração tal como: o sensor capacitivo, que mede o deslocamento relativo entre duas superfícies, o sensor

indutivo que além de medir o deslocamento relativo é sensível a velocidade e sensor ultra-sônico que capta as ondas de choque e oriundas de defeitos.

Os principais métodos de análise de vibração serão descritos nos próximos itens.

4.3 NÍVEL GLOBAL DE VIBRAÇÃO.

É dos métodos mais simples e bastante utilizado para efetuar o acompanhamento ou até mesmo o controle da vibração. Trata-se da monitoração de um valor global medidos em ponto críticos da máquina, sendo que o principal ponto de medição são os mancais. Esse valor é um sinal de resposta da estrutura devido às fontes excitadoras proveniente da dinâmica do funcionamento do equipamento, logo, ele representará a medida do seu estado.

Existem dois métodos utilizados para o cálculo da severidade de vibração em máquinas rotativas que são objeto de normatização por organizações internacionais, que possibilita fazer comparações com máquinas semelhantes. O primeiro método utiliza medidas de vibrações absolutas em partes estacionárias do equipamento. O outro método utiliza a medida de deslocamento do eixo como critério de avaliação da condição de funcionamento do equipamento. A escolha do tipo de método que se deve adotar depende do tipo e complexidade do equipamento, faixa de freqüência que se deseja a análise, fontes e freqüências de ruído, velocidade de operação, fundação onde a mesma está montada e tipos de mancais.

O acompanhamento e monitoração utilizando valores de severidade podem ser feitos de duas maneiras: a primeira pode-se acompanhar e comparar a magnitude das severidades medidas utilizando tabelas confeccionadas por órgão de normatização internacionais, onde a base de dados foi obtida pela análise estatística de vários casos e máquinas semelhantes. O segundo critério leva em consideração a variação local do valor medido, isto é, uma mudança do valor se comparado com medidas anteriores realizadas durante a operação do equipamento. Geralmente são definidos quatro níveis de severidade para classificar a condição do equipamento. Segundo a norma ISO esses níveis são:

- Nível A: Boas condições;
- Nível B: Aceitável para operação continuada;

- Nível C: Limite tolerável;
- Nível D: Não permissível.

4.3.1 DEFINIÇÃO DO ALARM E TRIP PARA UM SINAL VIBRATÓTIO.

Para longos tempos de operação de equipamentos "chaves" na cadeia produtiva ou de alto custo de manutenção é conveniente definir valores de *ALARM* e *TRIP* relacionados a magnitudes de severidade de vibração. Desta maneira, níveis de *ALARM* e *TRIP* podem ser estabelecidos para os equipamentos somente utilizando os valores de severidade globais. A definição desses valores, conforme citado anteriormente, podem ser feitos por análise de tabelas normatizadas ou pela dinâmica da mudança da magnitude de vibração medida.

Segundo a norma ISO 7919-2 o nível de alarme e trip são respectivamente:

- *ALARM*: proporciona uma advertência que um determinado valor definido de vibração está alcançando ou uma mudança significativa na magnitude do mesmo ocorreu e uma ação remediadora é necessária. Em geral se uma situação de alarme ocorrer o equipamento pode continuar em operação por um determinado período enquanto que a investigação é conduzida para identificar a razão para a mudança da severidade de vibração e definir qualquer ação reparadora.
- *TRIP*: Especifica a magnitude de vibração máxima que nunca deve ser ultrapassada durante a operação da máquina, pois, causará danos a mesma. Se o valor do *TRIP* for excedido, imediatamente ações devem ser tomadas para diminuir o nível da severidade de vibração, ou a máquina deve ser retirada de operação imediatamente.

O valor definido para o *ALARM* pode ser consideravelmente maior ou menor para diferentes máquinas. A norma ISO recomenda que os valores de *ALARM* devam ser 25% maior que o valor do limite superior da zona B. Se os valores admissíveis de severidade são baixos, o valor do *ALARM* pode ser definido abaixo da zona C.

Os valores para o *TRIP* também possui diferenças para as máquinas e não é possível obter uma norma precisa para os valores absolutos de *TRIP*. Em geral o valor do *TRIP* se encontra dentro da zona C ou D.

Outra maneira de se estabelecer níveis de *ALARM* e *TRIP* é utilizando o critério da variação dinâmica dos valores globais. O nível de *ALARM*, para um monitoramento periódico, pode ser estabelecido por um valor quando houver uma variação significativa da severidade de vibração, podendo ser indicativo que uma possível falha irá ocorrer. Em geral, defini-se uma variação da ordem de 3dB em relação ao nível anterior, ou seja, se X(i) for o valor da severidade na inspeção atual, e X(i-1) for o valor obtido na inspeção anterior, então considerará alarme quando (ARATO, 2004):

$$20\log_{10}\left(\frac{X_i}{X_{i-1}}\right) \geq 3 \tag{4.4}$$

Uma variação de 3dB entre medidas consecutivas é um indicativo de uma avanço rápido da falha e o período de monitoramento deve ser reduzido visando a gestão da manutenção e a não-quebra do equipamento.

Apesar das normas e outras regras de monitoração e definição de níveis de *ALARM* e *TRIP*, pode-se também obter tais valores específicos para cada equipamento através de históricos e análises estatísticas dos dados de monitoração referente aos mesmos de forma a tornar o diagnóstico mais fidedigno para o equipamento em questão.

4.3.2 VELOCIDADE EFICAZ DE VIBRAÇÃO OU VELOCIDADE *RMS* (*Root Mean Square*).

A velocidade *RMS* para um sinal contínuo pode ser calculada pela seguinte equação:

$$v_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T v(t)^2 \cdot dt} \tag{4.5}$$

Onde:

v_{ef}: velocidade eficaz de vibração ou velocidade *RMS*;

T: Período;

$v(t)$: sinal de vibração adquirido.

O parâmetro a ser medido é a velocidade de vibração absoluta sobre as partes fixas das máquinas, preferencialmente os mancais.

Para um sinal discreto a equação 4.5 é utilizada bloco a bloco e ponto a ponto do bloco. Após obter a velocidade *RMS* de cada bloco calcula-se a média. Tem-se então:

$$v_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{\frac{NPB}{TA}} \cdot \sum_{0}^{NPB} v(t)^2 \cdot \frac{1}{TA}}$$

$$v_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{NPB} \cdot \sum_{0}^{NPB} v(t)^2} \tag{4.6}$$

Onde:

TA: taxa de aquisição;

NPB: numero de pontos por bloco.

O parâmetro a ser medido é a velocidade de vibração absoluta sobre as partes fixas da máquina, preferencialmente os mancais. Neste caso, o valor global escolhido como unidade de medida para indicação da severidade de vibração, o valor eficaz da velocidade, ou simplesmente velocidade *RMS* (v_{ef}) não é representado por uma escala de valores única. Isto se deve a grande diversidade de formas, massa, montagem e condições operacionais dos equipamentos, o que acarreta valores da velocidade *RMS* diferentes para níveis de severidade aceitáveis (ARATO, 2004). Devido a essa variedade de equipamentos que os mesmos são subdivididos em classes em algumas normas que serão descritas a seguir.

4.3.3 NORMA ISO 2372, VDI2056 E B54675

A VDI2056 é norma alemã com base nos trabalhos de Rathbone. A norma ISO 2372 é baseada na VDI2056, ambas dividem as máquinas na seguinte classe:

- Classe I – máquinas pequenas, com acionamento por motor elétrico diretamente acoplado, potência máxima de 15kW.
- Classe II – máquinas médias, do tipo Classe I, com potência maior que 15kW, até 75kW. Motores ou máquinas montadas rigidamente até 300kW.
- Classe III – Máquinas motrizes grandes e outras máquinas grandes (>75kW), com massas rotativas montadas sobre fundações rígidas e pesadas.

- Classe IV – máquinas do tipo Classe III, montadas sobre fundações relativamente flexíveis.

A tabela 4.1 apresenta a escala publicada na NBR 10082, baseada na norma ISO 2372/74, segundo a qual a severidade de vibração é classificada em 15 faixas.

Tabela 4.1 – Severidade de vibração definida pela NBR 10082 para as diversas classes de máquinas.

Velocidade *RMS* (mm/s)	Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV
0,28	A	A	A	A
0,45				
0,71				
1,12	B			
1,8		B	B	B
2,8	C			
4,5		C	C	C
7,1	D			
11,2		D	D	D
18				
28				
45				

Os limites propostos pela ISO 2372, VDI2056 e B54675 são dados pela carta de severidade abaixo:

Figura 4.3 – Carta de severidade segundo as normas ISO 2372, VDI2056 e B54675.

4.3.4 GRÁFICO DE SEVERIDADE DE VIBRAÇÕES FUPAI

A FUPAI – Fundação de Pesquisa e Assessoramento à Industria, possui também um gráfico de referência que pode ser utilizada para o monitoramento de vibração. Pode ser utilizada para definir níveis aceitáveis ou não de vibrações para: motores elétricos, bombas, ventiladores, exaustores, compressores rotativos, turbinas, entre outros. Neste caso, as máquinas não são divididas em classes somente em níveis de vibração conforme segue abaixo:

- A – máquinas novas ou sem defeitos;
- B – máquinas com pequenos problemas;
- C – máquinas com defeito (**corrigir**);
- D – a falha está próxima (**corrigir com urgência**);
- E – perigo (**parada imediata**).

A figura 4.4 apresenta o gráfico de severidade de vibrações FUPAI.

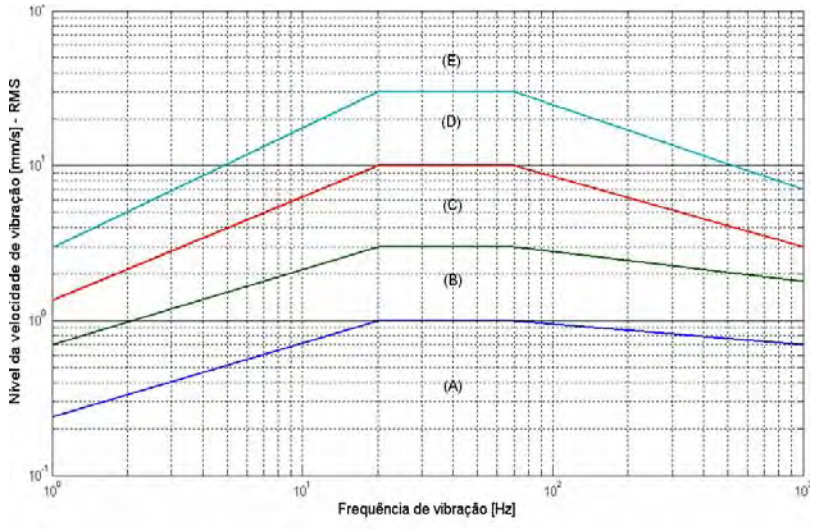


Figura 4.4 – Carta de severidade FUPAI

Para redutores a FUPAI utiliza o seguinte gráfico:

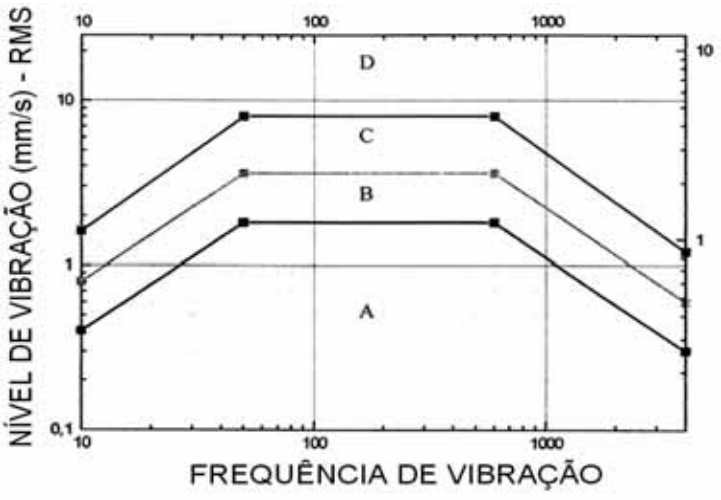


Figura 4.5 – Gráfico Fupai de severidade de vibração para redutores.

Sendo que:

- Nível A – engrenagens sem defeitos (nível ótimo);
- Nível B – engrenagens com pequenos defeitos (nível tolerável);
- Nível C – engrenagens com defeitos (nível permissível);
- Nível D – engrenagens em perigo (parada imediata, corrigir com urgência – nível em alarme).

4.3.5 OSCILAÇÃO DO EIXO.

Existem casos em que a velocidade *RMS* de vibração não é adequada para estimar a severidade vibratória de uma determinada máquina. Essas máquinas geralmente possuem velocidade angular baixa, sistema mancal-eixo-rotor relativamente flexível e/ou rotores relativamente pesados se comparado com sua estrutura.

Da mesma maneira que a medida absoluta da vibração a oscilação do eixo também é objeto de normatização de órgãos internacionais como medida de severidade de vibração, logo, pode ser utilizada como parâmetro para monitoração do equipamento, tais como:

- Variações do comportamento vibratório da máquina;

- Evolução da folga radial do mancal;
- Presença de carga cinética excessiva.

Considerando-se que o sinal seja obtido simultaneamente por dois transdutores montados em um mesmo plano a 90° um do outro no sentido de rotação do eixo conforme ilustrado na figura 4.6.

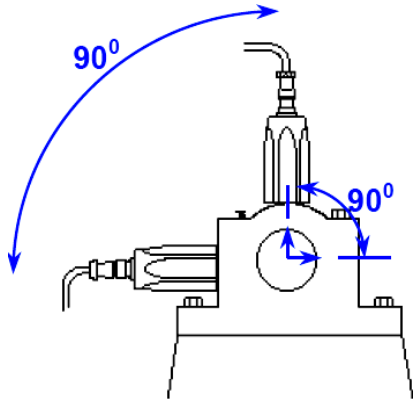


Figura 4.6 - Esquema Ilustrativo da montagem de sensores indutivos para calcular o valor pico-a-pico, amplitude máxima ou amplitude máxima instantânea.

Existem três formas de calcular o parâmetro amplitude, são eles:

Amplitude máxima instantânea.

$$S(t) = \sqrt{[S_1(t)]^2 + [S_2(t)]^2} \tag{4.6}$$

Máximo valor pico a pico.

$$S_{(p-p)\max} = máximo\left(S_{1(p-p)}; S_{2(p-p)}\right) \tag{4.7}$$

Valor resultante pico a pico.

$$S_{(p-p)\max} = \sqrt{S_{1(p-p)}^2 + S_{2(p-p)}^2} \tag{4.8}$$

Assim como para o caso da velocidade eficaz, as normas internacionais publicam, a título de recomendação, cartas de severidade de vibração baseadas nos valores da

amplitude máxima e pico-pico máxima, onde se identifica os níveis referentes a máquina em boas condições, aceitável, limite tolerável e não-permissível, para medições realizadas com as máquinas trabalhando nas suas condições nominais de operação e com temperaturas de óleo dos mancais estabilizadas (ARATO, 2004).

4.3.6 CARTA DE SEVERIDADE DE VIBRAÇÃO DA OSCILAÇÃO DO EIXO SEGUNDO A NORMA ISO 7919-5

A figura 4.7 traz um exemplo de uma carta de amplitude máxima, no caso publicada pela ISO 7919-5 (1997). É interessante observar que os limites de cada faixa de severidade são estabelecidos apenas com base na rotação nominal da máquina.

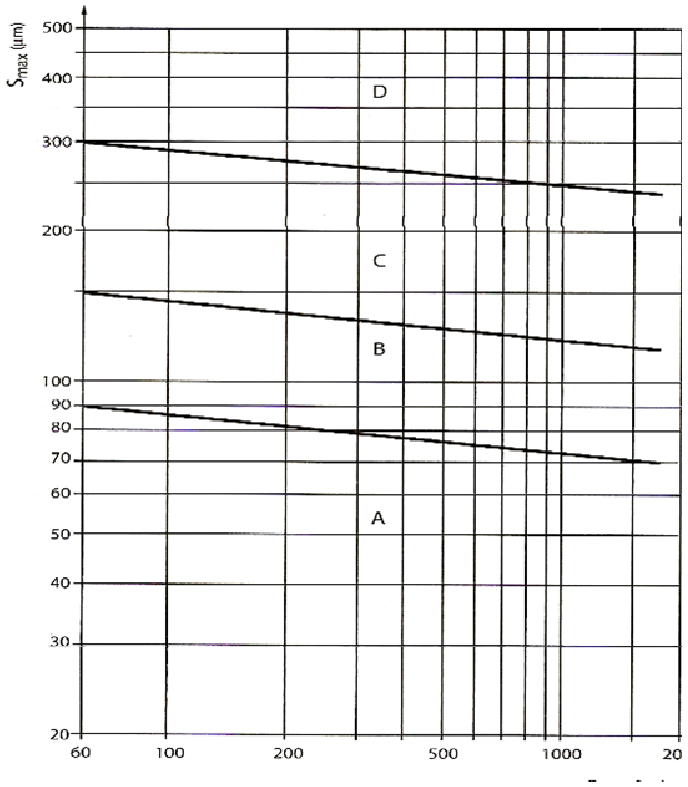


Figura 4.7 - Carta de amplitude máxima segundo a ISO 7919-5

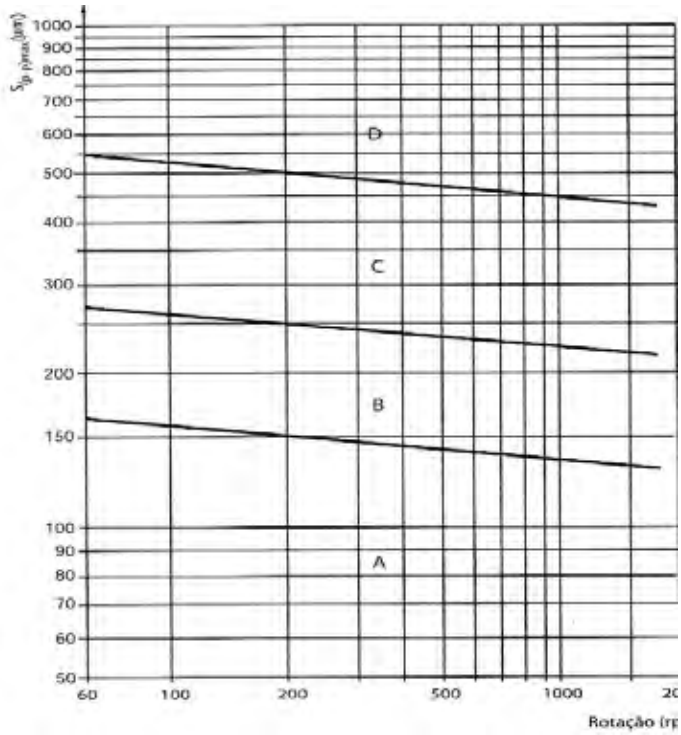


Figura 4.8 – Carta de valor pico a pico segundo a norma ISO 7919-5.

Tanto o método da velocidade *RMS* quanto o da oscilação do eixo são bastante confiáveis e de baixo custo se comparados com outros métodos de manutenção preditiva. O único inconveniente desta técnica é a impossibilidade de diagnóstico da origem da falha que provoca o aumento da severidade de vibração.

4.3.7 CARTA DE RATHBONE.

Em novembro de 1939 T. C. Rathbone publicou na revista Power Plant Engineering, a carta de severidade, um dos primeiros trabalhos sobre avaliação de vibração (ALMEIDA; GOZ; ALMEIDA, 2007).

A chamada carta de Rathbone foi criada para avaliar vibrações com freqüências de até 6.000rpm medidas nos mancais e filtradas. Isto quer dizer que não se podem usar vibrações em eixos nem valores de banda larga. A carta de Rathbone é muito usada como referência nos trabalhos de avaliação de vibração (ALMEIDA, GOZ & ALMEIDA, 2007).

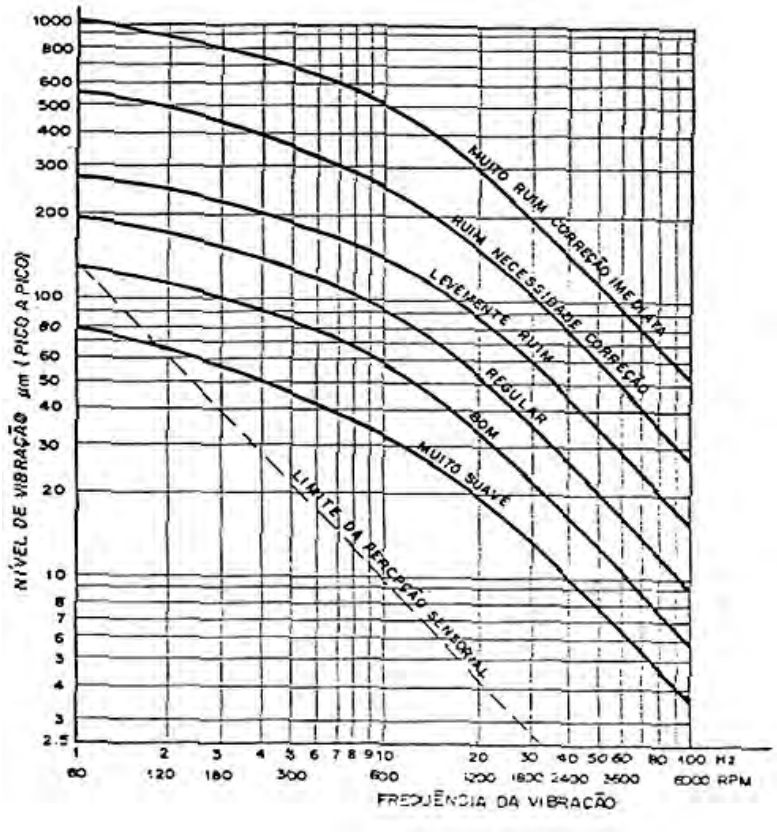


Figura 4.9 – Carta de Rathbone.

4.3.8 CARTA DE SEVERIDADE DA IRD

Outra referência é a carta da IRD, para valores filtrados medidos nas carcaças de mancais, com maior aplicação na avaliação de desbalanceamento e desalinhamento (ALMEIDA; GOZ; ALMEIDA, 2007). Essa carta foi publicada no ano de 1964 como base de medida de severidade de vibração.

A era atual da análise de vibração começou em 1950 quando *Art Crawford*, até então um estudante de graduação, hoje um respeitado gigante da indústria, aceitou um desafio de descobrir um parâmetro para a confiabilidade do balanceamento de máquinas rotativas de alta velocidade. Foi então que surgiu a IRD que significa *International Research and Development* cujo objetivo principal era a pesquisa e desenvolvimento de métodos aplicados na área de vibração e diagnóstico.

A análise da severidade de vibração pela IRD requer que um filtro, ou *trigger* seja usado para obter um sinal cujo número de pontos por bloco defina uma revolução completa

do eixo da máquina. Desta forma tanto o valor pico a pico quanto a velocidade podem ser usados como normas visando a classificação de condição do funcionamento do equipamento.

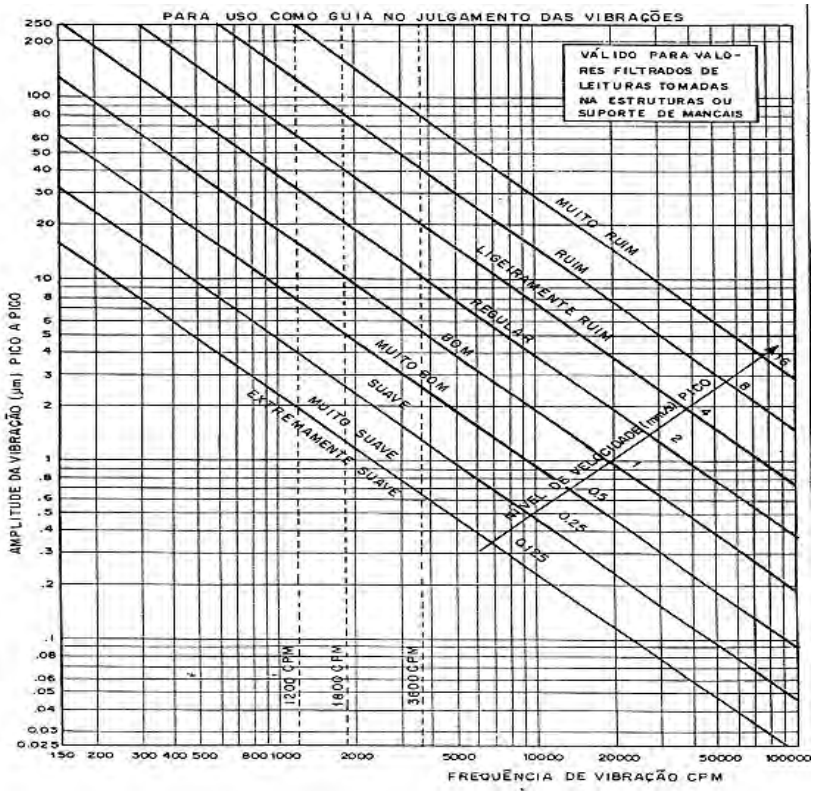


Figura 4.10 – Carta de severidade IRD

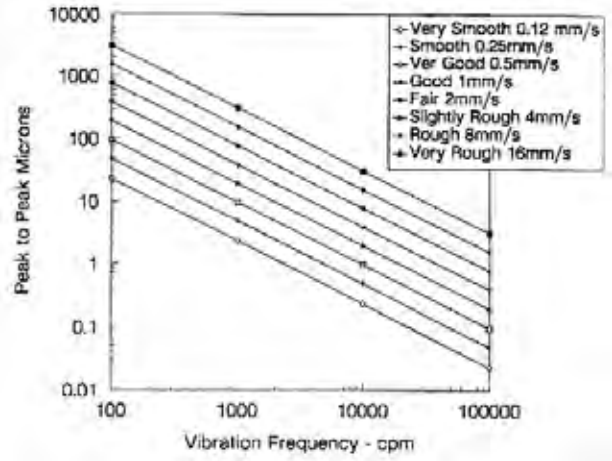


Figura 4.11 – Carta de severidade de vibração da IRD em uma visão simplificada.

4.3.9 CARTA DE SEVERIDADE DE BLAKE

Mais recentemente, Mitchel Blake da *Monsanto Chemical Company*, publicou na revista Hydrocarbon Processing and Petroleum Refinery (janeiro/64) a sua carta de severidade. Nela foi criada um conceito de vibração efetiva, o valor medido multiplicado por um fator de serviço a ser definido para cada categoria de máquina (ALMEIDA; GOZ; ALMEIDA, 2007).

Blake dividiu seu gráfico nas seguintes classes:

- AA – perigoso. Parada imediata para evitar acidentes;
- A – Falha próxima. Corrigir dentro de 2 dias para evitar parada total;
- B – com defeito. Corrigir em 10 dias para evitar despesas maiores;
- C – Pequenos problemas. Correção desperdiça custos;
- D – Sem defeitos. Tipicamente máquinas novas.

Os fatores de serviço criados por Blake são:

Tabela 4.2 - Fatores de serviço de Blake

FATORES DE SERVIÇO DE BLAKE	
Bombas de 1 estágio, motor elétrico, ventilador	1
Equipamento típico de processamento químico, não crítico	1
Turbina, turbo-gerador, compressor centrífugo	1,6
Eixo rígido de centrífuga, bomba centrífuga multi-estágio	2
Diversos equipamentos – características desconhecidas	2
Centrífuga eixo suspenso, no eixo próximo mancal	0,5
Centrífuga suspensa	0,3

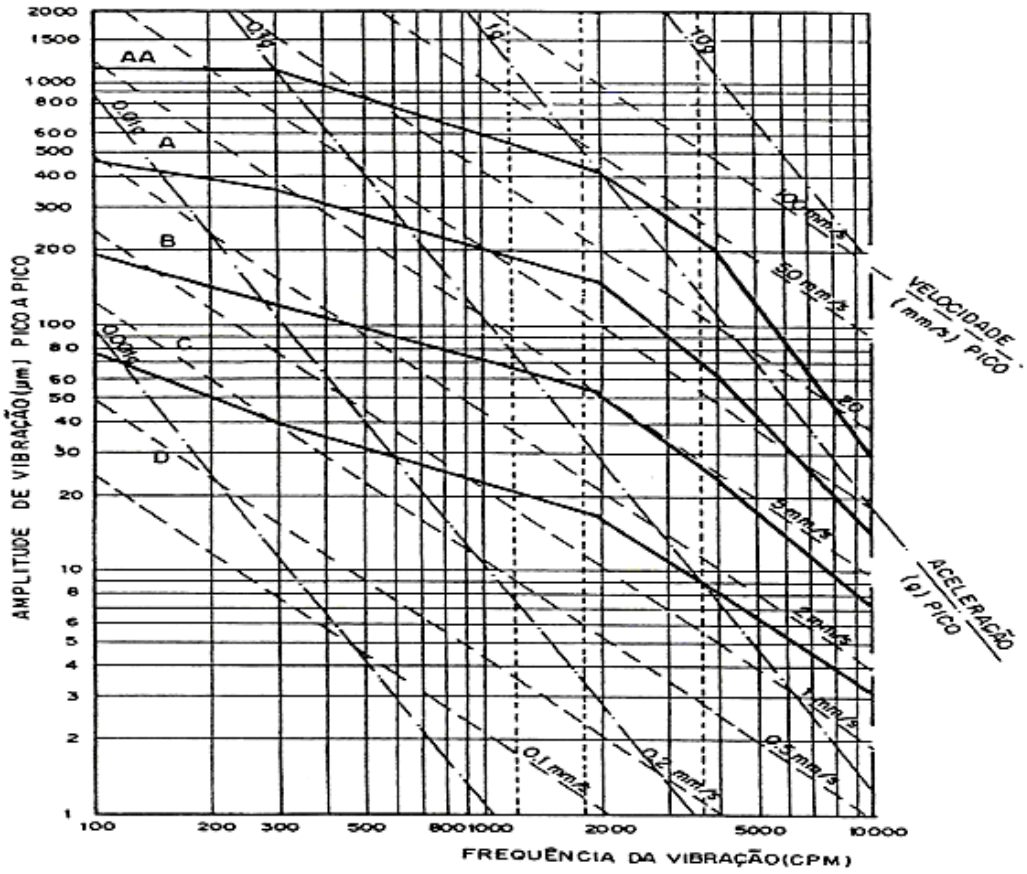


Figura 4.12 – Carta de severidade de vibração de Blake.

4.4 ESPECTRO DAS VIBRAÇÕES.

Como mencionado no tópico anterior, existe a impossibilidade de detecção da falha somente por intermédio da monitoração do valor global de severidade de vibração, sendo necessária uma inspeção geral o equipamento, isto é, faz-se necessária a desmontagem da máquina para que o dano seja encontrado e posteriormente o diagnóstico seja feito.

Uma solução não intrusiva para o problema da identificação do defeito que provoca o aumento de severidade pode ser obtida a partir da observação de que as vibrações de uma máquina ou equipamento qualquer são constituídas por um conjunto de vibrações de várias freqüências, cada uma delas originadas por um determinado componente. Normalmente as forças dinâmicas decorrentes do funcionamento e as irregularidades que provocam essas vibrações estão relacionadas com a rotação do equipamento e dos seus componentes,

consequentemente, à mesma freqüência deles. A figura 4.13 ilustra de forma simplificada as várias fontes de vibrações que ocorrem em um determinado equipamento industrial, juntamente com suas freqüências e amplitudes relativas (ARATO, 2004).

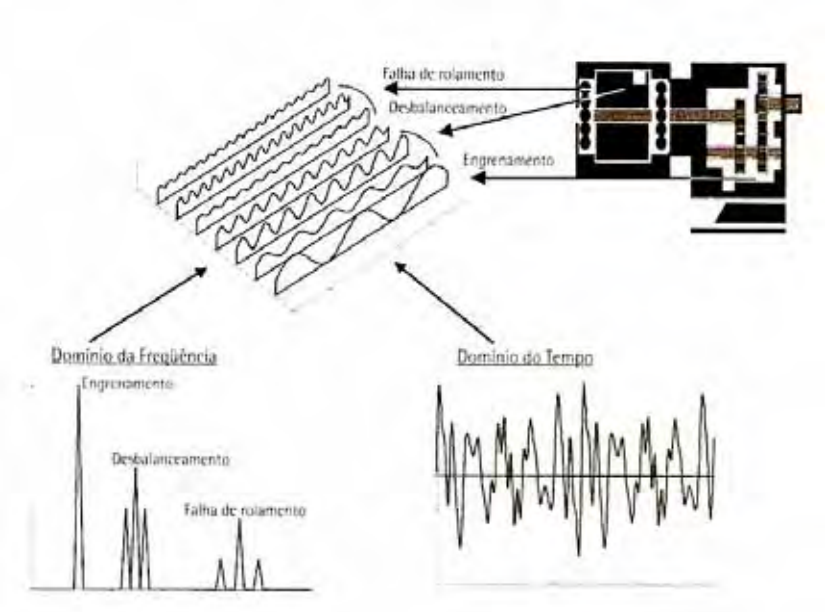


Figura 4.13 – As diversas formas de vibrações discretizadas e não discretizadas no domínio do tempo e a representação gráfica das amplitudes de cada fonte no domínio da freqüência, o espectro de vibração.

O gráfico obtido no domínio da freqüência é denominado espectro da freqüência do sinal. O espectro de freqüência é a representação gráfica das freqüências que compõe o sinal bem como as amplitudes relacionadas com cada uma, isto é, cada freqüência terá somente uma amplitude relacionada com a mesma. No espectro as freqüências são definidas nas abscissas em escala linear ou logarítmica e as amplitudes são plotadas nas ordenadas. O espectro mostra as fontes individuais de ruídos em suas freqüências distintas e a amplitude relacionada com cada uma.

Atualmente, devido aos avanços da velocidade de processamento e extraordinário barateamento dos microcomputadores e processadores digitais, praticamente todos os equipamentos utilizados na análise de sinais obtém o espectro de vibrações numericamente com o emprego de um algoritmo conhecido por *FFT*, ou do inglês, *Fast Fourier Transform*. No entanto, ainda existem alguns equipamentos que possuem filtros do tipo passa-banda reguláveis, permitindo uma análise com construção de um espectro de

vibrações simplificado de forma muito rápida e com baixíssimo custo, perfeitamente aplicável para equipamentos mais simples (ARATO, 2004).

A Transformada Rápida de Fourier é um algorítimo ou procedimento de cálculo utilizado para obter a transformada discreta de fourier (DFT – *Discrete Fourier Transform*) com uma grande redução do número de pontos nas operações aritméticas se comparada com a aplicação do método direto. Desde a sua primeira publicação em 1965 ela tem revolucionado o campo da análise de sinais e ainda é uma das mais importantes técnicas disponíveis (RANDALL, 1987).

Existem outros métodos de se obter a *FFT* os quais se pode citar: filtros de faixa constante e filtros de faixa proporcional ou numericamente com o uso da *FFT*, mas o que interessa em todos os casos citados anteriormente é o resultando final que eles proporcionam, isto é, haverá na abscissa um número finito de freqüências cujas amplitudes relacionadas a cada uma é apresentada na ordenada podendo-se assim visualizar as freqüências existentes em um determinado sinal bem como identificar as mais influentes devido o aparecimento de amplitudes mais discrepantes que outras.

Este método permite um diagnóstico preciso do defeito presente no equipamento, é uma ferramenta confiável, de fácil interpretação de dados (desde que o usuário tenha experiência e as principais freqüências de funcionamento e fontes de ruído), alem de um menor tempo despendido para análise e planejamento de paradas. A deficiência deste método é que se trata fundamentalmente de uma análise visual, exigindo que o usuário observe atentamente o espectro, comparando resultados obtidos para direções de medidas diferentes, pontos diferentes, padrões existentes, espectro anteriores do mesmo equipamento, caso existam, e ainda, procurando combinações lineares de freqüência do tipo (ARATO, 2004):

$$f_k = (n_g \cdot f_g) \pm (n_i \cdot f_i) \pm (n_f \cdot f_f) \pm \ldots \tag{4.9}$$

Os problemas mais comuns encontrados nessa técnica são o *Leakage* e *Aliasing*. O primeiro defeito é relacionado com o corte do sinal interferindo no espelhamento do mesmo, ou seja, as amostram não completaram um ciclo ocasionando assim o aparecimento de ruídos inexistente no sinal no domínio da freqüência. O defeito de *aliasing* é o aparecimento de freqüências fantasmas, isto é, freqüências inexistentes no

sinal. Ocorre quando um sinal é amostrado a uma taxa menor que a definida pelo teorema de Nyquist, isto é, a freqüência de amostragem deverá ser pelo ao menos duas vezes maior que a maior freqüência do sinal amostrado.

4.5 MÉDIA TEMPORAL SÍNCRONA.

Esta técnica é comumente usada no tratamento inicial do sinal proveniente dos equipamentos que possuam engrenagem ou pares engrenados onde deseja-se a detecção das falhas nesses elementos mecânicos. Basicamente essa técnica consiste na média de vários blocos do sinal amostrado, sendo que cada bloco seja referente a uma revolução completa da engrenagem em estudo sendo os pontos adquiridos sempre na mesma posição angular conforme mostra a figura 4.14.

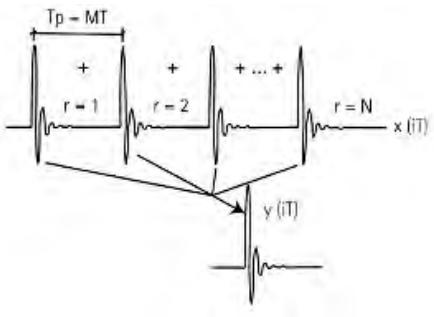


Figura 4.14 – Esquema de obtenção da média temporal síncrona.

O sinal resultante desse processo é constituído principalmente por componentes relacionados às fontes de ruído cujas freqüências são múltiplas do giro do eixo, tais como suas harmônicas, freqüência de engrenamento e harmônica dessas (ARATO, 2004).

A forma de média temporal síncrona mais eficiente é denominada temporal ou recursiva onde cada bloco possui o mesmo tamanho e um número finito de pontos. A média temporal é obtida pelo cálculo do resíduo ponderado para cada novo bloco calculado e acrescentado neste a média atual de acordo com a equação 4.10:

$$y_r(iT) = y_{r-1}(iT) + \frac{x_r(iT) - y_{r-1}(iT)}{r} \tag{4.10}$$

Onde:

y(iT): média temporal síncrona;

x(iT): bloco original;

r: número do bloco.

Método de fácil análise de falhas, mas possui o limitante (em casos onde não existam programas que façam a média temporal), de que é a necessidade da utilização de algum dispositivo que permita o controle da aquisição, de modo que cada bloco do sinal adquirido seja iniciado no mesmo ponto da engrenagem, quando seu eixo estiver em uma dada posição angular (ARATO, 2004). Uma forma de se obter a mesma posição angular da engrenagem é utilizando um *trigger* do tipo óptico ou a lazer.

4.6 DIAGRAMAS DE ÓRBITA

Quando o problema é analisar o comportamento de máquinas de grande porte com eixos sustentados por mancais de deslizamento e girando em baixas rotações, torna-se interessante a identificação da forma como o eixo está girando dentro do mancal. Para isso, são utilizados os diagramas de órbita (ARATO, 2004).

Para a confecção desse diagrama faz-se necessário o uso de dois transdutores de deslocamento sem contato montados no mesmo plano e defasados entre si em um ângulo de 90^o. Os sinais são adquiridos simultaneamente e plotados em um gráfico cartesiano onde a amplitude do sinal adquirido do sensor 1 é marcado no eixo das abscissas e os pontos referentes ao sinal do sensor 2 são marcados no eixo das ordenadas. É necessário o uso do *trigger*. A figura 4.15 exemplifica o esquema de montagem para a realização das medidas.

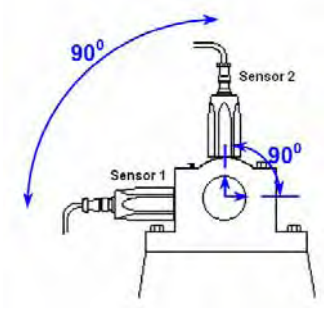


Figura 4.15 – Esquema da montagem dos sensores indutivos para análise do diagrama de órbita

Na figura 4.16 e 4.17 é apresentado o resultado do diagrama de órbita, onde os sinais referentes aos sensores S1 e S2 são senóides perfeitas de amplitudes iguais e defasadas 90^{o}.

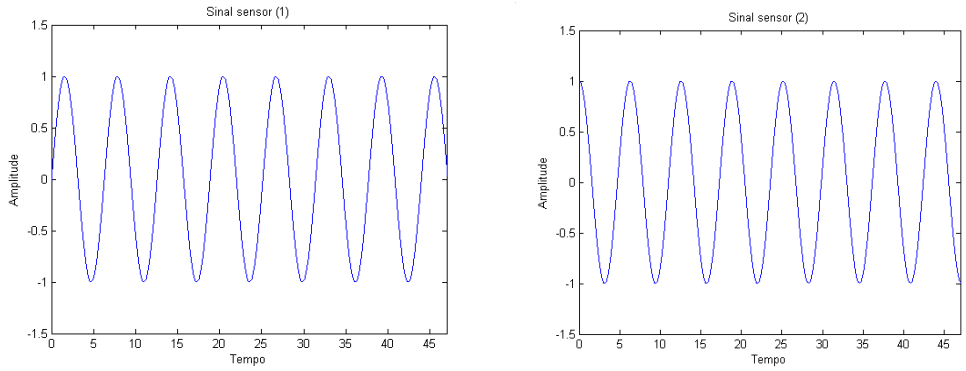


Figura 4.16 – Sinais senoidais defasados simulando aquisição de sinais no sensor 1 e 2 respectivamente.

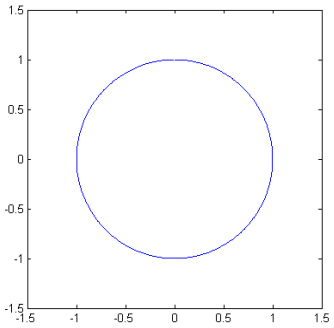


Figura 4.17 – Diagrama de Órbita dos sinais senoidais descritos acima.

4.7 DEMODULAÇÃO.

Alguns defeitos de sistemas mecânicos, em vez de excitar a estrutura da máquina com forças periódicas, geram uma série de pequenos impactos repetidos de forma regular, como o caso de defeitos em rolamentos e *pitting* em pares engrenados (ARATO, 2004).

Esses impactos repetidos não são uma fonte de ruído periódica, portanto não podem ser localizados diretamente como uma freqüência no espectro do sinal. No entanto, mesmo em sua fase inicial com pouca energia, esses impactos repetidos consecutivamente vão excitar a estrutura do sistema eixo-mancal acarretando o aumento do nível de vibrações das suas freqüências de ressonância. Portanto, uma forma de identificar a presença de um

defeito deste tipo é monitorar o aumento do nível de vibrações na banda de ressonância estrutural da máquina (ARATO, 2004).

O aparecimento de novas freqüências no espectro em faixas que possam ser identificadas como ressonância não permite a identificação direta da fonte excitadora das mesmas, que poderá ser tanto da dinâmica do funcionamento normal da máquina quanto fontes externas que afetam o sinal. Uma maneira de identificar qual fonte que provoca essa ressonância se faz pela aplicação da técnica denominada demodulação em amplitude.

Por generalização, a modulação em amplitude de um sinal é definida como a multiplicação de um sinal por outro, constituindo-se um processo inerente não linear que gera novas freqüências que não estão presentes em nenhum dos sinais envolvidos diferindo, assim, da adição ou da mixagem de dois ou mais sinais, pois estes processos apresentam apenas freqüências que estão contidas no sinal (SILVA, 2001).

O processo de demodulação consiste na identificação da onda moduladora de um sinal modulado. A modulação em amplitude é um fenômeno pelo qual um sinal periódico de freqüência mais alta é modificado por um sinal de freqüência mais baixa, de modo que o sinal de alta freqüência tem sua distribuição de amplitudes alterada segundo a forma de onda do sinal de menor freqüência (ARATO, 2004).

O envelope deste sinal, que é o objetivo do processo de demodulação, é o contorno gerado pelos picos das amplitudes do sinal modulado. O processo de obtenção deste envelope, que representa a demodulação do sinal, pode ser feito diretamente, com a aplicação de uma rotina computacional que identifique os picos da parte positiva do sinal e construa um vetor contendo apenas estes picos. O envelope do sinal também pode ser obtido por um processo numérico de análise, com a aplicação da transformada de Hilbert (ARATO, 2004).

4.8 MISCELÂNEA DE OUTRAS TÉCNICAS

Outras técnicas para a quantificação e qualificação de falhas utilizando técnicas preditivas por análise de vibração podem ser utilizadas. Neste tópico não será descrito sucintamente cada técnica e sim somente será dada uma pequena explanação visando um conhecimento geral destas técnicas já que as mesmas são utilizadas em máquinas rotativas.

Análise estatística de dados pode ser feita por meio de momentos estatísticos como o de primeira ordem (média do sinal), segunda ordem (variância), terceiro momento (*Skewness*) e quarto momento (*Kurtosis*). Todos são muito aplicados na monitoração de pares engrenados (redutores e multiplicadores de engrenagem).

Para suprir a inadequação da *FFT* para sinais não estacionários, isto é, sinais que possam conter freqüências instantâneas, utilizam-se algoritmos computacionais no domínio do tempo e freqüência como a Transformada Curta de Fourier (*STFT – Short Time Fourier Transform*) e distribuições energéticas Wigner – Ville e Pseudo Wigner-Ville.

A *STFT* introduz uma escala e analisa o sinal do ponto de vista dela, se algum defeito ocorre fora dela este não poderá ser detectado. Para isso utiliza-se a Transformada de Wavelet. Esta ultima não utiliza uma escala fixa e sim uma escala definida pela largura da função moduladora devido o fato de tal função não possuir escala fixa e que seja localizada no tempo.

CAPÍTULO 5

PRINCIPAIS FALHAS EM UNIDADES GERADORAS DE ENERGIA E SEUS DIAGNÓSTICOS

Neste tópico se discutirá as principais falhas que grupos geradores hidráulicos podem apresentar, por que elas ocorrem e como eles refletem no comportamento vibratório das máquinas.

A função da engenharia da manutenção usando monitoração da condição de uma máquina é similar aos procedimentos médicos feitos para monitorar e identificar problemas de saúde que o ser humano possa ter. Por esta similaridade que a manutenção preditiva ou monitoração da condição das máquinas é chamada na língua inglesa de "*condition health monitoring"* (condição da monitoração da saúde das máquinas). A engenharia de manutenção de máquinas tem cuidados similares com as máquinas se comparadas com as ações que o médico tem com seus pacientes, visando um bom funcionamento e condições dinâmicas de operação por todo o período de utilização.

De maneira geral o funcionamento das máquinas gera forças internadas com amplitudes variáveis devido ao ciclo de movimento de seus componentes. A freqüência com que esta amplitude se repete é igual a freqüência de operação da peça. O aparecimento ou presença de falha se dá pela geração de forças ou por mudanças nas forças geradas devido o funcionamento normal da máquina. Algumas falhas e.g. desbalanceamento, são

comuns em máquinas rotativas. Outras excitações, e.g. forças de engrenamento, são características únicas de um dispositivo em particular. Esses vários tipos de excitações são normais para todos os elementos móveis e eles formam uma significante porção de parâmetros que indicam o comportamento de uma específica parte do equipamento.

Quando as forças responsáveis pelas excitações aumentam além do normal ou excedem limites, este fato é geralmente ocasionado devido à deterioração da integridade do equipamento. Essa mudança física das forças existentes é geralmente detectada como uma mudança nas características das respostas vibratórias da máquina. A fim de prover um diagnóstico com alguns critérios adicionais entre essas relações mecânicas, essas excitações e as falhas resultantes serão examinadas.

Para diagnosticar um problema de vibração em uma máquina é necessário conhecer de imediato a origem e as amplitudes das forças atuantes. Entretanto, a identificação das excitações sugere ser uma área bastante complexa. Normalmente, atuam sobre uma máquina forças de origens distintas e em distintos pontos. Isso se complica ainda mais quando as excitações de diferentes origens atuam em uma mesma freqüência. Por outro lado, tem que se estar muito seguro das características específicas de cada uma delas, de forma que seja possível diferencia-las entre si.

De tudo isso, fica evidente a necessidade de um grande esforço onde análise de medições experimentais em campo, estudos teóricos e simulação numérica do comportamento dinâmicos das máquinas devem ser realizados a fim de identificação e conhecimento da origem de tais freqüências, bem como suas amplitudes (NASCIMENTO, 1995).

5.1 DIVISÃO GERAL DAS FALHAS APRESENTADAS POR UNIDADES HIDROELÉTRICAS

As fontes excitadoras de máquinas hidroelétricas podem ter origem mecânica, hidráulica, elétrica e magnética. As forças de excitação mecânica mais comuns têm origem devido as seguintes falhas:

- Desbalanceamento de massas rotativas;
- Desalinhamento;

- Vibrações auto-excitadas;
- Defeitos nas engrenagens do multiplicador

Para as excitações de origem hidráulica, se o sistema estiver em sua faixa operacional normal e sob condições de regime permanente, componentes periódicas hidráulicas cujas possuem freqüências relacionadas com a rotação da turbina. Para condições transientes e quando a máquina trabalha fora de sua faixa operacional normal, as componentes estocásticas tornam-se dominantes, onde nota-se no espectro de vibração uma larga banda de freqüências e amplitudes flutuantes sendo que os valores máximos se encontram próximas a freqüência de rotação da turbina. Pode-se citar como fontes de excitação hidráulica:

- Não uniformidade do fluxo e formação de vórtices pela passagem do mesmo pela turbina;
- Cavitação;
- Vibrações provenientes da interação entre o rotor e o difusor do distribuidor;

Em termos de excitações do tipo elétrica e magnética, as freqüências são elevadas e bem definidas, não oferecendo assim grandes riscos para o conjunto girante (NASCIMENTO, 1995). A partir do momento que essas forças alcançam valores significativos, as mesmas poderão afetar e provocar danos nos componentes elétricos do gerador. As excitações elétricas e magnéticas podem ser provenientes de:

- Forças Magnéticas;
- Folgas entre o rotor e o estator;
- Forças de desbalanceamento magnético.

As características construtivas e a funcionalidade têm grande peso sobre as conseqüências de muitos tipos de excitações. Por exemplo, as máquinas que trabalham com quedas d'água e velocidades elevadas, o cuidado com o equilíbrio hidráulico é muito mais importante do que o equilíbrio mecânico (NASCIMENTO, 1995).

5.2. VIBRAÇÕES DEVIDAS EXCITAÇÕES MECÂNICAS

Nas máquinas rotativas em geral as fontes de excitação mecânica principais são o desbalanceamento e desalinhamento, existindo, no entanto, outras fontes menos importantes. Neste tópico serão apresentadas as principais fontes excitadoras de origem mecânica, bem como seus mecanismos de propagação e como detecta-los utilizando análise de vibrações clássicas.

5.2.1 DESBALANCEAMENTO DE MASSA ROTATIVAS

Rotor desbalanceado é um dos maiores problemas encontrados em várias máquinas rotativas. Um rotor está em ótimas condições de balanceamento quando seu eixo de giro coincide com o seu eixo principal de inércia, logo, o desbalanceamento se da pela distribuição desigual de massa em torno do eixo de giro do rotor. É impossível eliminar o fenômeno desbalanceamento de uma máquina devido a características e limitações dos métodos construtivos, mas é aceitável até certo grau que recebe a denominação de desbalanceamento residual, e para ele existem várias normas que o define. As principais causas do desbalanceamento são mostradas na tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Principais fontes de desbalanceamento

Causa do desbalanceamento	Características observadas	Freqüência de vibração
1. Componentes excêntricos no eixo	Detectado em baixas rotações	Freqüência de giro é a mais significativa
2. Excentricidades devido aos processos de manufatura do eixo	Falta de medida de simetria	Freqüência de giro é a mais significativa
3. Distorção do eixo devido a variações de temperatura ou tensões	Detectado em Baixas rotações. Geralmente com altos níveis de vibração durante o funcionamento.	Freqüência de giro é a mais significativa
4. Acumulo de material nas pás da turbina	Vibrações nos mancais.	Freqüência de giro é a mais significativa
5. Não homogeneidade dos componentes da estrutura	Material do eixo, rotor, entre outros, não homogêneo.	Freqüência de giro é a mais significativa
6. Processo de cavitação das pás não uniforme	Vibração dos mancais.	Freqüência de giro é a mais significativa
7. Variação da rigidez em diferentes partes do eixo.	Excitação em altas freqüências múltiplas da freqüência de rotação.	Freqüência de giro e suas elevadas harmônicas se tornam significativas
8. Quebra de parte da pá da turbina	Vibração dos mancais é observada durante o funcionamento da máquina	Freqüência de giro é a mais significativa, pulsos podem ser observados.
9. Pólos do gerador não fixados rigidamente.	Vibração devido a forças centrifuga de massas desbalanceadas.	Freqüência de giro é a mais significativa

Os componentes de máquinas hidroelétricas que podem estar desbalanceados são: o eixo vertical e os rotores que constituem a turbina hidráulica e o gerador. Estes desbalanceamentos são resultados de defeitos de projeto, fabricação, montagem e manutenção da máquina.

Pôde-se notar na tabela 5.1 que geralmente o desbalanceamento é identificado predominantemente pela freqüência fundamental de giro no domínio da freqüência sendo que as amplitudes de suas harmônicas possuem energia vibratória bem menor que a fundamental. De modo geral, pode-se observar o aparecimento do defeito de desbalanceamento puro pelo aparecimento de uma elevada amplitude na freqüência fundamental de giro (1xff), ou seja, na velocidade de rotação da máquina devido a força rotativa gerada pela massa desbalanceada. Em casos de elevado desbalanceamento freqüências múltiplas da freqüência fundamental de giro chamadas harmônicas também poderão ser notadas no espectro de vibração. Aparecerão pequenos picos na segunda (2xff), terceira (3xff) e quarta harmônica (4xff).

No sinal do tempo se verão predominantemente harmônicas. A resposta será proporcional a soma do desbalanceamento residual do sistema. Como condição de deterioração, a excentricidade aumenta e a amplitude de vibração também aumenta.

O sinal no domínio do tempo devido a um rotor desbalanceado é mostrado na figura 5.1. Essa é uma condição idealizada que no domínio da freqüência pode-se ter apenas um componente em uma revolução completa conforme mostra a figura 5.2.

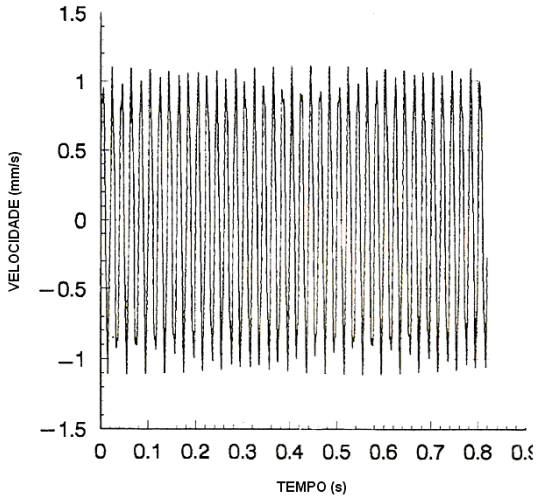


Figura 5.1 – Sinal desbalanceado no domínio do tempo.

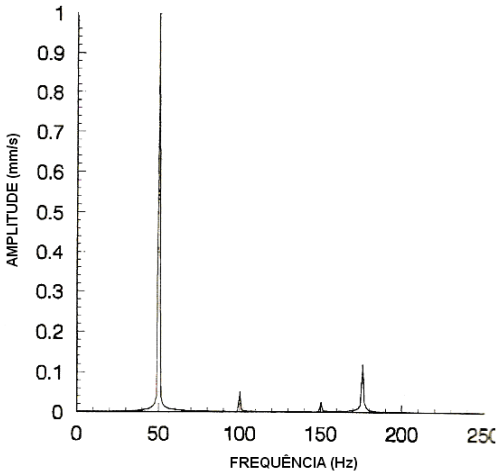


Figura 5.2 – Sinal desbalanceado no domínio da freqüência.

Segundo a norma ISO 1925 existem 4 tipos de desbalanceamento, que são: desbalanceamento estático, acoplado, quase-estático e dinâmico.

O que define o desbalanceamento estático é a existência de uma massa desequilibrada sobre o plano que é perpendicular ao eixo de giro do rotor e que passa pelo centro de massa. Dessa forma o eixo principal de inércia e o eixo de giro da máquina estarão afastados, mas paralelos entre si conforme ilustrado na figura 5.3. Geralmente as vibrações ocorrem nos mancais sendo estáveis e em fase. Este defeito pode ser corrigido pela adição de uma massa ou massas de correção em um único plano que passa pelo centro de gravidade do rotor.

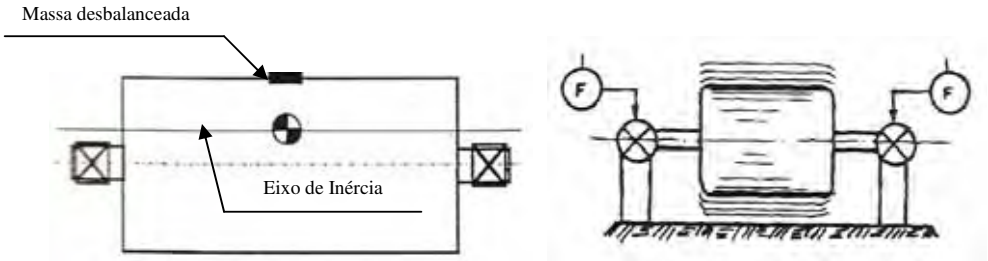


Figura 5.3 – Esquema do desbalanceamento estático.

Para que ocorra um desbalanceamento acoplado é necessário que o eixo de giro e o eixo principal de inércia se interceptem no centro de massa do rotor conforme ilustra a figura 5.4. O comportamento vibratório desse tipo de desbalanceamento pode ser descrito como duas massas desequilibradas localizadas diametralmente opostas e em planos distintos do rotor, e que produzem momentos iguais ao redor do centro de massa.

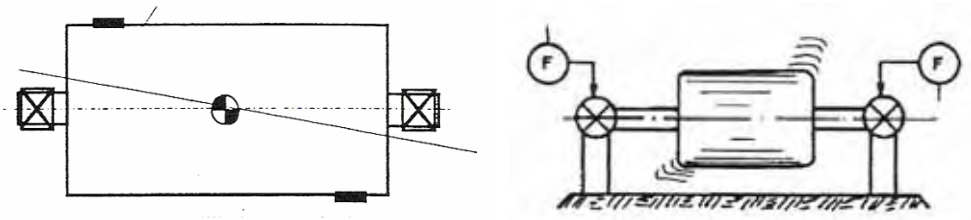


Figura 5.4 – Esquema do desbalanceamento acoplado

O desbalanceamento quase-estático se caracteriza pelo cruzamento do eixo de giro e o eixo principal de inércia em um determinado ponto fora do centro de massa do rotor conforme mostra a figura 5.5. Este desbalanceamento pode ser gerado por uma única massa desequilibrada sobre um ponto qualquer do rotor, porém a um plano que não passa pelo centro de massa.

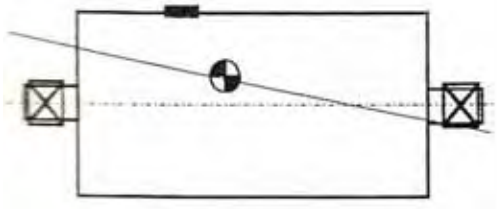


Figura 5.5 – Esquema do desbalanceamento quase-estático

O desequilíbrio dinâmico existe quando se tem massas desequilibradas em mais de um plano do rotor e que não estão localizadas radialmente opostas. Neste caso, o eixo de giro e o eixo principal de inércia não se interceptam, figura 5.6. O desbalanceamento dinâmico é caracterizado por um conjugado de forças, que faz com que os mancais vibrem defasados de 180^{o}. A correção é feita no mínimo em dois planos.

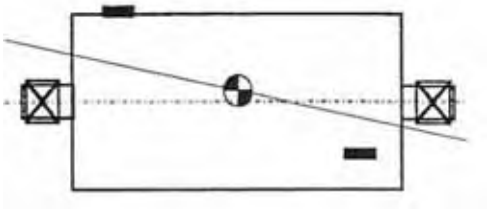


Figura 5.6 – Esquema do desbalanceamento dinâmico.

Em todos os casos de desbalanceamento não existem componentes significativos axiais de vibração, logo se pode notar que as vibrações predominantes são na direção

radial. Se dois sensores forem montados na direção radial, um montado na direção horizontal o outro na vertical (ou em outras duas direções em que os sensores sejam perpendiculares entre si), eles mostrarão as amplitudes predominantes, mas o sensor montado axialmente não mostrará a variação de forças devido a condição de desbalanceamento da máquina.

5.2.2 EIXO EXCENTRICO.

A falha de eixo excêntrico pode ser considerada como um tipo de desbalanceamento, por isso possui o mesmo sintoma do que um rotor desbalanceado, isto é, a vibração devido a este defeito se manifesta sempre na freqüência de rotação do eixo excêntrico produzindo vibrações na direção radial principalmente na freqüência de 1xff, além disso, apresenta amplitude máxima na direção da excentricidade. Esse eixo excêntrico pode ser balanceado e usado novamente sem nenhum problema. O diagnóstico da excentricidade de eixos também pode ser realizado fazendo medidas de fases durante testes de partida e parada do equipamento.

A excentricidade do eixo pode ocorrer de diferentes maneiras. Pode-se notar um eixo excêntrico quando o diâmetro do mesmo possuir variações se comparadas com medidas realizadas da linha de centro até sua superfície ou quando houver deformações no eixo de modo que sua linha de centro e inércia não coincida. A primeira forma de excentricidade se deve ao fato das limitações dos processos de fabricação do eixo. A segunda forma se dá devido a fenômenos térmico onde eixo se dilata e “curva-se” ou, quando a máquina fica parada por um determinado período de tempo e o eixo se deforma devido ao seu peso próprio ou de massas conectadas a ele. Geralmente essa deflexão desaparece quando o eixo é girado em baixa velocidade.

Os rotores de máquinas hidráulicas, tais como turbinas, ventiladores, bombas, entre outros, também sofrem vibração de 1xff devida a excentricidade. Neste caso, a excentricidade produz forças não uniforme entre o rotor e difusor do distribuidor que induzem forças hidráulicas adicionais sobre o rotor. Um aumento da carga (potência) da máquina pode produzir um aumento da amplitude de vibração na 1xff devido à excentricidade. A pesar de responder ao balanceamento, este não será capaz de eliminar por completo o efeito da excentricidade com a máquina operando com cargas elevadas.

5.2.3 DESALINHAMENTO

O desalinhamento é um problema tão comum quanto o desbalanceamento, e a razão é muito simples. Numa montagem mecânica existem vários eixos, mancais e acoplamentos com características dinâmicas diferentes. Todavia com mancais auto-compensadores e acoplamentos flexíveis é difícil alinhar eixos e seus mancais de forma que não existam forças que dão origem a vibração.

O desalinhamento é um defeito não previsto no projeto que se pode introduzir nas máquinas durante sua montagem ou durante a realização de manutenção. Os desalinhamentos podem ser:

- Linear;
- Angular;
- Combinado

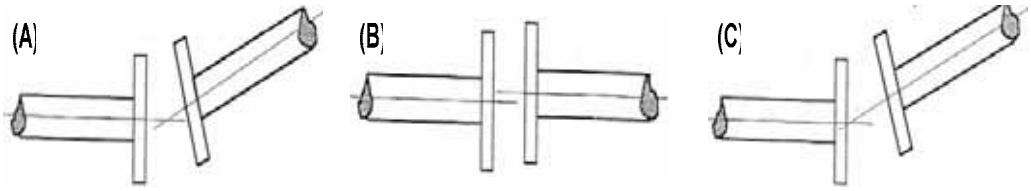


Figura 5.7 – Esquema ilustrativo dos diferentes tipos de desalinhamento: (A) Alinhamento angular; (B) Alinhamento linear; (C) Alinhamento composto.

O desalinhamento angular é caracterizado pelo ângulo formado entre a linha de centro de dois eixos sendo que o maior nível de força produzida se dá na freqüência de 1xff e na direção axial. Para este caso a segunda harmônica e algumas vezes a terceira possuem significativas amplitudes se comparada com a freqüência fundamental de giro. Para uma melhor visualização e entendimento desse fenômeno faz-se uma análise ilustrativa na 5.8. Pode-se notar que durante os giros dos eixos se produz uma componente de força axial com variação de um ciclo. Este conceito pode aplicar-se a uma operação real com acoplamento e, portanto uma vibração axial em uma máquina geralmente indica um desalinhamento angular.

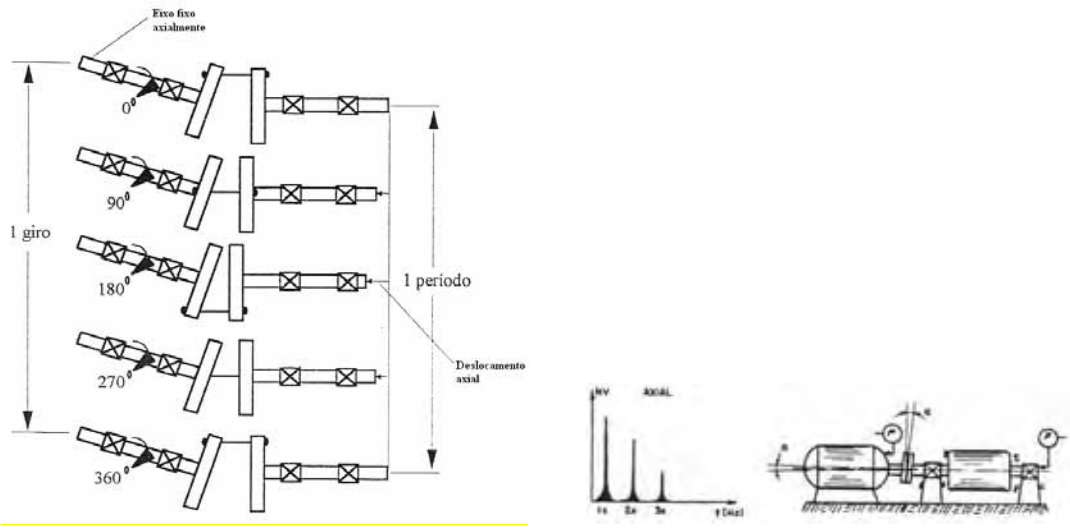


Figura 5.8 – Desalinhamento angular e sua resposta na freqüência

Nota-se um desalinhamento linear quando as linhas de centro dos eixos estiverem paralelas, porém as mesmas estarão defasadas entre si. A amplitude predominante será notada na freqüência da segunda harmônica, sendo que a terceira harmônica também terá amplitude significativa se comparada com a freqüência fundamental de giro. Para um melhor entendimento do fenômeno mecânico provocado por este tipo de desbalanceamento, foi montado esquema ilustrativo na figura 5.9. Pode-se observar que durante o giro do eixo a variação da componente da força radial no ciclo. Isso justifica a aparição da freqüência de 2xff. Entretanto, em um caso real com vários planos, podem-se gerar proporcionalmente freqüências mais elevadas.

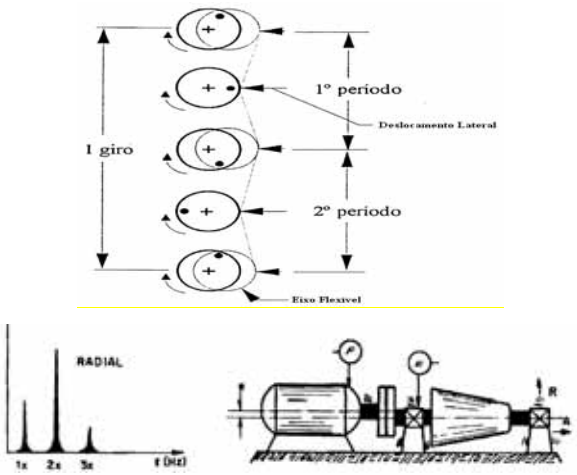


Figura 5.9 – Desalinhamento linear e seu espectro

O desalinhamento composto é talvez a forma de desalinhamento entre eixos que mais se apresenta entre as máquinas. Caracteriza-se pela presença de níveis de vibração radial a uma freqüência de 2 e 3xff e uma componente axial alta de 1xff. Também se pode encontrar um importante pico de vibração axial na freqüência de 2xff (NASCIMENTO, 1995).

Também pode existir desalinhamento entre eixos sem existir acoplamento entre eles. Este defeito é notado em um eixo cujos suportes dos mancais não são colineares, bem como por deslocamento lateral forçando o eixo a uma posição curva (empenado) ou, giro dos mancais em uma montagem mal executada. A figura 5.10 mostra os desalinhamentos dos mancais em relação ao eixo. Se o mancal é de deslizamento não se produz vibração apreciável a menos que também haja um desbalanceamento na máquina. Com o desbalanceamento se apresentam níveis de vibração na 1x ff tanto na direção radial como na direção axial. Na realidade, a causa desta vibração é devida somente ao desbalanceamento, tanto que as amplitudes devido ao desalinhamento dos mancais de deslizamento reduzirão suas amplitudes se parte do desbalanceamento seja eliminado (NASCIMENTO, 1995).

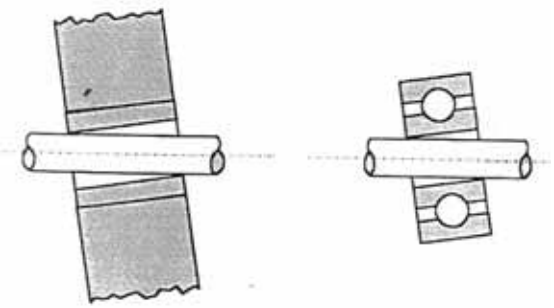


Figura 5.10 – Desalinhamento em mancal de deslizamento e rolamento respectivamente.

Existem casos em que o rolamento está desalinhado com o eixo. Para estes casos pode ocorrer o aparecimento de vibrações na direção axial sem a presença de um desbalanceamento. Neste caso, as freqüências poderão ser de 1, 2 e 3x ff, e podem ocorrer na freqüência igual ao produto do número de esferas do rolamento vezes a freqüência de giro.

Um outro defeito que possui características parecidas ao desalinhamento é o empenamento do eixo. A figura 5.11 mostra as forças que aparecem nos mancais em

conseqüência de um eixo empenado. Este defeito apresenta características similares ao desalinhamento entre eixos e produz alto nível de vibração axial na freqüência de 1x ff.

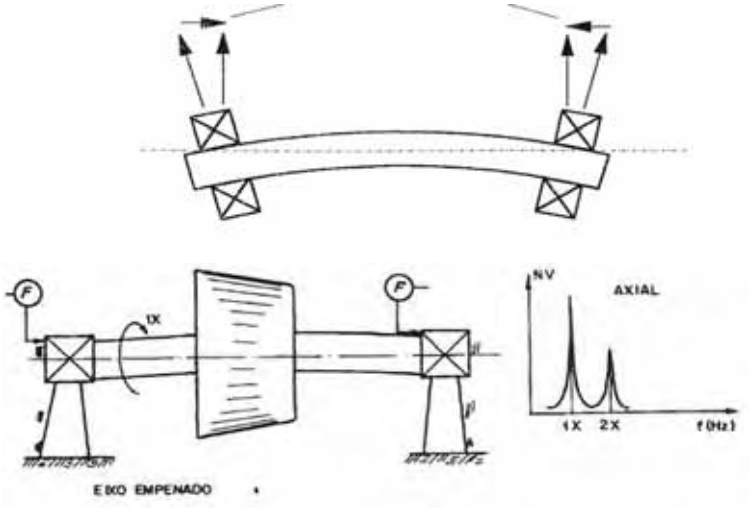


Figura 5.11 – Forças nos mancais devido o defeito de eixo empenado.

Para diferenciar a vibração devida a um desalinhamento entre eixos e um empenamento do eixo deve-se proceder a uma análise de fase adequada. Primeiramente faz-se uma análise preliminar para saber como cada mancal individual se move axialmente. O segundo passo consiste em determinar se os movimentos axiais estão em fase ou em oposição de fase. Tudo isso, levando em conta a rotação da máquina.

Para a verificação do movimento axial do mancal faz-se o uso de vários sensores ou somente um alternando o seu ponto de medição. É necessário pelo ao menos quatro sinais adquiridos em 4 posições perpendiculares entre si, ou seja, entre quatro posições a 90º entre si.

Para o primeiro objetivo é necessário fazer uma medição de fase entre vários sensores montados axialmente em um mesmo mancal. Normalmente se recomenda uma medição entre quatro posições a 90^{o} entre si. A análise indicará uma apreciável diferença de fase entre cada posição ou, indicará praticamente nenhuma diferença de fase entre eles. Nota-se que para este mesmo objetivo, a análise pode ser efetuada em série utilizando somente um sensor e um sinal de referência. A final, se pode obter a mesma resposta se houver uma análise comparativa entre os resultados dos sinais da série de sensores (NASCIMENTO, 1995).

Se existir uma diferença apreciável de fase entre os sinais de cada posição, então é indicativo que o mancal se deforma. Esta deformação dos mancais é geralmente induzida por um eixo empenado. Se os sinais estão praticamente em fase, isso indica que o mancal vibra axialmente de maneira plana. Neste caso ainda não se pode diagnosticar a natureza do problema, e é necessário continuar a análise em outros mancais para um diagnóstico seguro (NASCIMENTO, 1995).

No segundo passo deve-se observar a defasagem axial relativa entre os sinais de direções idênticas de cada mancal. Normalmente, se existe uma grande diferença de fase entre as vibrações dos eixos acoplados entre si, a causa mais provável é o desalinhamento no acoplamento. Se existe diferença excessiva de fases entre os mancais de um mesmo eixo, a máquina deve ser inspecionada para ver se o eixo possui empenamento ou se um mancal está desalinhado. Se esta análise revelar que todos os mancais vibram em fase, o problema pode ser um desbalanceamento devido alguma ressonância da fundação na direção axial da freqüência de rotação da máquina (NASCIMENTO, 1995).

5.2.4 DEFEITOS EM MANCAIS DE DESLIZAMENTO

Os mancais de deslizamento são lubrificados de duas maneiras distintas. São elas:

- Lubrificação natural;
- Lubrificação forçada.

Opta-se pela lubrificação forçada quando os mancais necessitam suportar elevadas cargas e em máquinas com velocidades angulares relativamente baixas.

As principais falhas correlacionadas com mancais de deslizamento são:

- folgas excessivas;
- Lubrificação não adequada;
- Rodopio do óleo comumente chamado pelo o nome em inglês “whril oil”.

Assim mesmo, muitos problemas de vibração em mancais são conseqüentes de cargas não apropriadas sobre ele mesmo. Pode-se então agrupar os problemas nos mancais de deslizamento em duas categorias de defeitos. Na primeira, os defeitos são devido aos

aumentos das folgas entre o eixo e bucha e entre a bucha e a carcaça, causada pelo desgaste das partes. Na outra categoria, os problemas são associados ao comportamento hidrodinâmico do óleo dentro do mancal (NASCIMENTO, 1995).

Para a diagnose dessa falha, faz-se o uso de sensores indutivos, onde se pode obter o deslocamento relativo eixo-mancal. Usa-se também análise no domínio no tempo utilizando a técnica diagrama de órbita.

5.2.4.1 FOLGAS EXCESSIVAS NO MANCAL DE DESLIZAMENTO

Mancais com folgas excessivas têm a sua capacidade de absorção de forças dinâmicas reduzida. A folga excessiva permite que aconteçam maiores vibrações se comparado se a folga estivesse dentro da tolerância de projeto. Por esse motivo busca-se obter a mínimo de desbalanceamento, desalinhamento e outros fenômenos visando diminuir o fenômeno do desgaste no mancal.

Quando começam a apresentar folga excessiva, aparecem sub-harmônicas da rotação do eixo, geralmente na freqüência de 0,5xff e freqüências entre 40 e 60% da freqüência de giro. Com o avanço da folga, apresenta um conjunto de harmônicas da freqüência de giro do eixo, com freqüências de 1x, 2x, 3x, até 10x ou maiores conforme mostrado na figura 5.12. Quando existe atrito, provocam uma resposta ressonante de toda a estrutura na forma de freqüências espalhadas por todo o espectro, com faixas largas, como um ruído (ARATO, 2004).

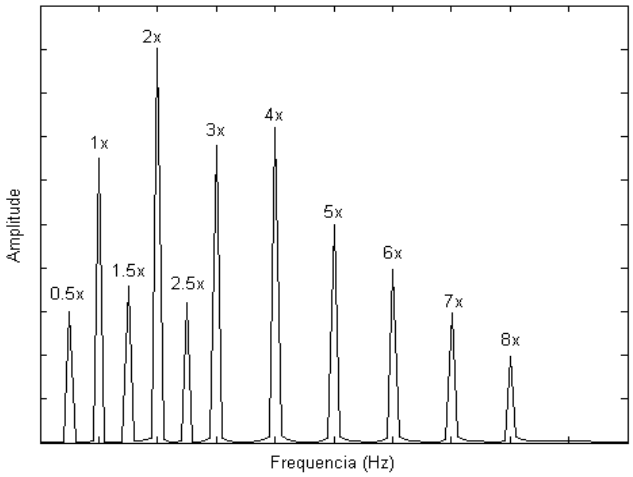


Figura 5.12 – Espectro de freqüência exemplo para o caso de falha por folga no mancal

O desgaste de um mancal de deslizamento pode ser frequentemente monitorado comparando os níveis de vibração horizontal e vertical. Máquinas montadas em estruturas e fundações rígidas, normalmente apresentam maiores amplitudes de vibração na direção horizontal. Por várias vezes, onde a amplitude na direção vertical apareceu maior que a horizontal, o desgaste no mancal de deslizamento foi a principal causa. Assim, um aumento da vibração vertical em relação a horizontal pode ser um indício de folgas em mancais de deslizamento.

5.2.4.2 RODOPIO DO ÓLEO OU ESPIRRO DE ÓLEO (WHRIL OIL)

É uma falha que pode ocorrer em máquinas com mancais de deslizamento funcionando com sistema de lubrificação forçada e com velocidades de rotação relativamente altas (ALMEIDA; GOZ; ALMEIDA, 2007).

A vibração devida ao rodopio é facilmente identificada porque sua freqüência pode ser 3 a 8% menor que a metade da freqüência de rotação do eixo, ou seja, 0,42 a 0,48xff conforme ilustra a figura 5.13. Podem conduzir a danos catastróficos quando a freqüência de rotação do sistema chega a ser aproximadamente o dobro da freqüência natural de flexão do rotor (NASCIMENTO, 1995).

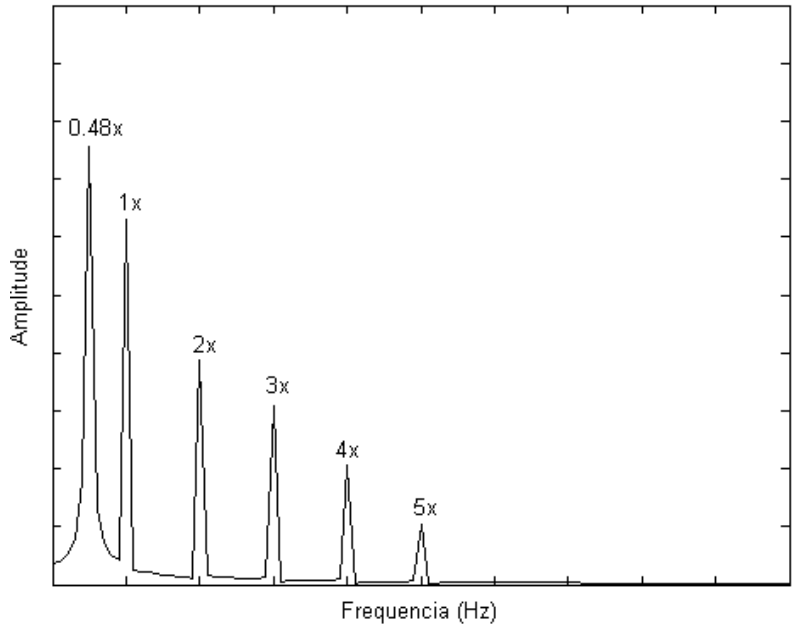


Figura 5.13 – Espectro de freqüências ilustrativo da falha de whril oil

O fenômeno de rodopio de óleo é esquematizado na figura 5.14. Para o funcionamento normal, o eixo se aloja em uma posição excêntrica em relação a bucha e seu movimento arrasta (bombeia) o óleo criando uma película em forma de cunha altamente pressurizada e com filme de óleo estreito, a qual suporta a carga do eixo. A diferença de pressão entre a parte superior e inferior da cunha origina uma força tangencial na direção de rotação do eixo. Essa força induz o movimento rotativo da película em forma de cunha que se traduz em movimento excêntrico do eixo (é a rotação do rodopio) ao redor da linha do centro do mancal. Dependo do amortecimento do sistema o eixo poderá voltar a sua posição original por um processo normal de vibração amortecida estável, ou, se o amortecimento for insuficiente para isso, o eixo continuará seguindo a sua trajetória elíptica em relação a linha de centro do mancal.

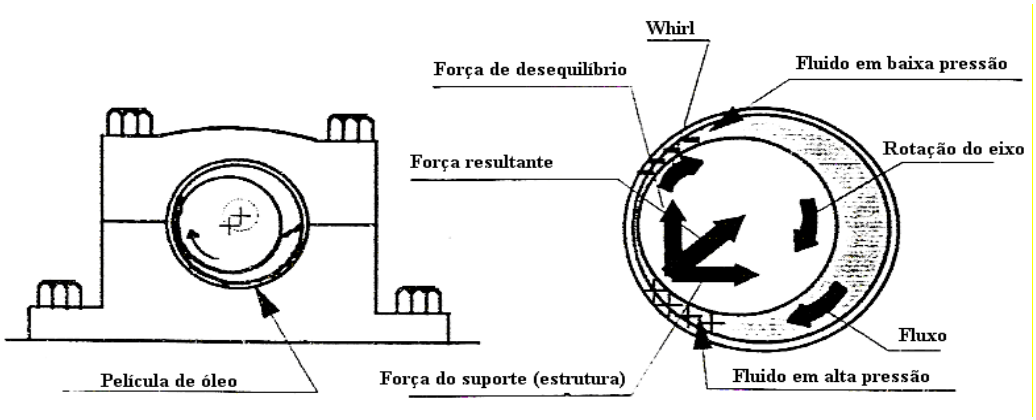


Figura 5.14 – Esquema do rodopio de óleo e as forças geradas devido este fenômeno.

A força gerada pelo rodopio é normalmente pequena se comparada com outras forças produzidas de origem estática e dinâmica. O desgaste excessivo do mancal pode contribuir para o rodopio do óleo (NASCIMENTO, 1995).

Na película, a camada molecular do óleo em contato com o eixo gira com velocidade igual à de giro, enquanto que a capa adjacente ao mancal tem velocidade nula. Por tanto, o óleo entre o eixo e o mancal será arrastado por forças de cisalhamento e tende a girar a uma velocidade que é a média entre a velocidade do eixo e do mancal (velocidade nula). Como resultado, a velocidade da camada de óleo intermediária será aproximadamente 0,5x ff, e se for considera as perdas por atrito, esta será ligeiramente menor. A órbita também tem sido amplamente utilizada para identificar a excitação do rodopio. A forma característica da órbita quando existe este tipo de excitação é geralmente circular ou

ligeiramente elíptica, com uma espécie de laço interno (“loop”), conforme ilustrado na figura 5.15.

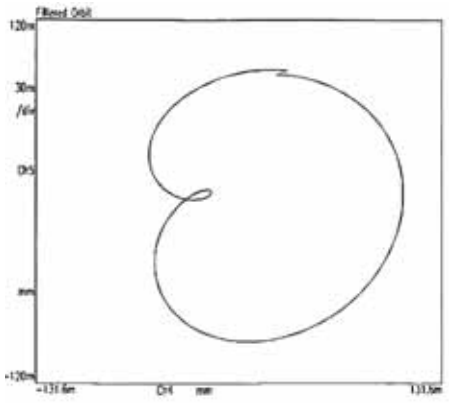


Figura 5.15 – Diagrama de órbita devido o defeito de rodopio de óleo.

5.2.4.3 LUBRIFICAÇÃO DEFICIENTE DOS MANCAIS

A deficiente lubrificação dos mancais pode ser causada por diversos fatores sendo que os principais são:

- Escolha incorreta do óleo lubrificante;
- Capacidade insuficiente do bombeamento de óleo;
- Diâmetros inadequados da tubulação do sistema de lubrificação;
- Interrupção acidental do fluxo de óleo.

Essa lubrificação deficiente pode causar atrito (roçamento seco ou *dry whirl*) excessivo entre o eixo e o mancal estacionário. Além da vibração o roçamento seco provoca o desgaste severo do mancal.

Nos mancais de sustentação axial (mancal de escora) com sapata pivotada, as irregularidades nas superfícies de contato fazem induzir vibrações com freqüência igual ao número de patins multiplicado pela rotação do eixo (NASCIMENTO, 1995).

Se o atrito for parcial ou intermitente, a rigidez do eixo varia temporariamente, ou seja, o eixo fica mais rígido durante o período de contato. Neste caso, a vibração do sistema passa a ser não linear, e as vibrações resultantes têm componentes de freqüências

sub-harmônicas (1/2, 1/3, 1/4, 1/5x ff, entre outras) e/ou inter-harmônicas (3/2, 5/2, 7/2x ff, ...), conforme mostra a figura 5.16 (ALMEIDA; GOZ; ALMEIDA, 2007).

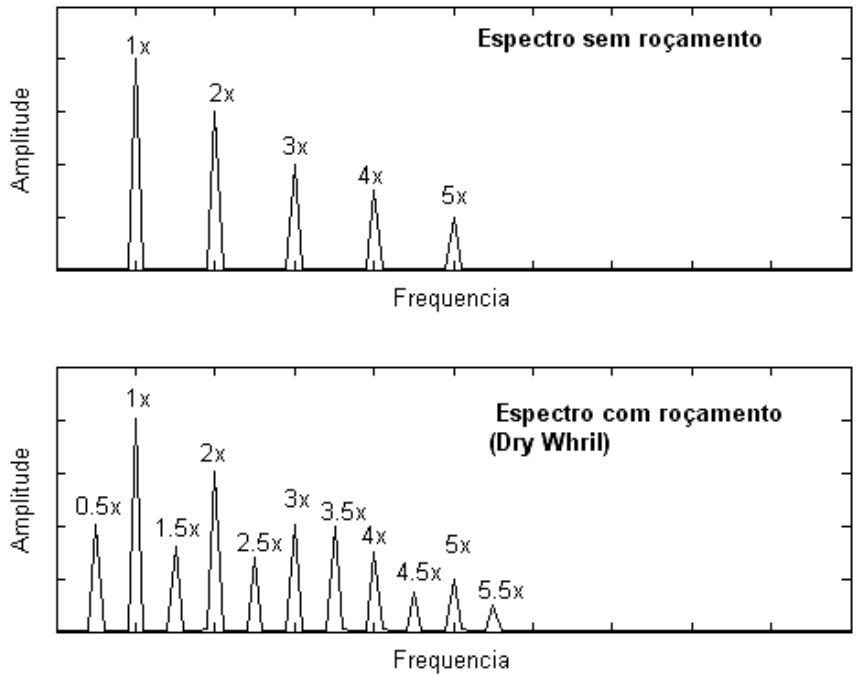


Figura 5.16 – Sinal do defeito de "roçamento" do eixo no mancal e sinal do mesmo sistema sem defeito respectivamente.

5.2.5 DEFEITOS EM MANCAIS DE ROLAMENTO

Praticamente todo equipamento mecânico possui rolamentos. Por essa razão que a detecção antecipada de seus defeitos é vantagem em diminuir o tempo de paradas de máquinas devido a esses defeitos ao mínimo. As principais causas dos defeitos em rolamentos são:

- Contaminação de sujeiras (poeira, lama, etc) ou água;
- Sobretensão devido ao desalinhamento;
- Deficiência na lubrificação;
- Defeitos ocasionados devido aos procedimentos de montagem.

Os rolamentos devem ser tratados com certo cuidado para que os mesmos possam ter uma vida longa. A importância de sua montagem fica evidenciada quando é utilizado em locais onde não se tem acesso após sua instalação. Felizmente, a monitoração condicionada da vibração pode detectar problemas em rolamentos antecipadamente a quebra.

As características da freqüência apresentada por rolamentos são mostradas abaixo:

1. Freqüência fundamental do trem de rolamento (rotação da gaiola).

$$N_f = \frac{1}{2} N \left(1 - \frac{d}{p} \cos\theta \right) rpm \tag{5.1}$$

2. Freqüência dos elementos rolantes;

$$N_b = \frac{1}{2} N \frac{p}{d} \left[1 - \left(\frac{d}{p} \right)^2 \cos^2 \theta \right] rpm \tag{5.2}$$

3. Freqüência da pista externa;

$$N_o = \frac{1}{2} N \cdot n_z \left(1 - \frac{d}{p} \cos\theta \right) = \left(n_z \cdot N_f \right) rpm \tag{5.3}$$

4. Freqüência da pista interna;

$$N_i = N \cdot n_z - \frac{1}{2} \cdot N \cdot n_z \left(1 - \frac{d}{p} \cos\theta \right) = N n_z - n_z N_f = n_z (N - N_f) \tag{5.4}$$

5. Freqüência fundamental de defeitos no elemento rolante:

$$F_B = 2 \cdot N_b \tag{5.5}$$

Onde:

N: é a velocidade de rotação do eixo em rpm;

d: é o diâmetro do elemento rolante;

p: é o diâmetro primitivo do rolamento;

n_z: é o número de elementos rolantes;

θ: é o ângulo de contato.

Um rolamento abaixo da condição normal de funcionamento exibe as freqüências acima descritas com uma amplitude muito baixa no espectro de vibração. Entretanto, se uma irregularidade na pista interna é presente, a freqüência interna N_i aparece predominantemente no espectro em freqüência do sinal. Por outro lado, quando houver uma irregularidade na pista externa do rolamento, a freqüência da pista externa será predominante no espectro. Quando a gaiola do rolamento vibra, a freqüência fundamental do trem de rolamento aparece predominante no espectro. Qualquer desalinhamento do eixo produz sobrecargas e os rolamentos devem operar como um elemento não linear. Sobre essas circunstâncias, harmônicas e sub-harmônicas das freqüências de rolamento podem estar presentes. As figuras 5.17 e 5.18 mostram um típico sinal no tempo e o espectro do mesmo para o defeito na pista interna de um determinado rolamento.

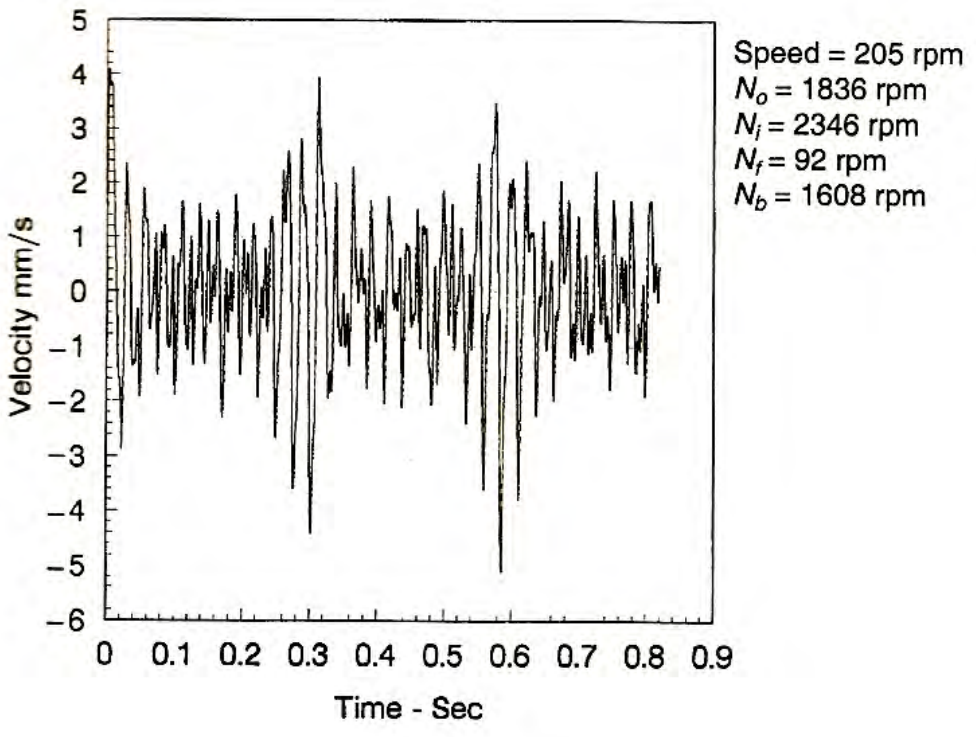


Figura 5.17 – Sinal exemplo de um defeito no rolamento no domínio do tempo.

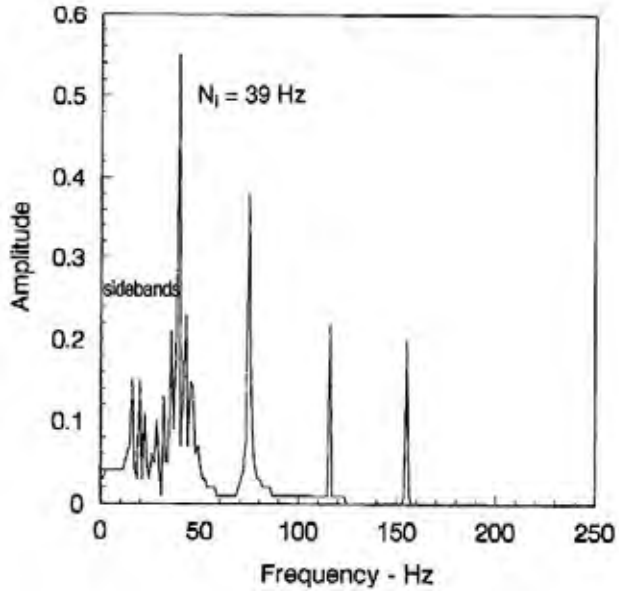


Figura 5.18 – Sinal exemplo de um defeito no rolamento no domínio da freqüência.

Deve-se alertar que dificilmente estas freqüências poderão ser vistas diretamente na observação de um espectro de vibração para essa banda de freqüência, por que como o nível de energia do defeito é muito baixo, as amplitudes correspondentes ao defeito são muito pequenas e ficam escondidas a níveis de ruídos do espectro. Em alguns casos com o defeito bastante desenvolvido, já quase no momento da quebra, podem-se ver essas freqüências quando se está monitorando máquinas simples, como um motor elétrico ou bomba centrífuga. A figura 5.19 mostra as principais freqüências de excitação provenientes do movimento de rotação do rolamento.

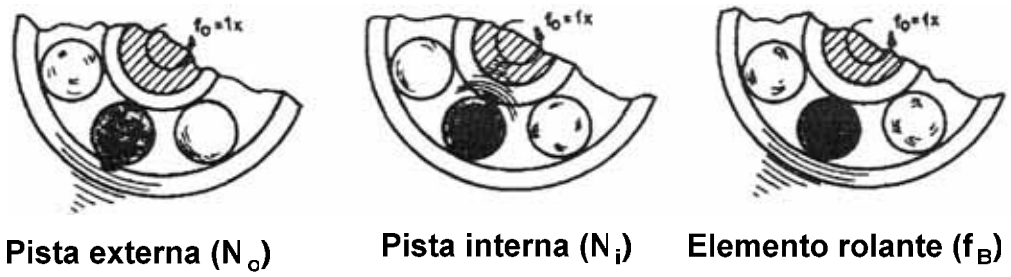


Figura 5.19 – Fontes de excitação provenientes do movimento de rotação de rolamentos.

Para evidenciar essas freqüências quando a falha ainda está em sua fase inicial, devem ser aplicadas técnicas diferentes de análise de sinais, sendo a mais usual a técnica

da demodulação em amplitude do sinal temporal filtrado para a banda de freqüência da resposta ressonante da estrutura do mancal, também conhecida como técnica do envelope. O espectro de freqüências desse envelope conterá as freqüências de falha do rolamento (ARATO, 2004).

A evolução dos defeitos em rolamentos pode ser dividida em quatro etapas, que serão descritas a seguir e está esquematizada na figura 5.20 (ALMEIDA; GOZ; ALMEIDA, 2007).

- Estágio 1: Os primeiros sinais aparecem em freqüências muito altas. O sinal nestas freqüências pode ser avaliado por envelope da aceleração, *spike energy* (gSE), HFD – *High Frequency Detection* (g) *e Shock Pulse* (dB). O valor da *Spike Energy* é próxima de 0,25 (gSe) no estágio 1 (figura 5.21);

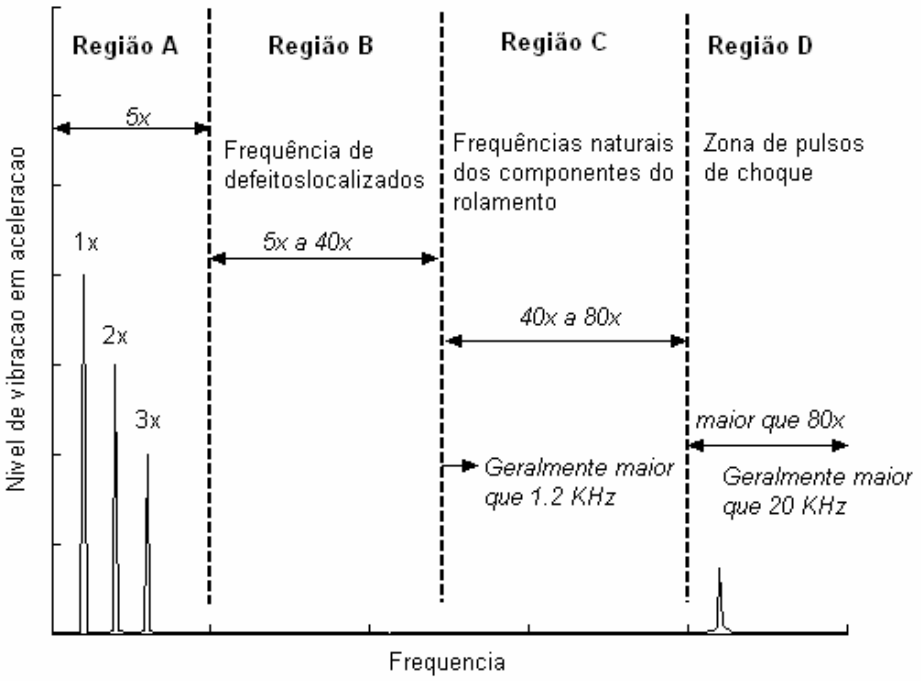


Figura 5.20 – Estágio 1 da evolução de defeitos em rolamentos

- Estágio 2: Com o surgimento de pequenos defeitos, ocorrem impactos nos elementos internos do rolamento excitando freqüências naturais na faixa de 1000 a 5000 Hz. No espectro, as freqüências naturais aparecem acompanhadas de bandas laterais. O valor do envelope de aceleração e do

Spike Energy crescem, valores de *Spike* ficam em torno de 0,25 para 0,50 (gSE) (Figura 5.21);

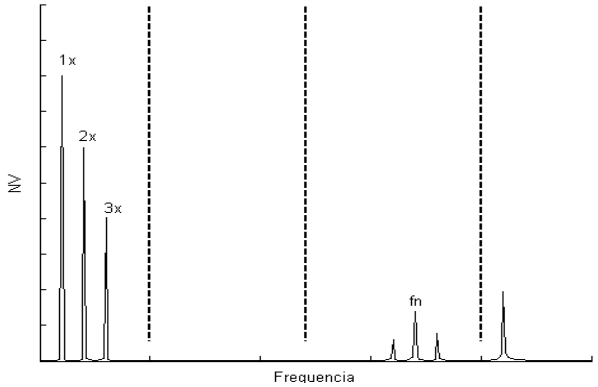


Figura 5.21 - Estágio 2 da evolução de defeitos em rolamentos

- Estágio 3: As freqüências 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 freqüências naturais como em torno das freqüências de defeitos. Os valores de envelope de aceleração e de *Spike energy* continuam a crescer (valores típicos de *Spike* são, por exemplo, de: 0,5 para 1 gSE). 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 (figura 5.22).

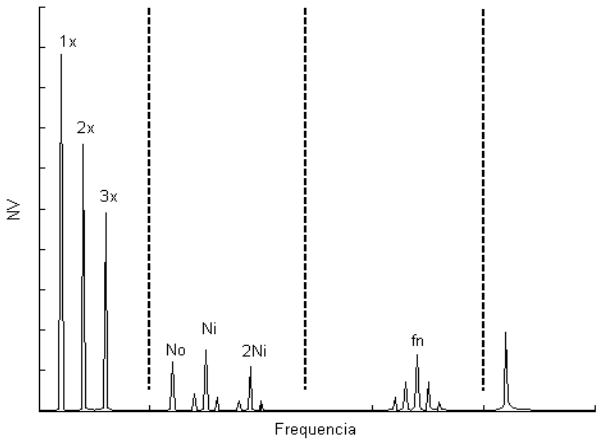


Figura 5.22 - Estágio 3 da evolução de defeitos em rolamentos

- Estágio 4: já tendendo ao colapso, a amplitude em 1x ff cresce muito e com ela, as muitas harmônicas da rotação do eixo. Neste estágio, os componentes correspondentes as freqüências fundamentais começam a desaparecer e são substituídas por uma faixa larga de freqüências correspondentes as vibrações aleatórias (figura 5.23). O nível de *Spike Energy* sofre uma pequena redução para depois, perto do colapso final, crescer até amplitudes excessivas.

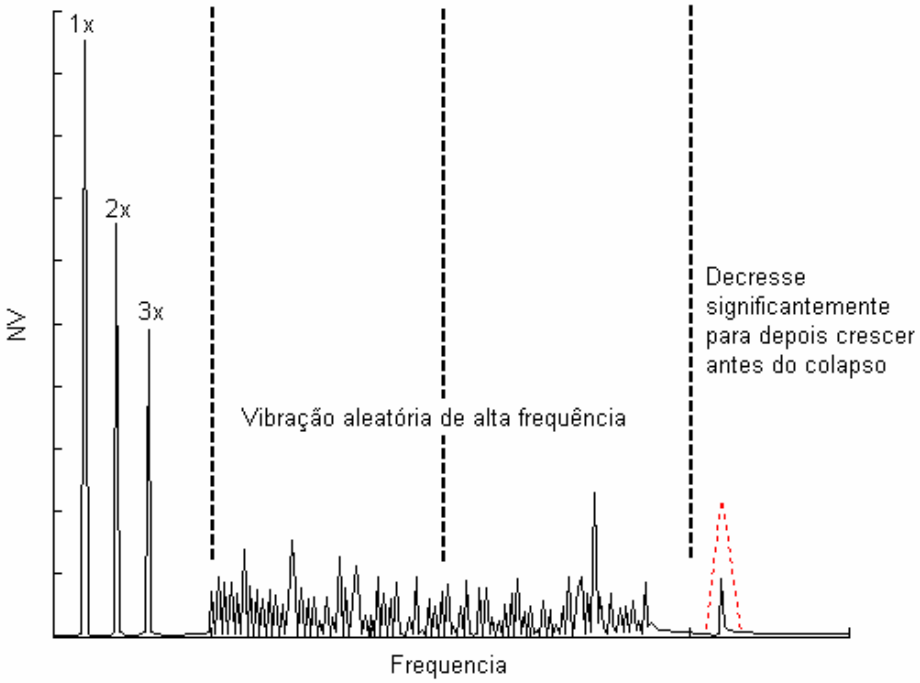


Figura 5.23 - Estágio 4 da evolução de defeitos em rolamento

5.3 EXCITAÇÕES ELÉTRICAS

Vibrações em motores e geradores também podem ocorrer devido problemas elétricos. No caso de máquinas hidroelétricas, as excitações com origem no gerador se propagam e se combinam com outras de origem distintas produzindo vibrações sobre os elementos da estrutura em função do tipo de construção da máquina, bem como, do número e posição dos mancais e seus suportes. Transmite-se fortemente ao estator e aos mancais ao seu redor, e com uma menor intensidade para a turbina e os mancais adjacentes (NASCIMENTO, 1995).

As principais forças provenientes do gerador em seu funcionamento normal em regime operacional são:

- Forças periódicas de iteração rotor/estator (forças de campo magnético);
- Forças devidas a não uniformidade do espaçamento entre o rotor e o estator;
- Forças devido o curto-circuito nas bobinas do gerador (curto-circuito dos pólos).

Uma componente periódica em um pólo magnético surge com a corrente elétrica fluindo através das bobinas do gerador, estabelecendo-se assim, um campo de forças eletromagnéticas entre rotor/ estator proveniente da indução magnética do espaço entre ambos. Essas forças de campo magnético atuam radialmente ao redor da periferia do rotor com uma freqüência que corresponde duas vezes à freqüência de oscilação da corrente elétrica fornecida pela unidade hidroelétrica.

Se uma folga assimétrica surgir entre o rotor / estator, resultará no aparecimento de uma força radial no ponto em que o entre-ferro for menor. Poderá ser notadas na análise espectral freqüências $n_i$xff onde i = 1, 2, 3,...,n. Admite-se que essa assimetria pode ocorrer devido à forma oval que apresenta o rotor ou estator, excentricidade do núcleo do rotor, deflexão do eixo devido massas desbalanceadas nos rotores e também pela pouca rigidez da estrutura suporte do estator. O módulo dessas forças será proporcional a folga entre o estator e o rotor. As forças magnéticas proveniente de uma folga assimétrica atuam de forma opostas a aproximação entre as partes.

Outra falha comum é o curto-circuito das bobinas do gerador. Essa falha acarreta na distribuição desigual da indução magnética. A freqüência da vibração proveniente desse tipo de defeito é calculada fazendo o produto do número de pólos com defeito vezes a freqüência de rotação do sistema. Harmônicas dessas freqüências poderão aparecer no espectro de vibrações.

As forças de campo magnético entre rotor/estator variam em direção e localização dentro do núcleo gerador. A freqüência de vibração e suas harmônicas são tão altas que, somente irão ocorrer danos sob circunstâncias excepcionais. Em tal caso, o grande inconveniente é o alto nível de ruído (NASCIMENTO, 1995).

As forças de desbalanceamento magnético agem como um desbalanceamento adicional da máquina e provocam forças dinâmicas pulsantes nos mancais. A excentricidade do rotor proveniente das tolerâncias de fabricação e da tolerância na variação do entre-ferro é, em geral, tão pequena que em máquinas de pequeno porte causa apenas um desbalanceamento magnético desprezível. Entretanto, para máquinas de rotor de grande diâmetro, tais assimetrias merecem maior atenção, principalmente se tiverem valores superiores ao tolerado. Para os casos de excentricidades em eixos de rotores de motores elétricos e geradores também nota-se a vibração com freqüência de 1xff na análise espectral clássica. A força resultante que é produzida deve-se a distribuição desigual da atração magnética enquanto o rotor gira excentricamente em relação ao estator. Nesta condição, um incremento na carga do motor ou do gerador se traduz em um aumento das forças magnéticas desequilibradas devido a excentricidade. Um balanceamento tampouco seria eficaz para eliminar totalmente o efeito da excentricidade.

5.4 EXCITAÇÕES HIDRÁULICAS

A interação do fluxo da água em partes fixas e móveis da turbina dão origem a ruídos e excitações hidráulicas. Essas excitações raramente são danosas ao equipamento, exceto quando excitam a estrutura em suas freqüências naturais. Quando existem vibrações excessivas sem a aparente ressonância do sistema, possivelmente existirão deficiências no projeto do conjunto rotor-estator-pás ou da tubulação.

Devido à evolução de materiais compósitos e ferramentas numéricas para cálculos estruturais, a estrutura das turbinas hidroelétricas estão se tornando mais flexíveis e devido à diminuição da massa em certos componentes da máquina afeta diretamente a sua freqüência natural, ou seja, essas máquinas possuem menor freqüência natural se comparada a projetos anteriores. Outro ponto importante é o aumento da velocidade de operação visando uma maior potência resultando em uma maior interação fluido-estrutura, aumentando assim as forças dinâmicas responsáveis pela excitação hidráulica. Por esse motivo existe hoje um grande interesse nos estudos das excitações hidráulicas.

Quando a máquina trabalha em regime permanente e em suas condições normais de funcionamento operacional, as freqüências das excitações hidráulicas estão comumente relacionadas com características de projeto da máquina como: velocidade de rotação da

turbina, número de pás diretrizes e número de pás do rotor. Por outro lado, quando a máquina trabalha em condições transitórias ou fora do seu regime estocástico, pode-se notar o aparecimento de uma energia vibratória espalhada em alta freqüência.

5.4.1. VIBRAÇÕES DEVIDAS AO DESBALANCEAMENTO HIDRÁULICO

O desbalanceamento hidráulico ocorre devido a distribuição desigual do fluido sobre o rotor. Em certos casos este tipo de desbalanceamento se torna mais acentuado que o desbalanceamento de massas rotativas. Comumente nota-se essa falha em máquinas que operam com alta velocidade angular e elevada queda d'agua

Esse problema pode ser minimizado pelo bom projeto das pás do rotor e distribuidor, um ótimo processo de fabricação e uma montagem impecável. A qualidade de tais procedimentos interferirá diretamente no nível de vibração proveniente dessa falha relacionada principalmente com o desprendimento da camada limite que compromete a distribuição simétrica do fluxo nas pás do rotor.

O desbalanceamento hidráulico produz excitação com freqüência igual a do giro do eixo onde se acopla o rotor seguido de alguns de seus harmônicos. Uma forma de notar a existência do desbalanceamento hidráulico é observar a variação das amplitudes das freqüências relacionadas a essa falha quando variar a carga da máquina.

5.4.2 VIBRAÇÕES DEVIDAS A INTERAÇÃO ENTRE O ROTOR E O DISTRIBUIDOR.

As variações de pressão na caixa espiral das turbinas se devem à interação hidráulica entre as pás do distribuidor e rotor da turbina. O fluxo de entrada do rotor não tem uma distribuição uniforme de velocidade devido às pás do distribuidor. Em regiões adjacentes as arestas das pás do distribuidor são caracterizadas pela baixa velocidade do fluido e quando as pás do rotor se aproximam desta, se estabelece uma variação do campo de velocidade do fluido onde ocorrerá a variação de pressão nas pás do rotor.

As vibrações produzidas pela interação rotor-distribuidor geralmente são mais acentuadas em máquinas cujas características operacionais exigem uma alta velocidade angular e elevada queda d'agua. Esses dois parâmetros atuam diretamente na formação das esteiras e na criação do campo variável de pressão.

O espaço entre o rotor e o difusor também desempenha grande peso sobre o efeito deste fenômeno. Quanto menor é a folga, menos uniforme é o perfil de velocidade e consequentemente, mais intensas serão as variações de pressão. Do ponto de vista do rendimento da máquina é mais interessante ter uma pequena folga para evitar a recirculação interna do fluido, pois as variações de pressão envolvidas são muito grandes. Quando a turbina opera com cargas elevadas, a folga será menor devido a uma maior abertura das diretrizes do distribuidor, assim se observa um aumento deste efeito (NASCIMENTO, 1995).

A interação rotor-distribuidor gera excitações periódicas que dependem do número de pás do rotor e do distribuidor. Assim, origina a excitação gerada pelo passo das pás do rotor, cuja freqüência (f_{pr}) é:

$$n \cdot f_{pr} = \frac{n \cdot (RPM) \cdot Z_r}{60} \tag{5.6}$$

Onde, Z_r é o número de pás do rotor, n é um número inteiro arbitrário e RPM é a rotação do eixo em que o rotor está fixo.

A excitação induzida pelas pás diretrizes do distribuidor e rotor (freqüência de passagem) das pás é dada por:

$$n \cdot f_{dr} = \frac{n \cdot Z_d \cdot Z_r}{m \cdot 60} \cdot RPM \tag{5.7}$$

Onde, Z_d é o número de pás do distribuidor, n é um número inteiro arbitrário, m é o maior número que divide Z_d e Z_r, e RPM é a rotação do eixo em que o rotor está fixo. Em máquinas com conjuntos de pás difusoras radiais para homogeneizar o fluxo como turbinas, o nível de energia dessa freqüência é muito baixo e raramente é localizada no espectro do equipamento em boas condições (ARATO, 2004).

5.4.3 PULSAÇÃO DE PRESSÃO NO DUTO DE ADMISSÃO

Pulsações de pressão de grande amplitude podem ocorrer no duto de admissão e descarga da turbina. Esse tipo de falha é observado em turbinas do tipo Francis quando a

máquina opera em condições de cargas parciais ou em cargas superiores a de seu maior rendimento (NASCIMENTO, 1995).

As pulsações de pressão surgem no tubo de desgarga de turbinas devido à presença de um fluxo com vorticidade e de cavitação. O movimento de rotação do vórtice cria pulsações de pressão nas frequências que oscilam entre 0,25 a 0,35 x ff, com amplitudes que variam com a posição na seção transversal ao longo da tubulação de descarga. Essas pulsações são resultantes de duas componentes flutuantes de pressão, uma do tipo rotacional e outra de tipo síncrona. A componente de oscilação rotacional surge devido ao movimento de rotação orbital do vórtice espiral. A componente síncrona ocorre devido ao fato da dimensão (diâmetro) do tubo de vorticidade (em espiral) próximo ao cotovelo da tubulação de descarga varia periodicamente em função da sua posição circunferencial.

As pulsações de pressão na saída do rotor podem ser detectadas facilmente com transdutores de pressão fixados no duto de admissão. Mesmo assim, estas pulsações podem propagar-se pelo duto forçado onde também são muitas vezes detectadas. A máquina sofre vibrações devido à ação destas pulsações. Tais vibrações são suportadas pelos mancais, em particular o mancal de escora, que suporta a vibração axial induzida pela componente síncrona de pulsação.

5.4.4 TURBULÊNCIA

Turbulência se dá pelo movimento irregular que aparece no fluido quando o mesmo atravessa um corpo sólido. Muitas vezes é caracterizado pelo elevado número de Reynolds (observar normas e casos) ou quando se misturam fluxos de alta e baixa velocidade. Nas máquinas hidroelétricas pode-se notar o aparecimento antes da entrada do fluido na máquina, como por exemplo, na válvula de entrada.

A turbulência é notada em bandas de alta freqüência e podem gerar vibrações consideradas críticas quando seus valores coincidem com as freqüências naturais do rotor e da estrutura. Esse fenômeno é comumente notado em máquinas de grande porte e com baixas velocidades operacionais comumente trabalhando em cargas parciais.

5.4.5 RESSONÂNCIAS HIDRÁULICAS

Existe ressonância hidráulica quando uma pulsação de pressão gerada na máquina se propaga com freqüência muito próxima ou coincidente a uma das freqüências modais dos

componentes da máquina. Uma aproximação da freqüência de ressonância para componentes onde as extremidades são “abertas-abertas” ou “fechadas-fechadas”, pode ser obtida pela aplicação da seguinte equação;

$$f_{rh} = \frac{n \cdot k}{2 \cdot L} \tag{5.8}$$

Onde:

n: número inteiro;

k: velocidade de propagação da onda;

L: o comprimento do componente mais as correções das extremidades.

Para os componentes com extremidade aberta-fechada pode-se usar a seguinte expressão:

$$f_{rh} = \frac{(2n-1) \cdot k}{4 \cdot L} \tag{5.9}$$

A ressonância hidráulica é um típico caso de amplificação de amplitudes de vibração nos componentes dos grupos hidroelétricos devido às pulsações de pressões geradas em todo o duto de aspiração transmitindo para todos os componentes da máquina com grande possibilidade de induzir ressonâncias em alguns deles.

5.4.6 VIBRAÇÕES E RUÍDOS ORIGINADOS PELO APARECIMENTO DE CAVITAÇÕES

Cavitação ocorre quando a pressão absoluta estática internamente a turbina decresce rapidamente para baixo do valor da pressão de vapor saturada do fluido a uma dada temperatura. Após este estágio bolhas de ar são formadas internamente ao fluxo do fluido e quando tais bolhas se chocam em regiões da turbina como as pás do rotor, elas se condensam. Esse processo é acompanhado por um violento colapso ou implosão das bolhas de ar aumentando a pressão nos pontos em que existem os contatos. As ondas de pressão provocadas pelo choque e posterior implosão são de tal intensidade que superam o limite à tração do material do rotor, podendo arrancar partículas do corpo. Muitas vezes utiliza-se o termo *water hammer blows* para descrever o processo da cavitação.

Resumidamente, no processo de cavitação as bolhas de ar implodem violentamente em superfícies da máquina criando ondas de pressão que chegam à estrutura gerando vibrações (ALMEIDA; GOZ; ALMEIDA, 2007). O processo de cavitação causa três indesejáveis efeitos na máquina hidráulica.

- Deterioração da performance da máquina hidráulica (rendimento e potência);
- Possível aparecimento de *pitting* e erosão em componentes da turbina principalmente as pás do rotor que estão em contato direto com o fluido e onde existem maior colapsos das bolhas de ar;
- As vibrações das paredes do duto da turbina excitadas pela pressão e baixas pulsações de fluxo ocasionam indesejável ruído.

As excitações devidas à cavitação são de baixas amplitudes e podem ocorrer tanto em baixas e altas freqüências em função das características de funcionamento da máquina. A cavitação, em sua fase inicial, gera ruído de alta freqüência (esperado acima de 50 kHz) e erosão. Por outro lado, quando a cavitação está em estágio bastante desenvolvido e as cavidades são maiores aparecerão ruídos de vibrações e ruídos de baixa freqüência. Dependendo do estágio da cavitação pode-se produzir instabilidade na máquina.

Muitos tipos de cavitação em máquinas hidráulicas são fortemente dependentes do coeficiente de cavitação. O coeficiente mais utilizado para a instalação de turbinas hidroelétricas é o de Thoma, definido como:

$$\sigma = \frac{H_a - H_s - H_v}{H} \tag{5.10}$$

Onde:

H_a: Altura manométrica da pressão absoluta;

H_b: Altura manométrica da entrada de aspiração;

H_v: Altura manométrica de vapor.

Maiores detalhes sobre os problemas relacionados a cavitação podem ser encontrados em Nascimento (1995).

CAPÍTULO 6

FUNDAMENTOS DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

A rede neural artificial teve seu desenvolvimento na década de quarenta, proveniente dos estudos de McCulloch e Walter Pitts, que na época eram pesquisadores da faculdade de Illinois. Basicamente o trabalho consistia em uma analogia entre células nervosas vivas e um processo eletrônico binário visando sua aplicação em circuitos eletrônicos. Somente após a década de oitenta que o método se difundiu pelo meio acadêmico e científico devido a evolução dos computadores e descobertas teóricas envolvendo esse tópico.

Redes Neurais são concepções em hardware/software baseadas no modelo de como o cérebro codifica e processa informações, tendo como objetivo básico, simular, em computadores, o funcionamento do sistema nervoso biológico (EDUARDO, 2003). Basicamente a rede neural é uma estrutura de distribuição paralela que a partir de seu treinamento por alguns dados de entrada produz uma saída esperada, isto é, possui a capacidade chamada de aprendizado.

Existem vários tipos de redes neurais sendo que atualmente as mais difundidas são:

- *Perceptron*;
- *Adaline*;
- *Madaline*;

- *Backpropagation*;
- *Kohonen* (*self organazing map*).

Para este capítulo será desenvolvida toda a teoria básica de rede neural, isto é, desde a apresentação das principais funções de transferência até uma visão geral dos principais tipos de arquitetura utilizada.

6.1 VISÃO GERAL DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

Como citado previamente, a rede neural artificial (RNA) possui seu principio de funcionamento baseado nos neurônios biológicos encontrados nos seres vivos. A principal finalidade do neurônio biológico é transmitir informações. Para RNA's também não é diferente. Seu elemento básico é conhecido como neurônio, sendo que, uma rede é constituída por vários destes elementos. Os elementos restantes são:

- Regra de propagação das informações;
- Função de ativação;
- Um conjunto de entradas externas que poderão ser usadas em seu treinamento;
- Um método de armazenamento de informações.

O esquema de uma rede neural artificial é ilustrado na figura 6.1.

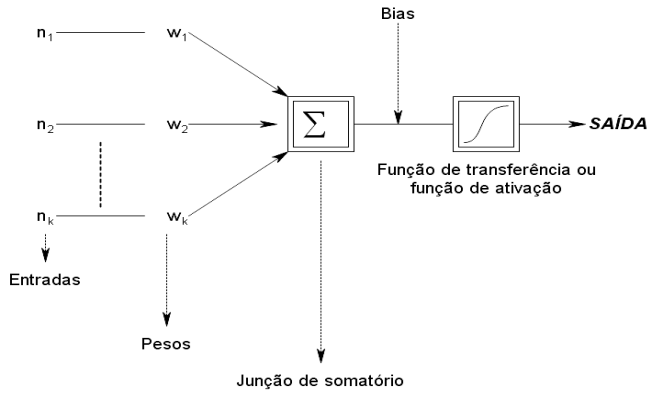


Figura 6.1 – Esquema clássico de um neurônio.

De maneira geral, o neurônio recebe um sinal (ou sinais) de entrada sendo que tal sinal é multiplicado por pesos (w_n) que correspondem a "força" de uma conexão sináptica biológica simples. Uma junção ocorre na função denominada somatório, onde a mesma simula a captação do estímulo presente nos dendritos, acumulando de maneira ponderada (por meio dos pesos) os dados recebidos da entrada do neurônio em FS_j:

$$FS_j = \sum_{i=1}^{n} n_i \cdot w_{ji} \tag{6.1}$$

Após obter o valor proveniente da função somatório, a próxima etapa é definir a ativação ou não do neurônio pelo uso da função de transferência. Para isso a função de transferência utiliza um limiar θ para determinar a sua ativação ou não em y_j:

$$a_j = f(FS_j) = \begin{cases} 1 & FS_j \geq \theta \\ 0 & FS_j \leq \theta \end{cases} \tag{6.2}$$

6.2 PRINCIPAIS FUNÇÕES DA ATIVAÇÃO OU TRANSFERÊNCIA

A função de ativação (FA) de um neurônio (θ) é o elemento que define a saída da RNA. Existem diversos tipos de FA sendo quatro as mais usuais:

- Função degrau;
- Função Rampa;
- Função sigmóide;
- Função tangente hiperbólica.

O esquema da FA degrau é ilustrado na figura 6.2. Nota-se que seu valor de saída está compreendido entre 1 e -1.

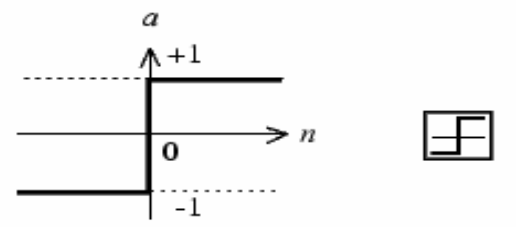


Figura 6.2 – Gráfico da FA degrau e símbolo adotado.

$$a = f(n) = \begin{cases} -1 & a < 0 \\ 1 & a \geq 0 \end{cases} \tag{6.3}$$

O esquema da FA rampa é ilustrado na figura 6.3. Nota-se que seu valor de saída está compreendido entre 0 e 1.

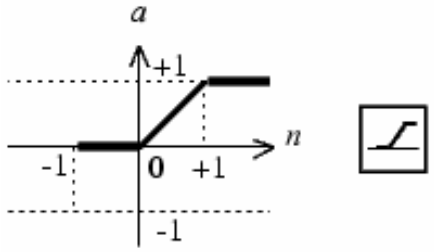


Figura 6.3 – Gráfico da FA rampa e símbolo adotado

$$a = f(n) = \begin{cases} 0 & a < 0 \\ a & 0 \leq a \leq 1 \\ 1 & a > 1 \end{cases} \tag{6.4}$$

O esquema da FA sigmóide é ilustrado na figura 6.4. Nota-se que seu valor de saída está compreendido entre 0 e 1.

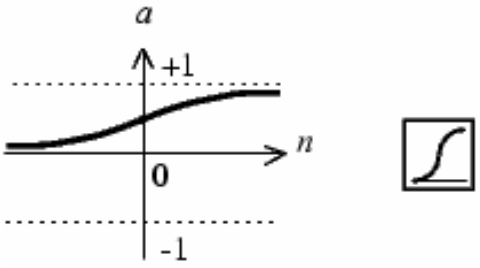


Figura 6.4 – Gráfico da FA sigmóide e símbolo adotado

$$a = f(n) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \tag{6.5}$$

O esquema da FA tangente hiperbólica é ilustrado na figura 6.5. Nota-se que seu valor de saída está compreendido entre -1 e 1.

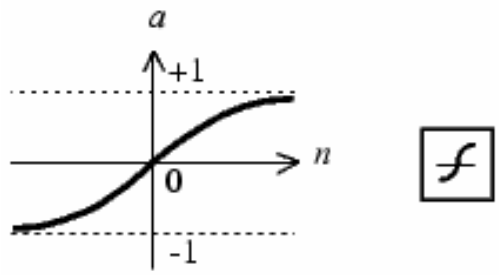


Figura 6.5 – Gráfico da FA tangente hiperbólica e símbolo adotado

$$a = f(n) = \begin{cases} 1 - \dfrac{1}{1 + a} & a \geq 0 \\ -1 + \dfrac{1}{1 - x} & a < 0 \end{cases} \tag{6.6}$$

6.3 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ARQUITETURA DE UMA RNA

Uma rede neural artificial é uma combinação de neurônios artificiais, suas conexões e algoritmo de aprendizado usado para o treinamento. Para caracterizar esses agrupamentos de neurônios, devem ser considerados (AGUIAR; OLIVEIRA, 2007):

- O número de camadas de rede;
- O número de neurônio por camada;
- Tipo de conexões;
- Grau de conexidade entre os neurônios.

Rede de simples camada unidirecional, como o próprio nome sugere, é composta por somente uma camada, isto porque a camada de entrada não realiza cálculos somente distribuem os valores de entrada. O vetor de entrada (a_k) possui cada um de seus elementos ligados a cada neurônio existente na rede, sendo que tais valores são ponderados por uma matriz dada por $W_{k,m}$, onde k e m são, respectivamente, o número de entradas e o número

de neurônios. Cada neurônio emite uma soma ponderada das entradas para a rede. A figura 6.6 ilustra a arquitetura de uma rede neural de simples camada.

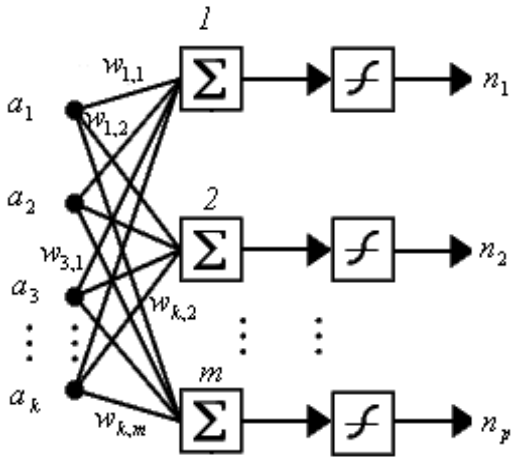


Figura 6.6 – Esquema ilustrativo do modelo teórico estrutural de uma RNA de simples camada

Rede neurais de multicamadas são aquelas que possuem camadas ocultas, isto é, são RNA's simples em cascata que utilizam como dados de entrada a saída da rede anterior conectada a mesma, ou seja, o vetor de entrada é multiplicado pelos pesos da camada de entrada e então multiplicar o vetor resultante por pesos das camadas subseqüentes. Esse tipo de rede oferece maior capacidade computacional e é muito utilizada quando se trabalha com grandes quantidades de entrada, visto que, o aumento da quantidade de conexões e pesos leva a uma maior capacidade de extração estatística de alta ordem.

As redes multicamada não incrementam o poder computacional em relação às redes de simples camada, a não ser que haja uma função de ativação não linear entre as camadas (ALEXANDRE, 2005). A figura 6.7 ilustra a arquitetura de uma rede neural multicamada com a_k elementos de entrada e duas camadas ocultas.

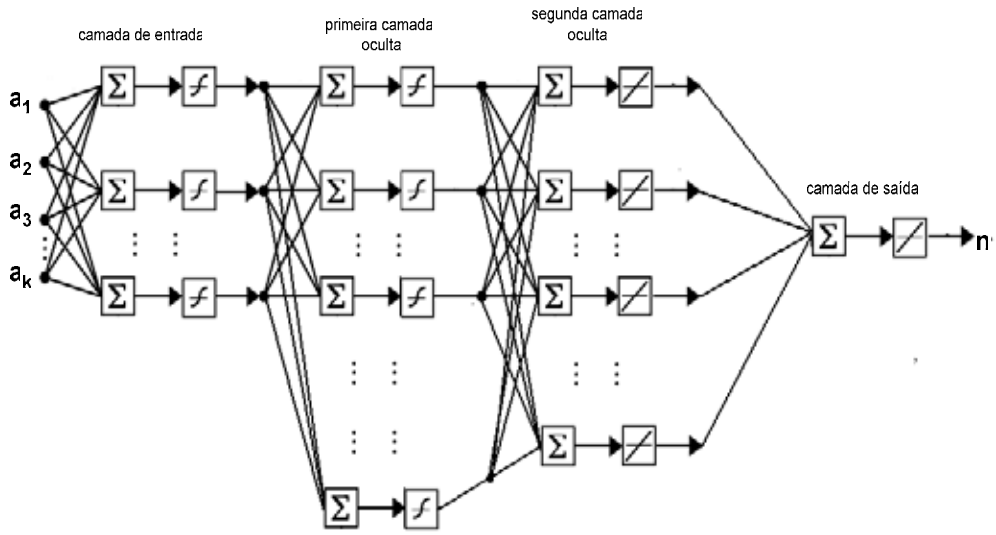


Figura 6.7 – Esquema ilustrativo do modelo teórico estrutural de uma RNA de multicamadas

Ao contrário de uma rede neural unidirecional, em uma RNA reincidente os neurônios são alimentados pelos sinais obtidos na camada de saída (MENDONÇA, 2002). A figura 6.8 ilustra a arquitetura de uma rede neural reincidente.

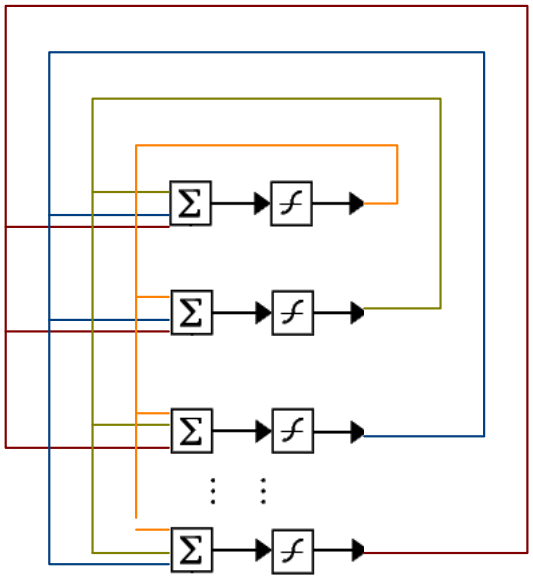


Figura 6.8 - Esquema ilustrativo do modelo teórico estrutural de uma RNA reincidente

6.4 PROCESSO DE APRENDIZADO OU TREINAMENTO DE UMA RNA

O aprendizado (ou treinamento) de uma rede consiste no ajuste de seus parâmetros, de forma que esta produza o resultado esperado, dada uma apresentação de conjuntos de padrões específicos. Os padrões de treinamento contêm as informações que se deseja que uma rede aprenda. Os parâmetros a ajustar são os pesos das conexões que interligam os neurônios (AGUIAR; OLIBEIRA, 2007).

Existem duas formas de aprendizado de uma RNA, são elas:

- Aprendizado supervisionado;
- Aprendizado não supervisionado.

Treinamento supervisionado se da quando o ajuste dos parâmetros da rede é feito por um conjunto de entradas e saídas padrões. Se o valor da saída da RNA estiver fora do erro estipulado, ou seja, a diferença entre a saída atual e a saída padrão estiver acima do erro aceitável, o algoritmo da RNA gera um sinal de erro responsável pelo ajuste de pesos de forma a corrigir o valor atual de saída da rede até que se consiga a saída desejada ou meta. Se o erro não for suficiente pequeno, repete-se a operação de ajuste de pesos até que se consiga uma saída dentro da faixa de aceitação.

Ao contrário do treinamento descrito anteriormente, a rede neural não supervisionada possui somente um conjunto de entrada definido, isto é, não possui um padrão entrada-saída (não é mostrada a rede um padrão de saída conhecida). Neste caso utiliza-se a comparação entre sinais para a criação de grupos semelhantes por meio de propriedades estatísticas do grupo de treinamento.

Existem diversos algoritmos responsáveis pelo treinamento de RNA's, sendo que um dos mais utilizados é o algoritmos *backpropagation*.

6.5 ALGORITIMO DE TREINAMENTO BACKPROPAGATION

O algoritmo *backpropagation* ficou popularizado no meio acadêmico-científico devido à velocidade de convergência e acuracidade que possui em relação aos dados de saída desejados (vetor alvo ou valor alvo). Este método basicamente consiste de dois passos onde cada um ocorre em direção oposta ao outro, ou seja, um passo ocorre na direção da camada de saída da rede (passo pra frente) e o outro, por analogia, ocorre na

direção oposta, isto é, na direção da camada de saída para a camada de entrada (passo para trás). No passo para frente, um conjunto de dados de ativação (vetor de entrada) é apresentado a camada de entrada da rede sendo que seu valor resultante é propagado por cada camada oculta até chegar na camada de saída resultando no vetor saída. Nesse passo, todos os pesos relativos a cada neurônio de cada camada são fixos. O vetor de saída é então subtraído do vetor alvo gerando assim um novo vetor denominado de sinal erro. Se o sinal erro estiver fora da faixa de erro especificada o vetor de saída é devolvido a camada de entrada (por esse motivo esse algoritmo é chamado de *backpropagation*), isto é, o vetor de saída se torna o vetor de entrada e os pesos relativos a rede são todos atualizados, buscando com isso levar a resposta de saída em direção a resposta de entrada.

Resumindo, todo processo de aprendizado da rede utilizando o algoritmo *backpropagation* ocorre em cinco etapas:

- Apresentação do grupo de treinamento;
- Cálculo do vetor saída relacionado ao conjunto de entrada apresentado;
- Cálculo do sinal erro e comparação com o vetor alvo;
- Se o sinal erro estiver fora da faixa de aceitação, atualizar os pesos da rede;
- Repetição do processo transformando o vetor saída em vetor de entrada;

Após a popularização do algoritmo *backpropagation* para o treinamento de redes, diversas pesquisas foram realizadas e métodos foram desenvolvidos com a finalidade de tornar sua convergência mais rápida. Assim, técnicas de otimização foram utilizadas para tanto. Um dos desenvolvimentos realizados neste sentido foi a incorporação do algoritmo de *Levenberg Marquart* (também conhecido pela sigla LM) para mínimos quadrados não lineares no algoritmo de *backpropagation* (EDUARDO, 2003).

Atualmente a teoria do algoritmo de *backpropagation* já está bastante desenvolvida e por este motivo não serão aprofundados seus fundamentos e implementação numérica, pois, todo algoritmo numérico utilizado neste trabalho foi proveniente da aplicação do *toolbox* de neural *network* pertencente ao software *MATLAB*® versão 5.3. Nesse *pack* já existem diferentes funções para os ajustes de pesos, definição de numero de camadas, entre outras configurações possíveis.

6.6 APLICAÇÃO DE RNA A PROBLEMAS DE ENGENHARIA

A escolha da arquitetura da rede e do algoritmo responsável pelo treinamento são fases importantes no desenvolvimento de uma rede neural. No entanto, da mesma forma que no aprendizado humano, a qualidade da saída desejada para o problema objeto de sua aplicação depende da pertinência e correlação dos dados de entrada com o objeto da análise. Vetores de entrada que contenham um número insuficiente, excessivo ou com a presença de dados não fortemente correlacionados com o objeto da aplicação da RNA, podem prejudicar a convergência no treinamento e a consistência dos resultados.

Especial atenção deve ser dada na escolha dos dados de entrada responsáveis pelo treinamento, logo, diretamente relacionados com o futuro diagnóstico que a rede há de prover. No caso, por exemplo, da análise da condição de um equipamento, que é o objeto desta dissertação, os dados devem ser representativos de tal modo que o surgimento de problemas resulte em diferentes dados saídas se comparadas quando o equipamento está em ótimas condições de funcionamento. Por exemplo, saída 0 (zero) para a condição de falha e 1 (um) para a condição sem falha.

Para resolver este problema, é muito comum fazer-se o uso de técnicas de redução de dados de tal forma que, o sinal adquirido de um equipamento mecânico sofre um pré-processamento cuja principal finalidade é obter um conjunto de dados, vetor de entrada, fortemente representativo da condição da máquina que se deseja analisar. No próximo capítulo será descrita a técnica de redução de dados e sua aplicação em diagnose e detecção de falhas em máquinas rotativas (turbinas hidroelétricas) utilizando redes neurais artificiais, que é o objeto deste trabalho.

CAPÍTULO 7

TÉCNICA DO ESPECTRO DE BANDAS DE FREQUÊNCIAS PRÉ DEFINIDAS E A APLICAÇÃO DA REDE NEURAL ARTIFICIAL NA DETECÇÃO E DIAGNÓSTICO DE FALHAS

Existem diferentes métodos de identificação de falhas baseados em conhecimento sendo que os principais são:

- Redes Neurais Artificiais;
- Lógica *Fuzzy*;
- Redes de *Prety*;
- Sistemas Especialistas;
- Sistemas Híbridos;

A característica principal desses métodos é projetar o sistema de diagnóstico na observação de determinados eventos e correlacionar estes eventos com as fontes de defeito observadas em ocasiões anteriores ou adquiridas em tempo de operação (AYOUBI, 1994 citado em EDUARDO, 2003). Cada método possui características próprias fazendo com

que o usuário seja o responsável pela escolha daquele que se adapte melhor a solução do seu problema.

As RNA's foram, e continuam sendo, aplicadas de diferentes maneiras. Nos trabalhos de Gebraeel et al. (2004) e Taplak, Uzmay, e Yildirim (2006), RNA's foram usadas para detectar falhas em rolamentos. No primeiro trabalho, foram aplicados dois tipos diferentes de RNA para estimar a vida dos rolamentos com os dados de entradas utilizando amplitudes de freqüências e harmônicos de falhas comuns nos elementos rolantes. No trabalho de Taplak (2006), foi usado o algoritmo back-propagation para detector as falhas, mas não diagnosticá-las.

No trabalho de Leger, Garland, e Poehlman (1998), dados de cartas estatísticas de controle foram usados no treinamento de RNA's para detecção e diagnóstico de falhas, entretanto foram utilizadas duas arquiteturas de redes diferentes: *multi-layer perceptron* e *radial basis*.

Paya, Esat, e Badi (1997), utilizou como dados de entrada as saídas provenientes de wavelets para detectar e diagnosticar falhas em caixas de câmbio e rolamentos automotivos.

Na pesquisa de Wang e Too (2002), foi aplicado o método de alta ordem estatística (HOS – *higher-order statistics*) na identificação de falhas em unidades de bombeamento hidráulico.

No trabalho de Yam et al. (2001), desenvolveu-se um tipo de Sistema Inteligente de suporte e decisão preventivo aplicado na manutenção condicional baseado em RNA's e implementado em equipamentos críticos (redutores planetários) de uma unidade geradora de energia.

Para este trabalho foi utilizado o método de conhecimento e aprendizado RNA na detecção de falhas em turbo geradores hidráulicos de Pequenas Centrais Hidroelétricas, onde a metodologia empregada para a preparação dos dados de entrada para a RNA permite uma customização, de tal forma que, sua aplicação resultará em um vetor de dados específico para cada máquina a ser monitorada, permitindo sua aplicação para qualquer combinação de grupos geradores: horizontais, verticais, com qualquer tipo de turbina e com ou sem transmissão intermediária por engrenagens. Poder-se-á utilizar os dados (diagnóstico) proveniente desta técnica na gestão remota das PCHs.

Neste capítulo será apresentada esta técnica, especialmente desenvolvida com foco no diagnóstico automático da condição de funcionamento de turbinas de PCH's por intermédio da aplicação de redes neurais artificiais.

7.1 A TÉCNICA DO ESPECTRO DE BANDAS DE FREQÜÊNCIA PRE DEFINIDAS (EBFPD).

Existem diversas formas de redução de dados, todas são totalmente dependentes do problema que se deseja solucionar com a aplicação da RNA. Vários parâmetros podem ser tomados como dado de entrada para uma RN, mas nesse estudo será utilizado o parâmetro vibração como base para o desenvolvimento da técnica proposta, também utilizado no aprendizado e treinamento da rede neural.

A EBFPD é um espectro de vibração especial com no máximo 12 (doze) pontos representativos da condição de funcionamento do equipamento, isto é, com esses pontos consegue-se saber se o equipamento está em perfeitas condições de funcionamento ou se apresenta alguma falha. Isso pode ser feito porque toda a falha reflete em mudanças do comportamento dinâmico do equipamento, ou seja, o parâmetro vibração é alterado. Esses pontos representativos podem ser usados no treinamento da RN conforme será exposto em parágrafos futuros. Doze pontos (valores proveniente da técnica) são suficientes para fazer o monitoramento e diagnóstico de todas as principais falhas possíveis conforme será descrito em tópicos futuros.

Esta técnica é totalmente customizável, ou seja, pode ser aplicada a diferentes turbinas, e.g. Kaplan, Francis, entre outras, cujas características operacionais sejam diferentes, e.g. diferentes números de pás do rotor, rotação nominal, entre outras. Isto é possível selecionando-se parâmetros significativos quanto ao funcionamento da máquina. No caso de uma turbina hidráulica, por exemplo, são:

- Freqüência de rotação;
- Freqüência de passagem das pás;
- Freqüência da passagem das pás do rotor.

Essas freqüências são representativas do funcionamento da máquina e o aparecimento de falhas pode ser notado por mudanças que ocorrem no espectro de freqüência, conforme descrito no capítulo 5. É possível definir bandas de freqüência tais que sua largura possua somente o sinal compreendido entre o limite inferior e superior da mesma. Dessa maneira é possível calcular a severidade de vibração do sinal limitado pelos limites da banda e então, obter um espectro de bandas de freqüência onde o eixo relacionado às abscissas possua somente as bandas, cujas ordenadas são as severidades relativa a cada banda pré-definida. Daí o nome Espectro de bandas de Freqüência Pré-Definidas.

Primeiramente o analista define as freqüências e as bandas de interesse relativo a cada freqüência pré-definida e as salva. Após essa etapa pode-se aplicar a técnica do EBPDF ao sinal que se deseja a análise. Para dividir o sinal original em bandas foi utilizada a técnica de edição do sinal ao invés da filtragem por filtros clássicos como o do tipo "butterworth". Isto se deve ao fato das freqüências de interesses de turbinas hidráulicas serem muito baixas, logo, seus harmônicos estão muito próximos a estas, resultando em pequenas larguras de bandas de freqüência. Como o sinal que passa através de um filtro não é cortado idealmente, como já discutido no capítulo 3, se a banda for muito pequena parte do sinal contido dentro da mesma será perdido. Ilustração na figura 7.1.

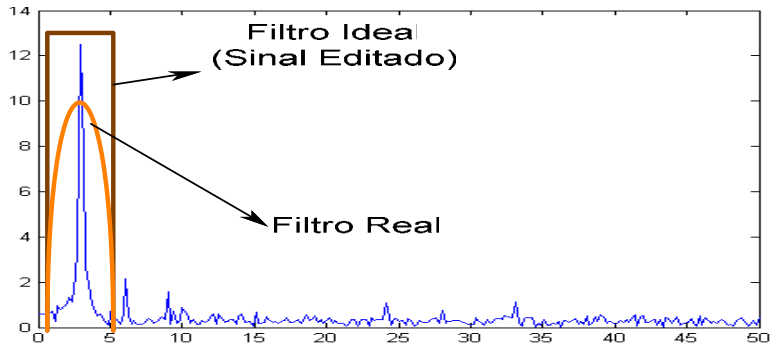


Figura 7.1 – Resposta do filtro ideal e do sinal editado.

Para evitar a perda de parte do sinal interno à banda, utilizou-se a técnica de edição do sinal que consiste na "filtragem" do mesmo no domínio da freqüência. Para utilizar essa técnica fez-se o uso da regra de linearidade do espectro de freqüência:

$$F[\alpha \cdot x_1(n) + \beta \cdot x_2(n) + \delta \cdot x_3(n)] = \alpha \cdot F[x_1(n)] + \beta \cdot F[x_2(n)] + \delta \cdot F[x_3(n)] \qquad 7.1$$

Eliminando o termo referente à freqüência x_3 e retornando ao domínio do tempo utilizando a transformada inversa de Fourier, tem-se o sinal no tempo "filtrado" de x_3:

$$F^{-1}[\alpha \cdot x_1(n) + \beta \cdot x_2(n)] = Sinal\ editado\ no\ domínio\ da\ frequência \qquad 7.2$$

A espessura da banda pode ser definida após uma análise espectral clássica e características construtivas da máquina, assegurando que os valores da severidade de vibração em cada banda sejam representativos da condição de funcionamento da máquina. Não existe uma regra fixa para defini-las (larguras das bandas de freqüência), pois, a largura, bem como o número de bandas, variará de acordo com a máquina, ou seja, a técnica é customizável.

Com intuito de ilustrar a técnica da edição do sinal e futuramente a técnica EBFPD utilizou-se um sinal real de uma turbina do tipo Kaplan para a confecção do mesmo. Essa máquina possui as seguintes características construtivas:

- Turbina do tipo kaplan
- Rotação do eixo da turbina: 200 rpm (3,3Hz);
- Rotor com 5 pás;
- Possui 14 pás diretrizes.

Considere a seqüência descrita na figura 7.2. Primeiramente o sinal é adquirido (a). Após essa etapa o sinal no domínio do tempo é transferido para o domínio da freqüência utilizando o algoritmo da Transformada Rápida de Fourier (b). Todas as amplitudes das freqüências externas a banda pré-definida pelo usuário são forçadas a serem zero, ou seja, amplitude nula para as freqüências externas a largura da banda (c). Depois de anuladas todas as freqüências não relativas à largura de banda desejada, o sinal no domínio da freqüência é usado para reconstruir o sinal no domínio do tempo (d). Para este sinal reconstruído, é possível o cálculo da severidade de vibração relativa a banda de freqüência desejada.

Um outro ponto interessante é que uma criteriosa seleção de bandas permite que se pré-defina um número limitado de bandas para o EBPDF, reduzindo bastante o tamanho do vetor de entrada em uma RNA para diagnóstico. Com base nos resultados obtidos neste trabalho, um mínimo de 4 (quatro) até no máximo 12 (doze) bandas são suficientes.

Para exemplificar a técnica de edição do sinal, utilizou-se o sinal proveniente do mancal de escora da turbina e editou-se o sinal entre 3 e 4 Hz referente a banda de rotação da máquina. A figura 7.2 e 7.3 mostra para comparação, o uso da técnica de edição e do filtro para obtenção do sinal no domínio do tempo usado para cálculo da severidade de vibração da banda de freqüência considerada (simulação realizada com o auxílio do Matlab).

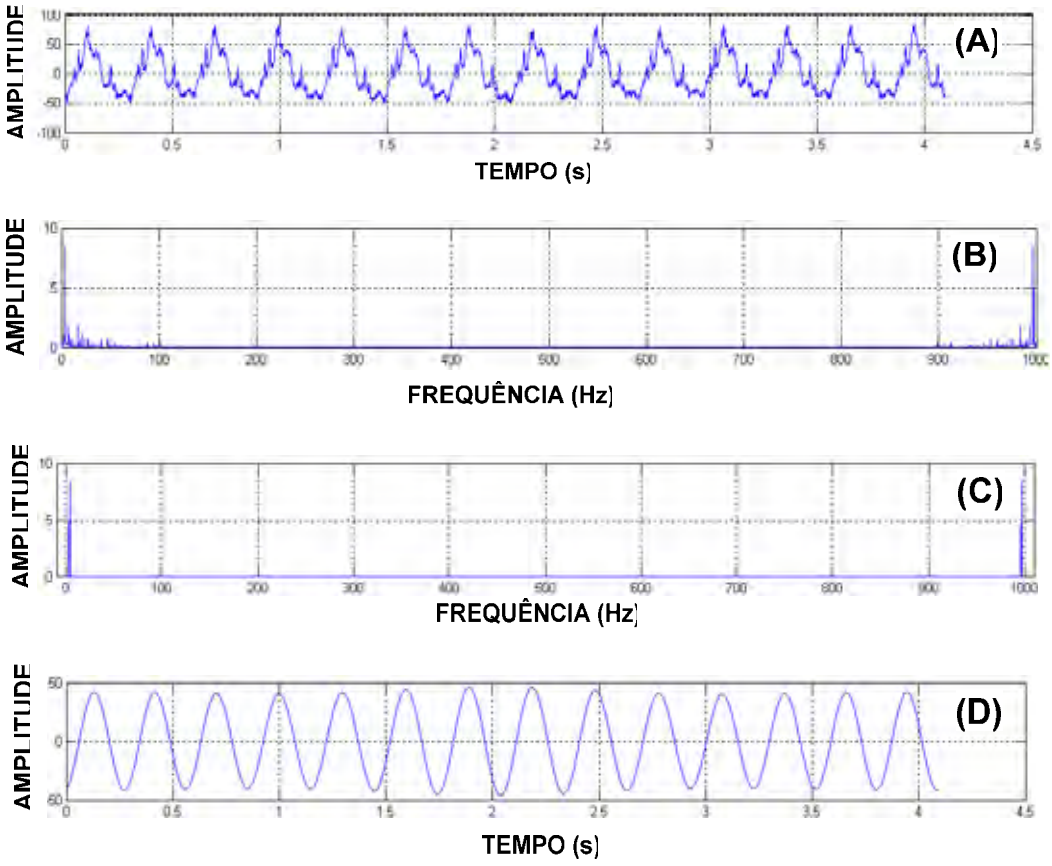


Figura 7.2 – Sinal filtrado obtido pela técnica da edição do sinal e suas diferentes etapas. Na seqüência: (A) sinal real; (B) *FFT* do sinal; (C) *FFT* editada para a banda desejada e (D) sinal recuperado referente à banda desejada.

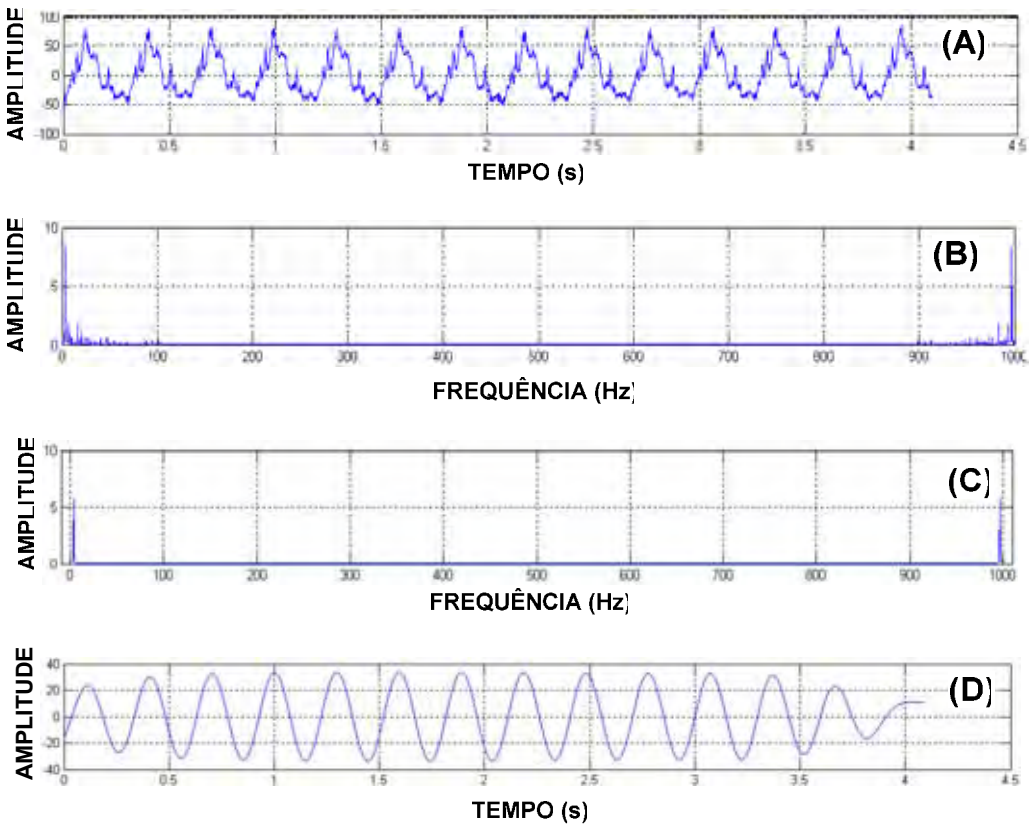


Figura 7.3. Sinal obtido por intermédio do uso de filtros. Na seqüência: (A) sinal real; (B) *FFT* do sinal; (C) sinal filtrado para a mesma banda da figura 7.2; (D) *FFT* do sinal filtrado.

Após obter-se o sinal editado faz-se o cálculo da severidade de vibração relativa a cada banda. Nesse trabalho foram utilizados dois tipos de severidade possíveis para as bandas, sendo elas:

- Velocidade *RMS*;
- Amplitude Instantânea Máxima.

A escolha de qual método será utilizado para o cálculo da severidade está diretamente ligado ao tipo de medida realizada. Se for medida a vibração absoluta do equipamento por meio de um acelerômetro a severidade de vibração calculada é a velocidade *RMS*. Para o caso onde a medida é a oscilação relativa entre o eixo e o mancal obtida através do uso de proxímetros a severidade de vibração calculada é a amplitude instantânea máxima. Todo o

equacionamento, normas e layout de montagem que foram utilizados estão descritos em detalhes no capítulo 4 deste trabalho.

O espectro de freqüências relativo ao deslocamento eixo-mancal do sensor indutivo montado na direção vertical (canal 5) e horizontal (canal 6) no mancal de escora da turbina é mostrado na figura 7.4 e 7.5, respectivamente.

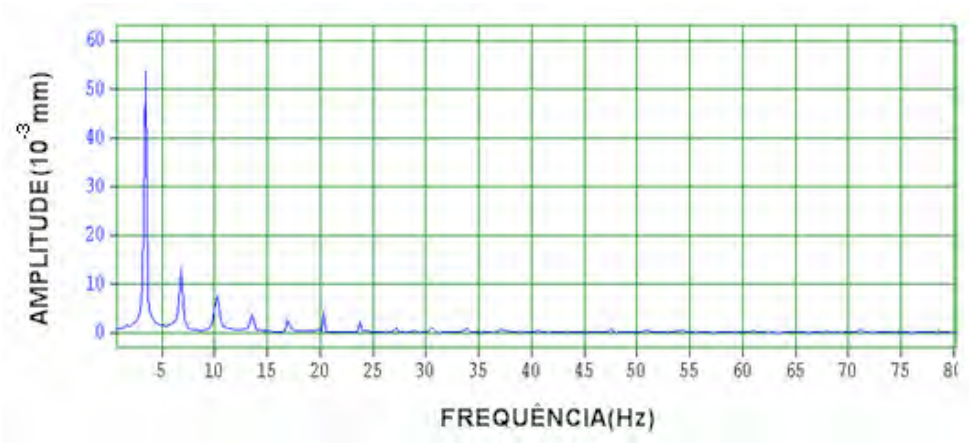


Figura 7.4 – Espectro de freqüência do sinal adquirido na direção vertical no mancal escora da turbina kaplan usada para exemplificar a técnica da EBFPD.

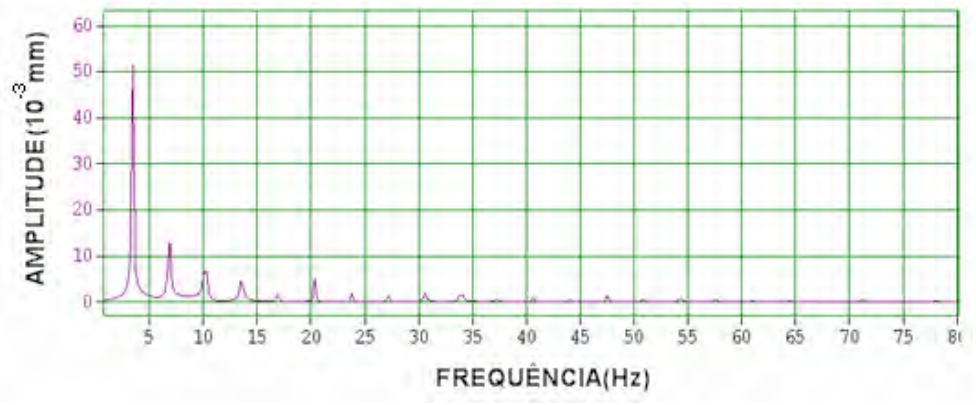


Figura 7.5 – Espectro de freqüência do sinal adquirido na direção horizontal no mancal escora da turbina kaplan usada para exemplificar a técnica da EBFPD.

Da análise espectral clássica é sabido que o aparecimento de falhas está diretamente relacionado com o aparecimento de harmônicas das principais freqüências (e.g. freqüência de giro) e em alguns casos também o aparecimento de bandas laterais. Por este motivo

serão alvo de análise os primeiros 3 harmônicos da freqüência de rotação (6; 10 e 13 Hz), os primeiros 3 harmônicos da freqüência de passagem das pás do rotor (33; 50 e 67) e por fim, os 3 primeiros harmônicos da freqüência da passagem das pás do distribuidor (86; 129 e 172 Hz). Após definidas todas as freqüências representativas do funcionamento da turbina pode-se definir suas respectivas largura de banda.

Tabela 7.1 – Freqüências de interesse relativas a rotação da turbina.

BANDAS DE FREQUÊNCIA RELATIVAS À FREQÜÊNCIA DE ROTAÇÃO DA TURBINA E SUAS HARMÔNICAS		
Freqüência (Hz)	Limite inferior da banda de freqüência (Hz)	Limite superior da banda de freqüência (Hz)
3	1,5	5
6	5	8
10	8	11,5
13	11,5	14,5

Tabela 7.2 – Freqüências de interesse relativas a rotação das pás do rotor.

BANDAS DE FREQUÊNCIA RELATIVAS À FREQÜÊNCIA DE ROTAÇÃO DAS PÁS DO ROTOR DA TURBINA E SUAS HARMÔNICAS		
Freqüência (Hz)	Limite inferior da banda de freqüência (Hz)	Limite superior da banda de freqüência (Hz)
16	15	18
33	32,5	35
50	49	52
67	66	69,5

Tabela 7.3 – Freqüências de interesse relativas a passagem das pás.

BANDAS DE FREQUÊNCIA RELATIVAS À FREQÜÊNCIA DE PASSAGEM DAS PÁS DA TURBINA E SUAS HARMÔNICAS		
Freqüência (Hz)	Limite inferior da banda de freqüência (Hz)	Limite superior da banda de freqüência (Hz)
43	42	45
86	85	88
129	128	131
172	171	174

Após definidas e salvas todas as freqüências representativas do funcionamento da turbina e suas respectivas larguras de banda, pode-se aplicar a técnica do EBFPD. O espectro de bandas relativo a essa técnica é mostrado na figura 7.6.

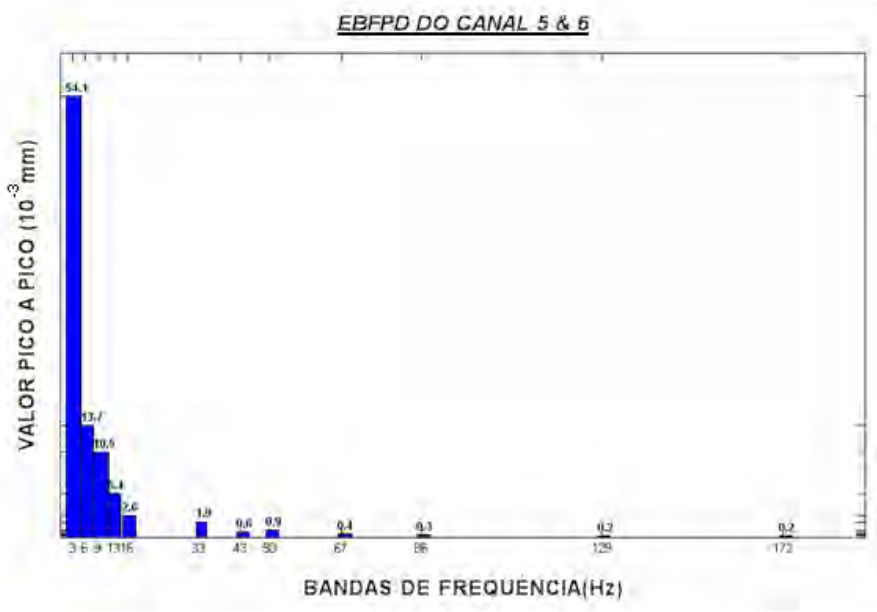


Figura 7.6 – Espectro de bandas de freqüência do mancal de escora da turbina kaplan utilizada como exemplo.

Como se pode notar a técnica EBFPD é um espectro de freqüências com poucos pontos (no máximo 12) totalmente representativo da condição de funcionamento do equipamento. Através do uso dessa técnica conseguem-se a redução de pontos necessária para o uso de RNA's para o diagnóstico da condição da turbina.

7.2 APLICAÇÃO DA TÉCNICA EBFDP NA REDUÇÃO DE DADOS DE ENTRADA DE UMA REDE NEURAL

Como visto no tópico anterior, a técnica EBFDP reduz os dados de forma representativa. Dessa forma seus dados podem ser usados no treinamento e para obter diagnósticos provenientes de RNA's.

Antes dos dados característicos do EBFDP serem usados com entradas de uma RNA, os mesmos necessitam de um tratamento adequado. Um bom tratamento é a obtenção da assinatura do EBFDP através de sua normalização. Para isso todas as amplitudes relativas a cada banda são divididas pela amplitude referente à banda de rotação, ou seja, todas as amplitudes terão seu valor relativo (porcentagem) à amplitude da freqüência de rotação da máquina. A figura 7.7 ilustra o pré-processamento da EBFPD da turbina kaplan citada anteriormente.

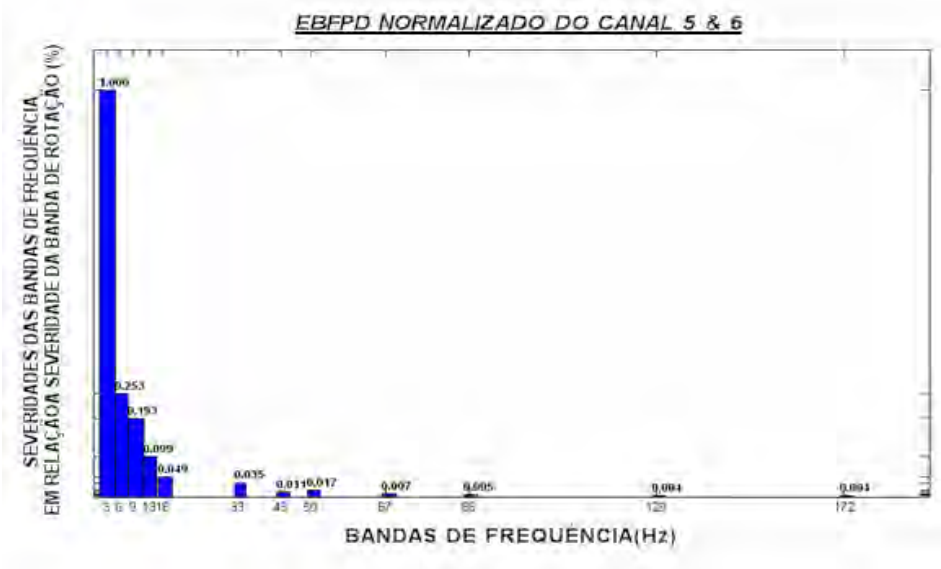


Figura 7.7 – Espectro de bandas de freqüência normalizado do mancal de escora da turbina kaplan utilizada como exemplo.

A equação que descreve a normalização adotada para o sinal é:

$$SE_i = \frac{SB_i}{SBR} \tag{7.1}$$

Onde:

i: Enésima banda do sinal;

SE: Sinal de entrada utilizado na rede neural;

SB: Severidade da banda;

SBR: Severidade da banda de rotação.

Após sofrer a normalização, os dados provenientes da EBPDF após o processo de pré-processamento podem ser usados como o sinal de entrada da rede neural. Faz-se aqui uma ressalva, os dados pré-processados (ou normalizados) só serão usados como dado de entrada da RNA, ou seja, somente serão usados para qualificação da falha (detecção da falha por intermédio da rede). O sinal original (amplitudes originais da banda do EBFPD) é "plotado" para análise do usuário (quantifica-se a falha pelo nível global do sinal e níveis locais das bandas de freqüência).

Neste trabalho utilizou-se de ferramentas gráficas para demonstrar o procedimento de pré-processamento do sinal somente para fazer comparações de amostras de sinais adquiridas em condições reais e de sinais simulados utilizados para o treinamento das RNAs. Todo esse procedimento será discutido detalhadamente no tópico 7.3 onde se aborda o treinamento da rede.

Considere agora o sinal da mesma turbina, mas com a falha de desalinhamento conforme mostra o espectro de freqüências da figura 7.8 e 7.9 relativas ao sensor montado na direção vertical (canal 5) e o sensor montado na direção horizontal (canal 6) respectivamente.

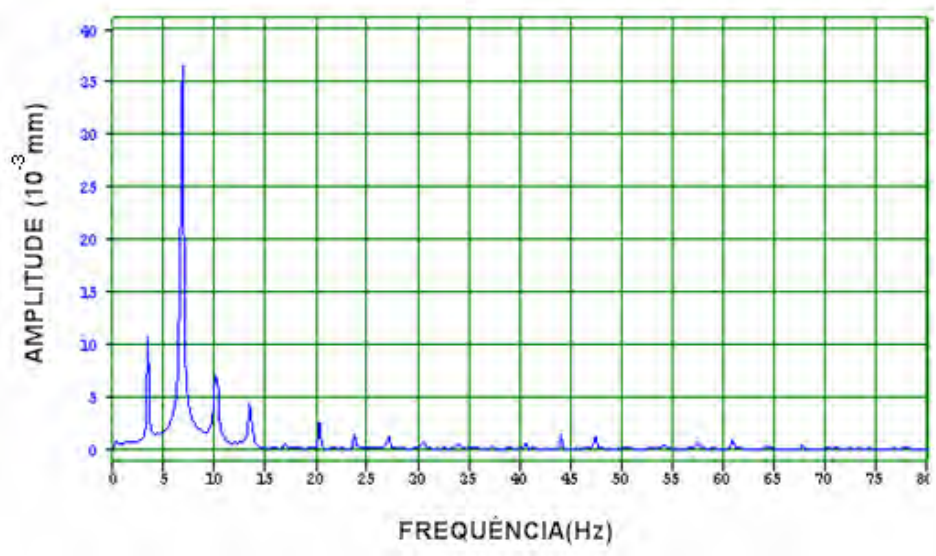


Figura 7.8 – Espectro de freqüência do sinal de falha devido ao desalinhamento adquirido na direção horizontal no mancal escora da turbina kaplan usada para exemplificar a técnica da EBFPD.

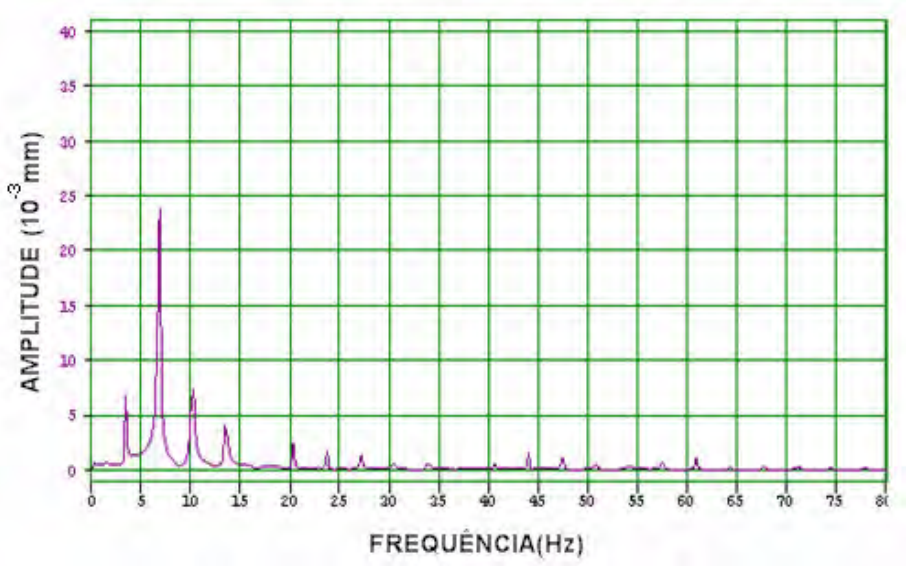


Figura 7.9 – Espectro de freqüência do sinal de falha devido ao desalinhamento adquirido na direção vertical no mancal escora da turbina kaplan usada para exemplificar a técnica da EBFPD.

Descrevendo de modo grosseiro, pode-se dizer que o defeito de desalinhamento pode ser detectado pela presença mais significativa da amplitude do primeiro harmônico da freqüência de giro do eixo visualizada no espectro de freqüências (ver mais detalhes sobre

esse defeito no capítulo 5) e logo, como a segunda banda de freqüência é representativa do primeiro harmônico da freqüência de giro, este terá a maior amplitude no EBFPD. Aplicando a técnica EBFPD para este sinal pode-se obter o espectro de bandas conforme ilustrado na figura 7.10.

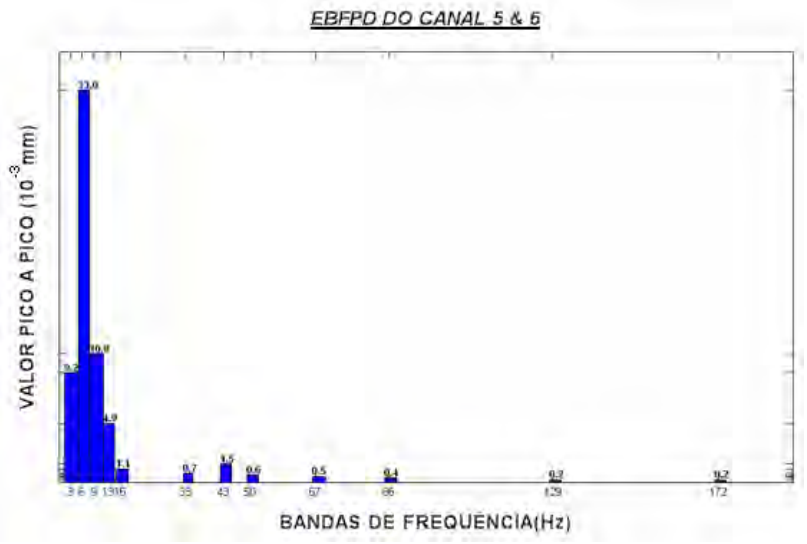


Figura 7.10 – Espectro de bandas de freqüência do defeito de desalinhamento apresentado pela turbina kaplan

Após o pré-processamento tem-se a saída conforme mostrada na figura 7.11.

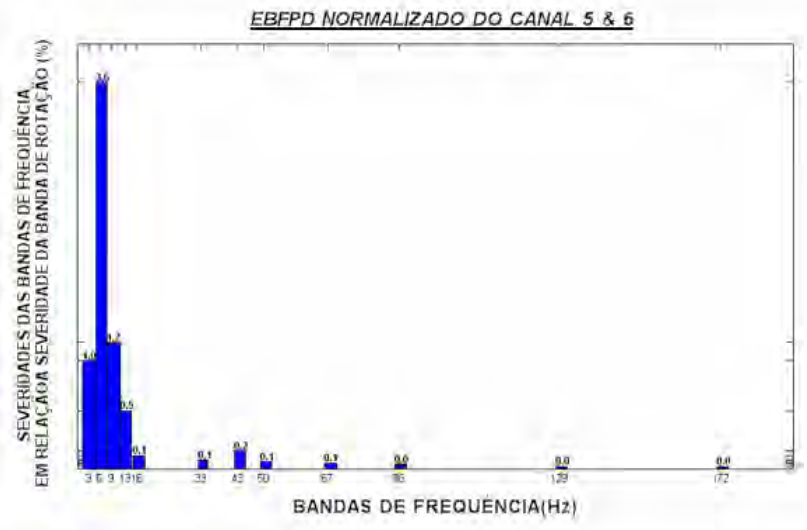


Figura 7.11 – Sinal pré-processado do espectro de bandas de freqüência do defeito de desalinhamento apresentado pela turbina kaplan

Como pode ser notada, a "forma" ou características do espectro de bandas também sofre alterações conforme o surgimento de um problema, e.g. desalinhamento, isto porque, toda falha afeta diretamente o comportamento dinâmico da máquina e sendo as bandas representativas do estado de funcionamento, elas mudarão de acordo com o tipo de falha. Dessa maneira é possível obter um diagnóstico proveniente de uma rede neural de maneira rápida e segura.

7.3 TREINAMENTO DA REDE NEURAL E A APLICAÇÀO DA MESMA NA DETECÇÃO E DIAGNOSE DAS FALHAS EM MÁQUINAS ROTATIVAS DO TIPO TURBINA HIDRÁULICA.

Após a escolha da técnica e quais dados serão utilizados como entrada na rede é necessário agora um algoritmo que defina de maneira correta um determinado número de conjunto de dados esperados tanto para a condição ótima de funcionamento e a condição ou condições de falha. Para isso foram desenvolvidas rotinas computacionais em Matlab que simulam os dados da EBFPD para ambas as condições. Para exemplificar o funcionamento dessas rotinas continuar-se-á o exemplo da turbina kaplan descrita previamente.

Primeiramente se definirá de que forma a rede é montada para a detecção das condições da máquina. Não existe somente uma rede neural responsável pela detecção da condição, mas sim, uma cadeia de RNA's conforme ilustra a figura 7.12.

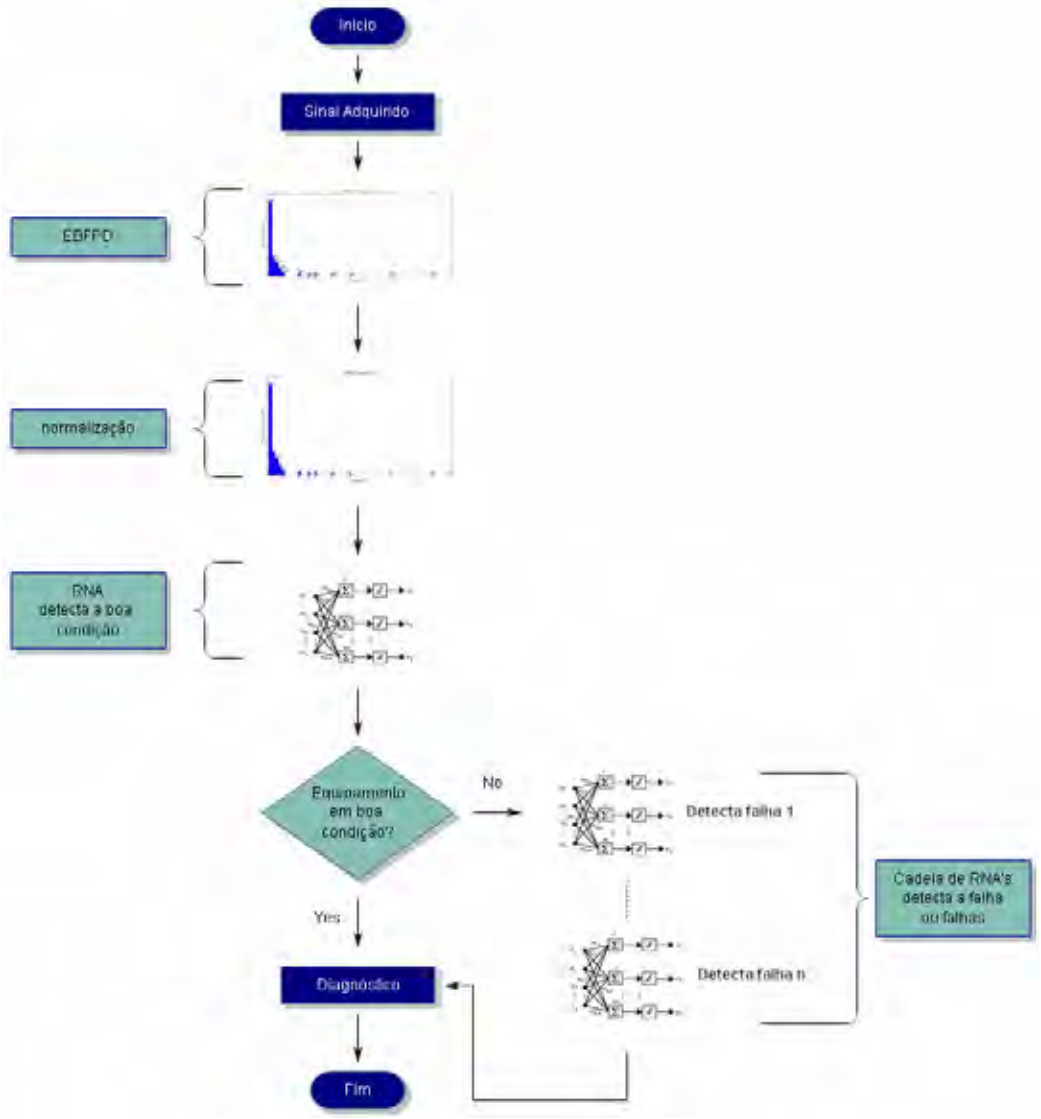


Figura 7.12 – Algoritmo global da rotina responsável pelo diagnóstico automático da condição do equipamento utilizando a técnica EBFPD e uma cadeia de RNA's

Para o treinamento e diagnóstico das RNA's é exigido no mínimo 3 pontos representativos, ou seja, 3 amplitudes de bandas de freqüência. Para a RNA responsável pela condição boa do equipamento obtém-se uma melhor resposta de saída se usados mais de 6 pontos. Para todos os casos pode-se definir uma certa porcentagem de amplitude admissível em cada banda se comparada com a banda de rotação. Utilizando o exemplo da turbina kaplan citado anteriormente, definiu-se que a condição boa do equipamento se encontra quando as amplitudes das harmônicas da rotação estiverem abaixo de 30%, as bandas referentes a passagem das pás e sua primeira harmônica não podem extrapolar 7% e

o restantes das bandas não podem ultrapassar 2% se comparadas com a banda de rotação. Alguns dos sinais provenientes do "algoritmo treinador" para a condição boa são mostrados na figura 7.13 até a figura 7.19. Com o uso desse algoritmo obteve-se 100 (cem) grupos de dados esperados para o espectro de bandas de freqüência (ver apêndice A).

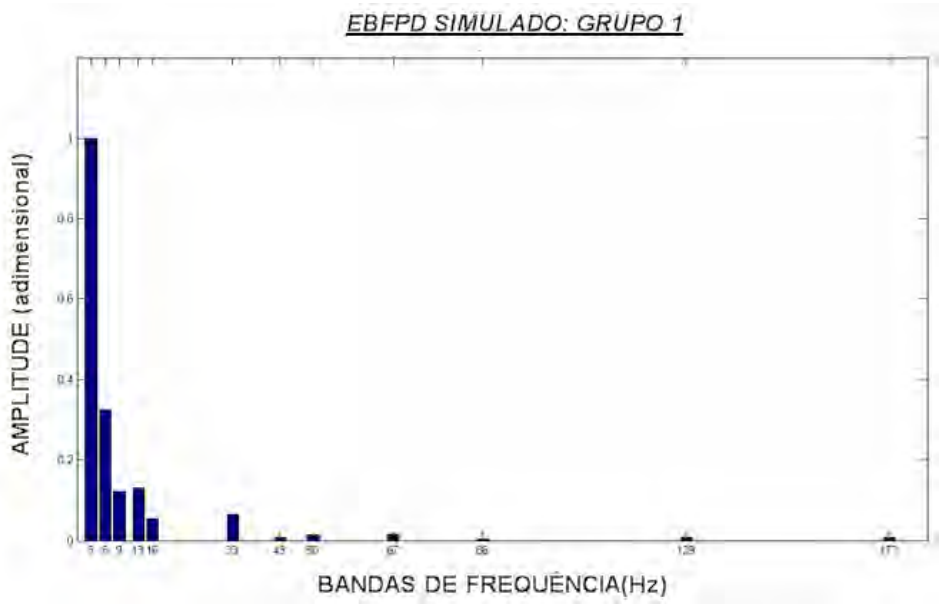


Figura 7.13 – Grupo 1 de bandas de freqüências provenientes do treinador

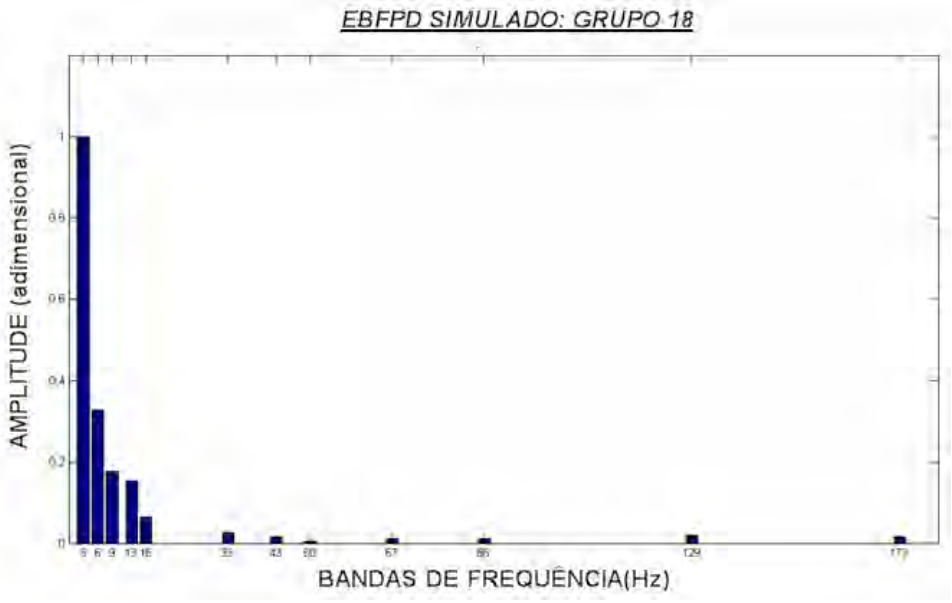


Figura 7.14 – Grupo 18 de bandas de freqüências provenientes do treinador

Figura 7.15 – Grupo 44 de bandas de freqüências provenientes do treinador

Figura 7.16 – Grupo 86 de bandas de freqüências provenientes do treinador

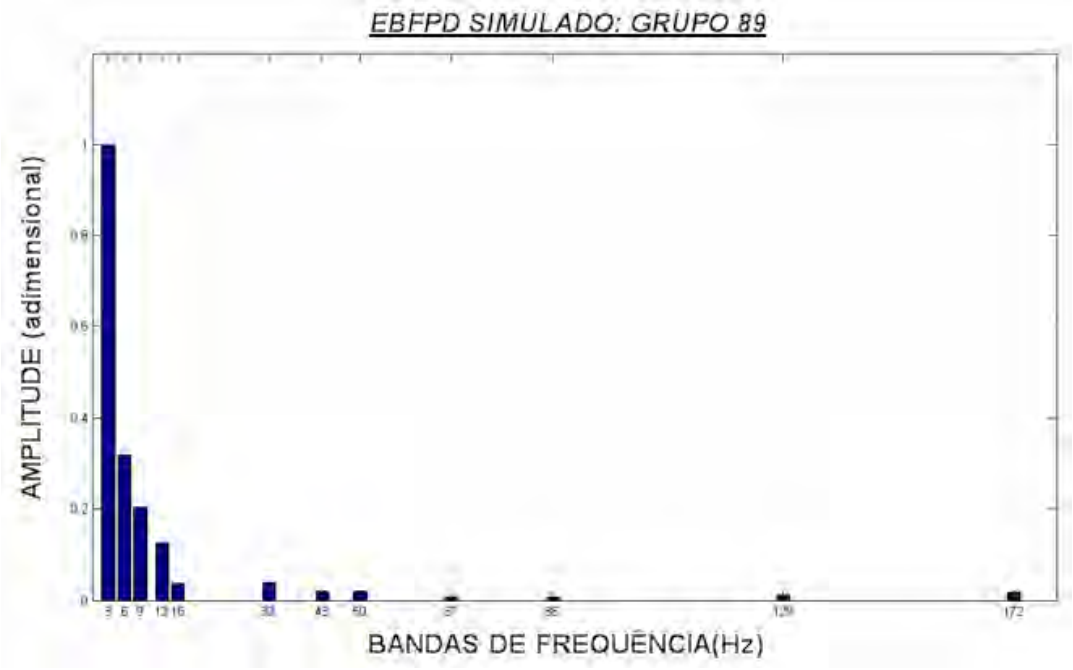


Figura 7.17 – Grupo 89 de bandas de freqüências provenientes do treinador

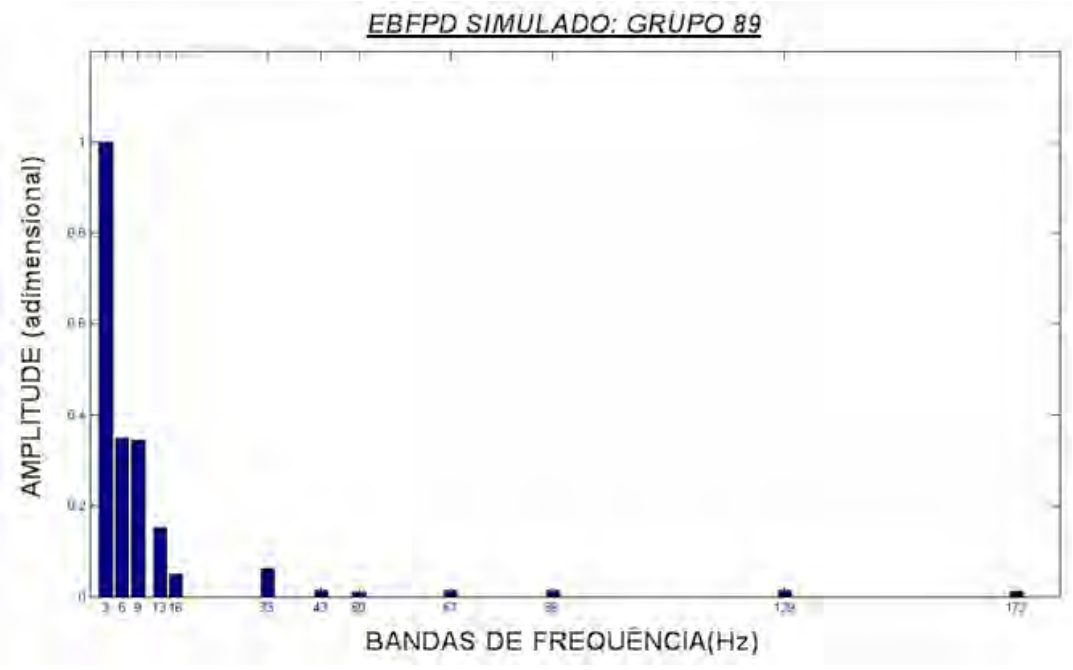


Figura 7.18 – Grupo 100 de bandas de freqüências provenientes do treinador

O número de grupos pode ser alterado para maior ou menor valor, dependendo do número de bandas e quanto mais fidedigno se deseja obter o treinamento. Qualquer entrada na rede diferente da usada para o seu treinamento acarretará também em uma saída diferente do padrão esperado. Para todos os casos descritos neste artigo foi utilizada a saída 1 (um) referente a saída verdadeira para o parâmetro da rede e 0 (zero) referente a saída falsa para o parâmetro da rede, ou seja, para a RNA que detecta a boa condição da máquina a saída 1 será verdadeira para a boa condição e 0 para a condição oposta. Para a RNA responsável pelo defeito terá uma saída 1 quando se tem a presença do defeito ao qual a rede foi treinada e 0 para algum outro defeito possível, por esse motivo existe uma cadeia de RNA's responsável pelo diagnóstico de falhas. Se nenhuma rede da cadeia detectar a falha, um diagnóstico sem a especificação da falha é emitido. Essa falha poderá ser incorporada a cadeia de RNA's. Isso se faz após sua detecção e análise correta dos parâmetros representativos que a caracterize e então, poderá ser desenvolvida uma rotina treinamento e aplica-la a uma nova rede responsável pelo seu diagnóstico.

Para o treinamento das falhas é feito um "desmembramento" das bandas de freqüência, ou seja, somente as bandas características da falha serão analisadas reduzindo assim o espaço amostral. Para exemplificar esse procedimento considere a turbina kaplan e as duas possíveis condições analisadas (em boa condição e desalinhamento). É sabido que as bandas representativas desse defeito são a de rotação e seus harmônicos. Dessa maneira as outras bandas são ignoradas como se a turbina não tivesse as pás do rotor e pás do distribuidor, restando somente à banda referente às freqüências relacionadas com a rotação do eixo. Outro "algoritmo treinamento" para a condição de falha é implementado para obter-se um conjunto de dados representativos da falha, nesse caso, o desalinhamento. Tem-se então, para esse caso, um grupo de entrada na rede de no máximo 4 (quatro) pontos. O caso de falha foi definido quando o valor das bandas ultrapassarem o limite de 30% se comparadas com a amplitude da banda de rotação. Para o primeiro harmônico a amplitude pode variar de 30 até 500%, o segundo harmônico pode variar de 30 até 200% e a terceira harmônica pode variar de 30 até 70%. Da figura 7.19 até a figura 7.24 mostra os dados simulados obtidos pelo algoritmo treinador do defeito de desalinhamento para este caso.

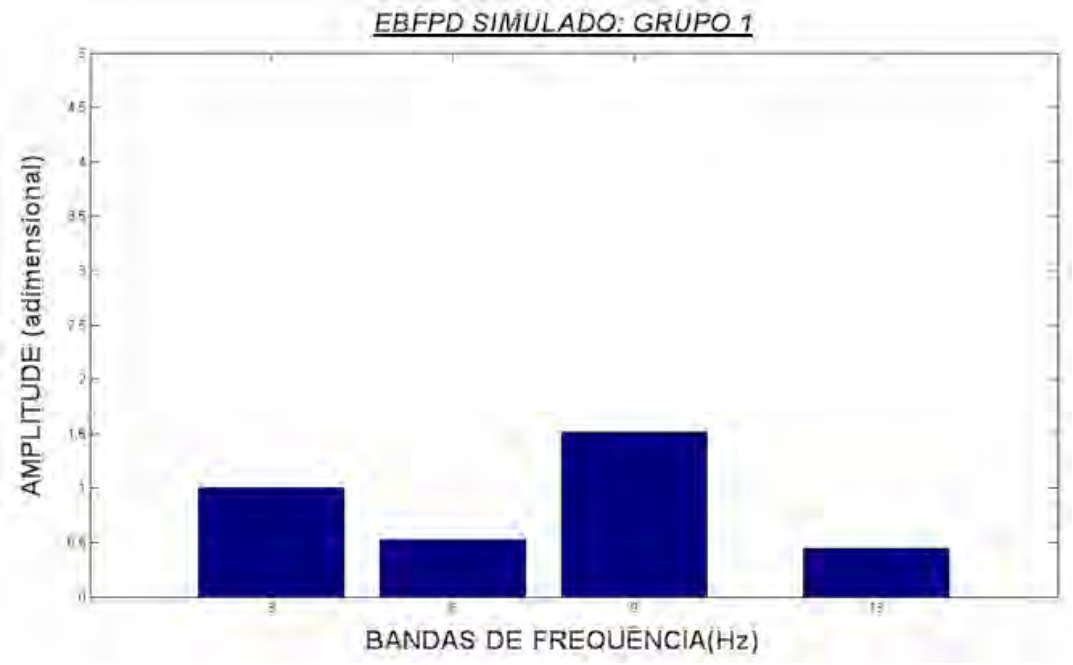


Figura 7.19 – Grupo 1 de bandas de freqüências provenientes do treinador falha

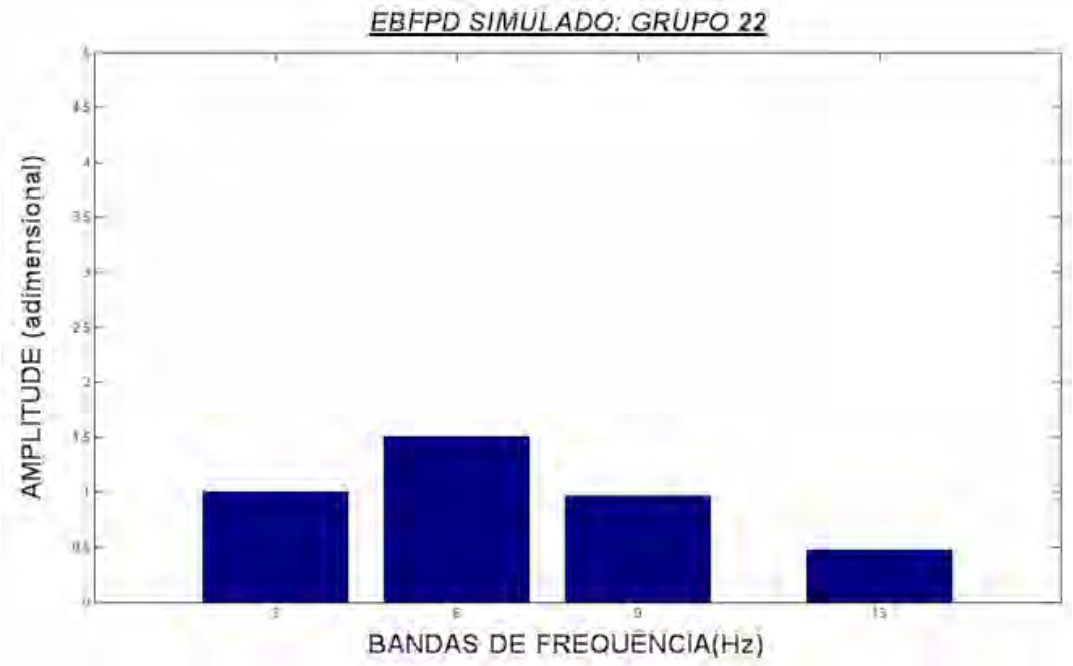


Figura 7.20 – Grupo 22 de bandas de freqüências provenientes do treinador falha

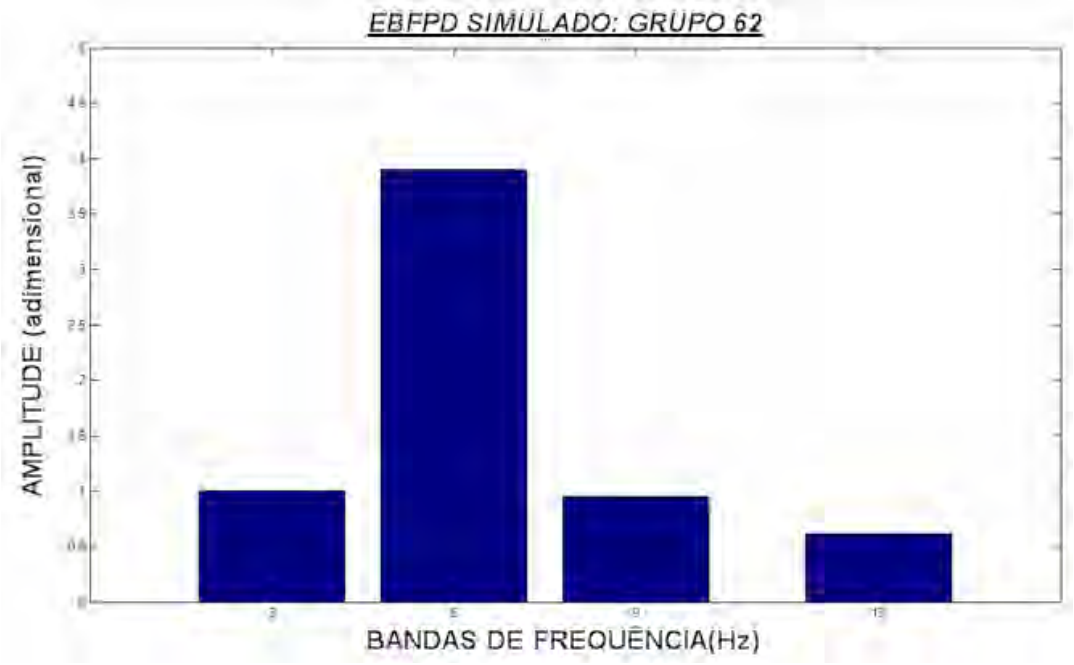


Figura 7.21 – Grupo 62 de bandas de freqüências provenientes do treinador falha

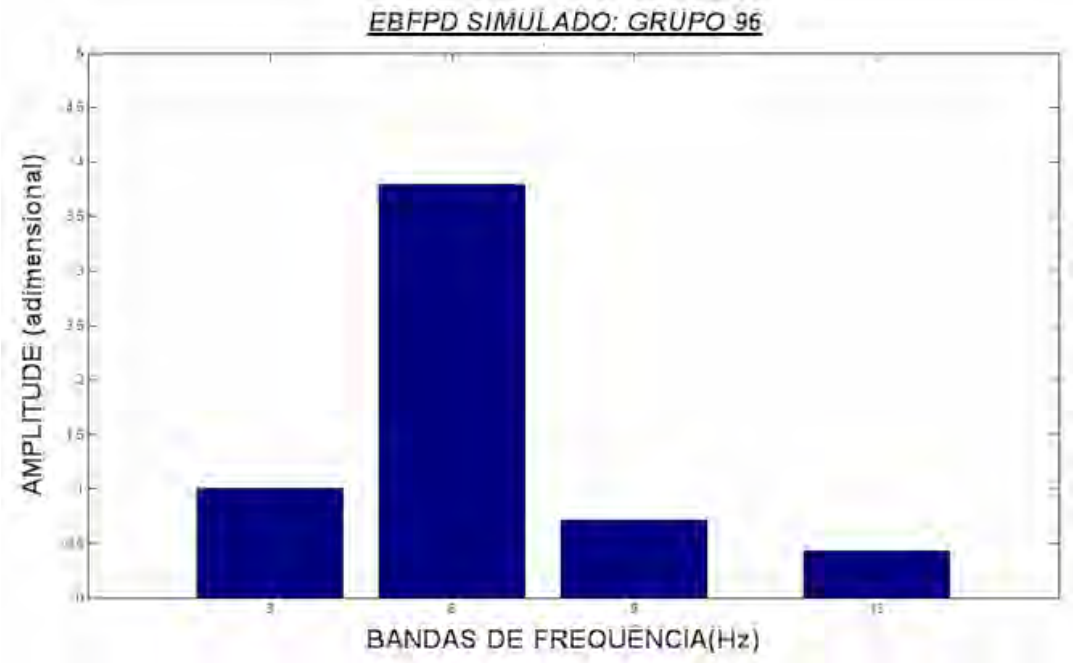


Figura 7.22 – Grupo 96 de bandas de freqüências provenientes do treinador falha

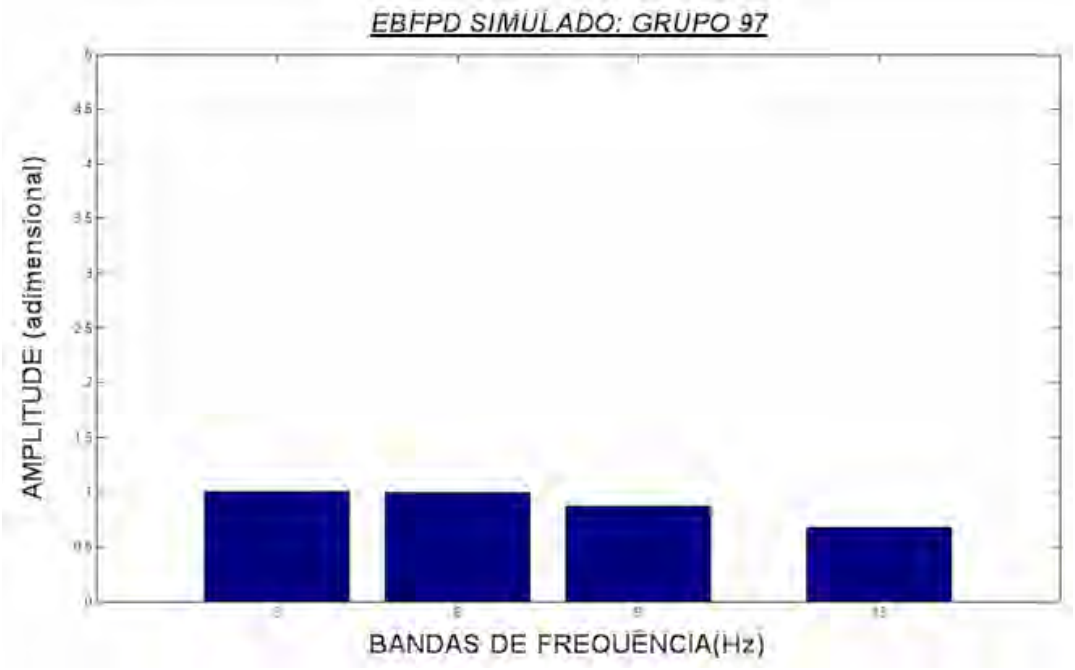


Figura 7.23 – Grupo 97 de bandas de freqüências provenientes do treinador falha

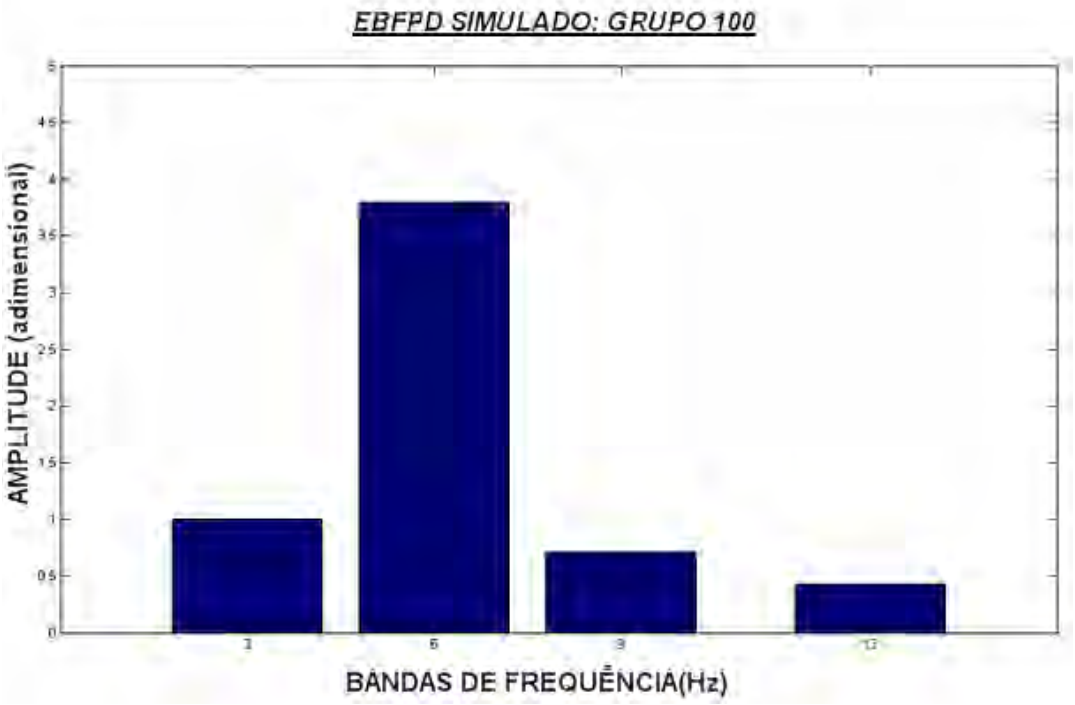


Figura 7.24 – Grupo 100 de bandas de freqüências provenientes do treinador falha

Todos os resultados das técnicas e treinamento das RNA's serão apresentados com detalhes no tópico referente aos resultados experimentais.

O algoritmo de treinamento e algumas linhas de comando podem ser consultados no apêndice E.

CAPÍTULO 8

TÉCNICA DO EBFPD APLICADA NA GESTÃO DA MANUTENÇÃO E PRODUÇÃO – SOFTWARE MODELO

Como visto no capítulo 2, existem diversas maneiras e métodos de gerenciamento de produção e manutenção. Todos utilizam diferentes filosofias em sua aplicação, mas todos em comum utilizam dados para executar tais procedimentos de forma segura e confiável tanto do ponto de vista econômico (tempo despendido de forma incorreta acarreta em perdas) quanto do ponto de vista estratégico (disponibilidade do equipamento).

Visando a otimização da gerência da manutenção e, consequentemente, da produção, bem como, uma melhor definição das bandas de freqüências significativas para monitoração da máquina, foi desenvolvido, em plataforma *MATLAB*®, um software modelo que utiliza as ferramentas de manutenção clássicas descritas no capítulo 4 aliadas a técnica do EBFPD e seu diagnóstico automático por meio de redes neurais artificiais. Tal software foi desenvolvido nesse ambiente de programação somente para comprovar a eficácia da técnica, e também, para facilitar a definição dos dados (limites das bandas, alarmes e outros parâmetros utilizado na construção do EBFPD), visto que, é uma técnica customizável, logo muito flexível.

O software modelo desenvolvido neste trabalho é um protótipo que denominamos IMSLVI (*Integrated Management System of the LVI*) utilizado para mostrar a aplicação da

EBFPD na gestão da manutenção tanto de forma qualitativa quanto quantitativa, visando diminuir o tempo despendido em reparos e manutenção preventiva de equipamentos essenciais a produção.

8.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DO SOFTWARE IMSLVI.

Para facilitar o uso e análise de dados, o software IMSLVI foi dividido em quatro ambientes distintos:

- Ambiente arquivo;
- Ambiente análise;
- Ambiente configuração;
- Ambiente monitoração.

A tela principal do IMSLVI é mostrada na figura 8.1.

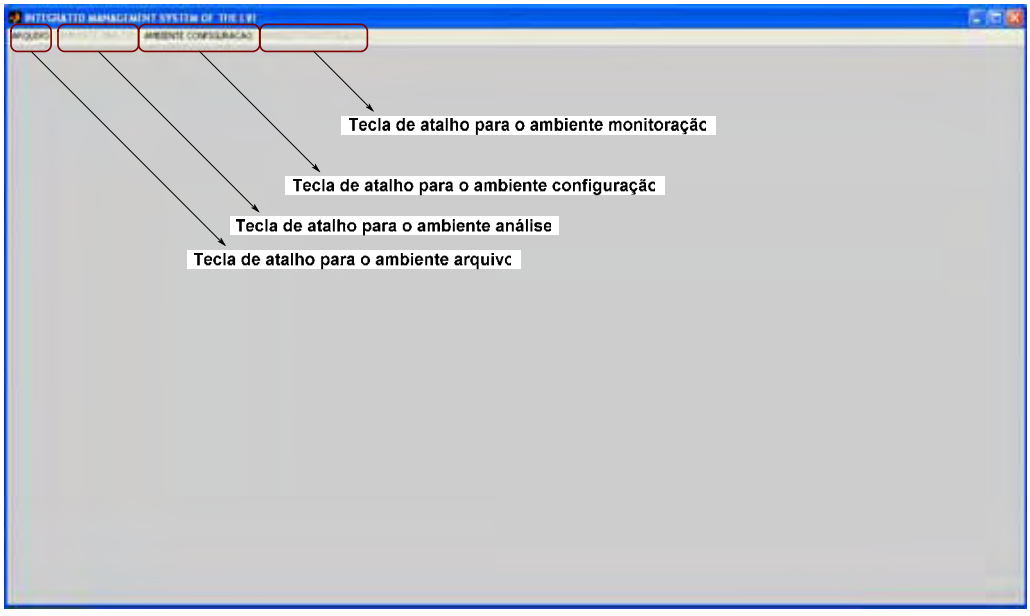


Figura 8.1 – Visão da janela principal do software IMSLVI

Todos os ambientes possuem suas peculiaridades. Descrevendo de maneira simplificada: o ambiente arquivo faz a leitura do sinal; o ambiente análise possui as

ferramentas clássicas de análise de sinais, por exemplo, Transformada Rápida de Fourier (*FFT*); no ambiente configuração pode-se definir todos os parâmetros necessário para a construção do EBFPD e, por fim, o ambiente monitoração emite o diagnóstico automático sobre a condição do equipamento pelo uso das RNA's. Cada ambiente em particular será descrito em detalhes nos tópicos seguintes.

8.2 AMBIENTE ARQUIVO

Esse ambiente é o mais simples do grupo, mas de vital importância. Nele o usuário pode carregar o sinal desejado para efetuar a análise.

O ambiente Arquivo possui as funções de leitura do sinal, salvar sinais processados, como por exemplo, sinais que foram modificados por uso de filtros, e sair do software IMSLVI. A figura 8.2 ilustra a janela de funções do ambiente arquivo. Sem a execução do mesmo (*download* do arquivo) o usuário fica impossibilitado de fazer uso dos ambientes análise e monitoração, visto que, ambos dependem do sinal proveniente do equipamento que se almeja a análise de dados.

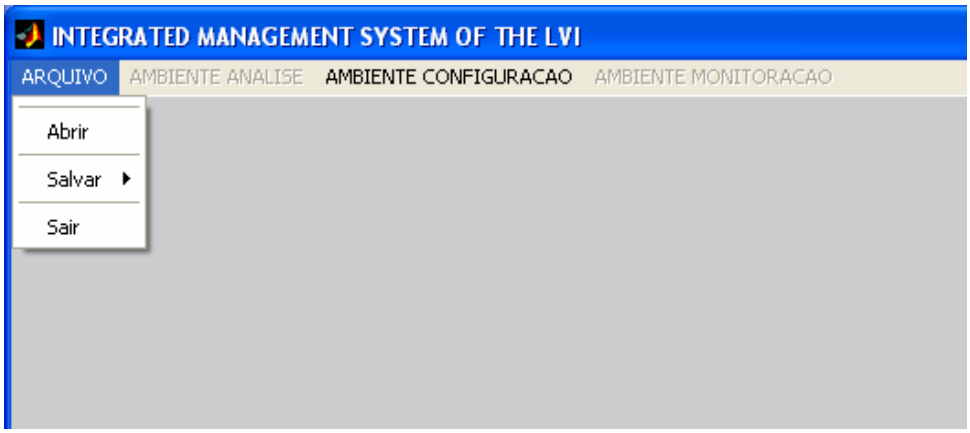


Figura 8.2 – Visão geral da janela referente ao ambiente arquivo

Utilizando o comando "abrir" o programa carrega o sinal definido pelo usuário. Todos os sinais utilizados nesse trabalho foram gravados em formato ASCII padrão proveniente da aquisição de sinais em turbinas hidroelétricas pelo uso do software *DASYLAB*® ou transformados em arquivos com extensão "mat" proveniente do software *MATLAB*® após o *download* do arquivo de sinal com extensão ASCII. Se qualquer outro

arquivo fora do padrão esperado for carregado resultará em erro no programa. Se houver a necessidade de diferentes formatos, podem-se desenvolver diferentes rotinas para o carregamento dos mesmos. A figura 8.3 e 8.4 ilustra a aplicação do comando "abrir" e o *download* do sinal habilitando o ambiente análise.

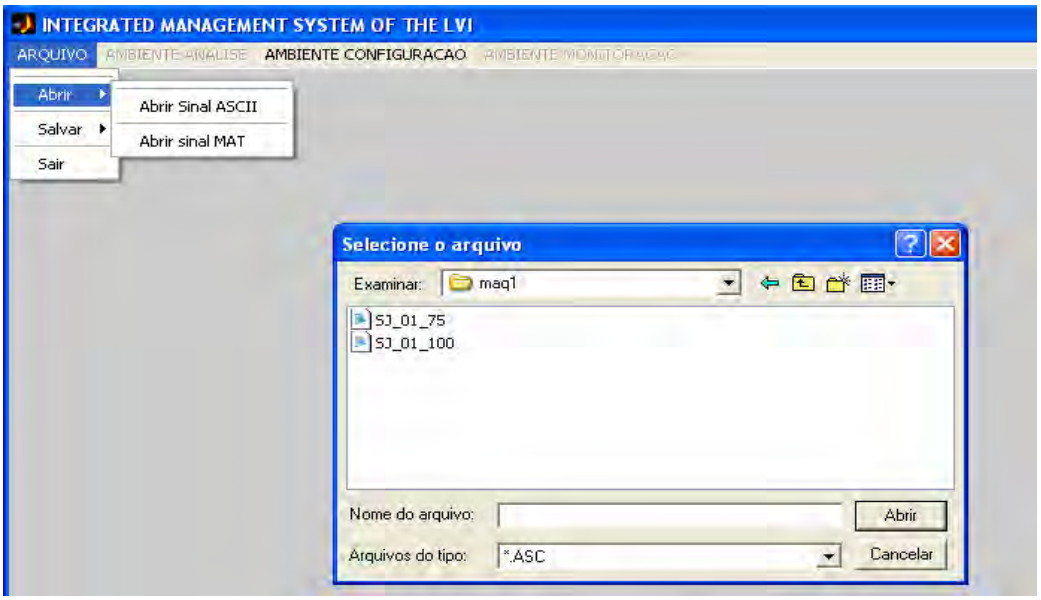


Figura 8.3 – Interface com o usuário do comando "abrir" localizado no ambiente arquivo.

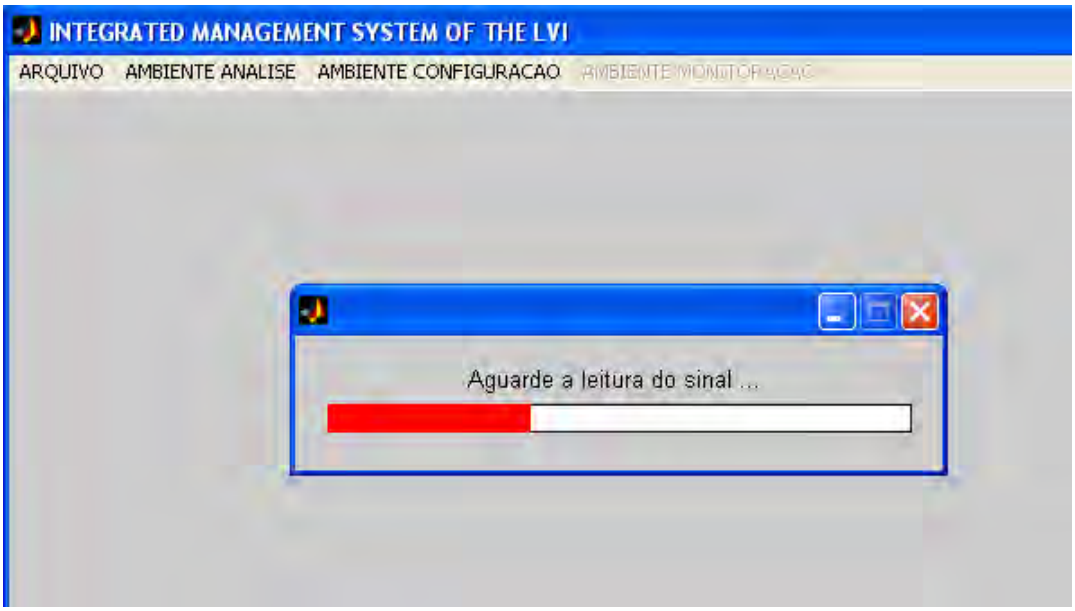


Figura 8.4 – Habilitação do ambiente análise após o carregamento do sinal.

Como pode ser notada na figura 8.4, o ambiente monitoração não foi habilitado, isto porque ainda não foi carregada a configuração referente a esse sinal.

Quando o sinal é carregado todos os parâmetros referentes à aquisição são armazenados na memória interna do programa. Tais parâmetros são:

- Data da aquisição;
- Taxa de aquisição;
- Número de pontos por bloco;
- Número de canais utilizados;
- Sinal de aquisição.

O comando "salvar" e "sair" são responsáveis respectivamente por gravar o sinal carregado em formato *MATLAB*® (editado ou não) e fechar todas as janelas do programa IMSLVI que estão abertas.

8.3 AMBIENTE ANÁLISE

Este ambiente possui as ferramentas clássicas de análise de sinais, como:

- Transformada rápida de Fourier (*FFT*);
- Calculo da severidade de vibração global *(RMS* e deslocamento eixo mancal);
- Demodulação;
- Média temporal síncrona;
- Diagrama de órbita.

Nesse ambiente também pode ser editado o sinal pelo uso de filtros que pode ser do tipo *butterworth*, *chebychev* e *bessel*.

A visão geral desse ambiente é mostrada na figura 8.5.

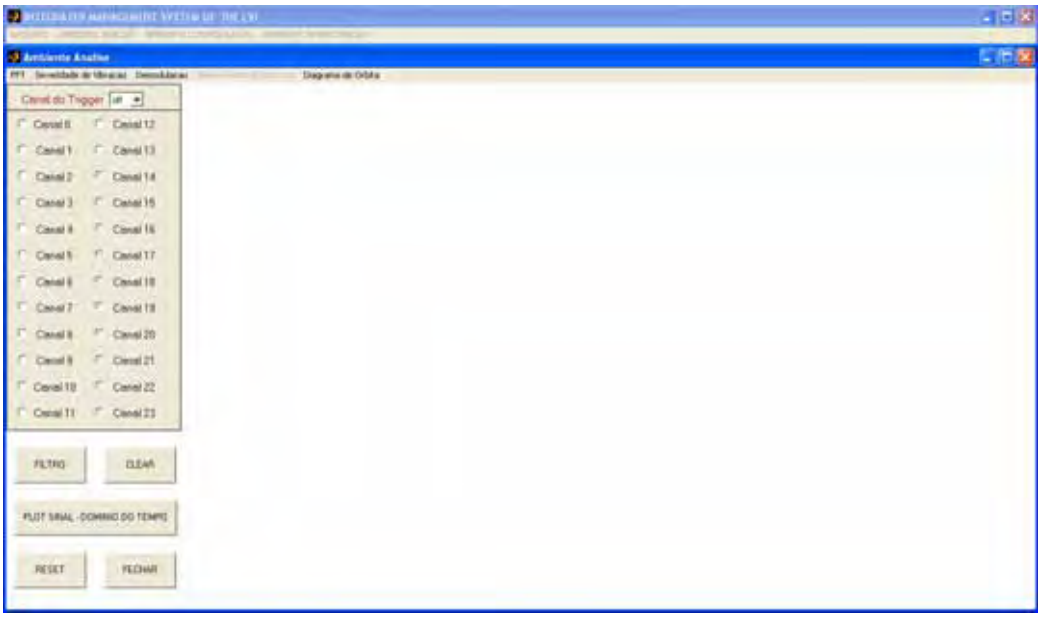


Figura 8.5 – Visão geral da janela principal de comando do ambiente análise.

Para validar os resultados provenientes desse ambiente far-se-á uma comparação dos mesmos com outros provenientes do software *DASYLAB*®. O sinal utilizado para exemplificar é o mesmo aplicado no capítulo anterior para descrever a técnica do EBFPD. As características construtivas da turbina são:

- Turbina do tipo kaplan;
- Rotação da turbina: 200 rpm
- Rotor com 5 pás;
- Possui 14 pás diretrizes.

O primeiro teste pretende comparar o sinal no domínio do tempo relativo aos canais 5 (proxímetro montado na direção vertical) e 6 (proxímetro montado na direção horizontal) que são sensores indutivos montados a montante da turbina conforme ilustra a figura 8.6.

Figura 8.6 – Sensor indutivo horizontal montado no mancal a montante da turbina kaplan (canal 6).

Para obter-se comparações referentes a técnica de *RMS* e média temporal síncrona fez-se a aquisição do sinal de vibração proveniente do mancal de entrada do multiplicador de engrenagens helicoidais do tipo espinha de peixe. Esse multiplicador possui seu eixo de entrada acoplado com a turbina. As características construtivas desse multiplicador são descrita como segue:

- RT: 1 : 3,55;
- Número de dentes do pinhão: 69;
- Número de dentes da coroa: 245.

Utilizou-se um acelerômetro montado perdendicularmente ao mancal de entrada (canal 8). O Multiplicador de engrenagens é mostrado na figura 8.7

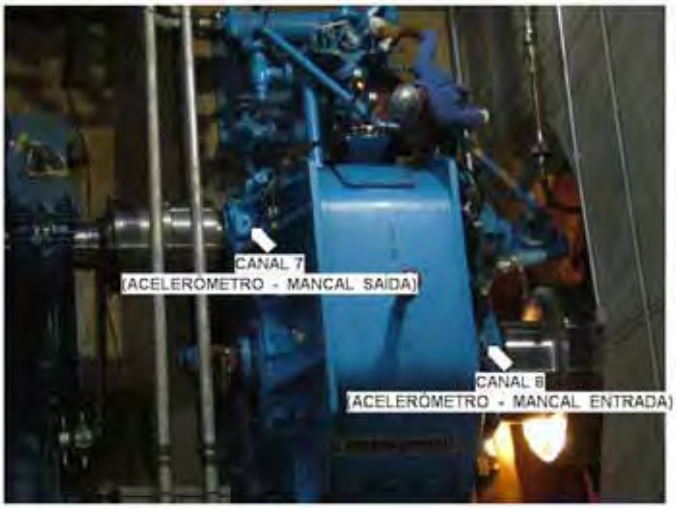


Figura 8.7 – Multiplicador de engrenagens helicoidais utilizado como fonte de medida de vibração para validação das ferramentas do ambiente análise.

Para efetuar o cálculo da média temporal síncrona foi montado perpendicularmente um *trigger* para efetuar a contagem do numero de pontos da aquisição por revolução do eixo. O *trigger* nada mais é que um sensor óptico que emite um sinal do tipo pulso cada vez que o sensor detecta a passagem no ponto tomado como referência.

O *worksheet* do *DASYLAB*® utilizado para validação das técnicas é mostrado na figura 8.8.

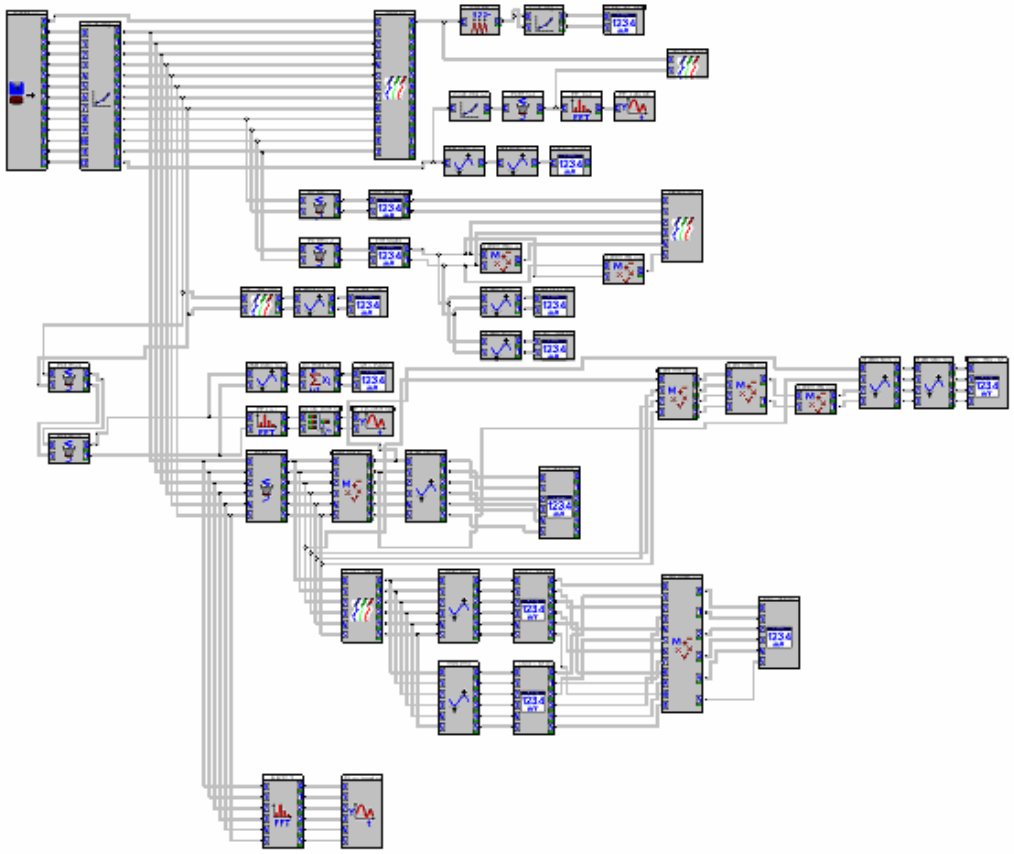


Figura 8.8 – *Worksheet* do *DASYLAB*® desenvolvido para efetuar as comparações dos resultados obtidos pelas ferramentas do ambiente análise.

A primeira etapa é observar o sinal dos sensores que serão analisados no domínio do tempo. A figura 8.9 e 8.10 ilustra o sinal do equipamento no domínio da freqüência pelo uso do *DASYLAB*® e ambiente análise respectivamente.

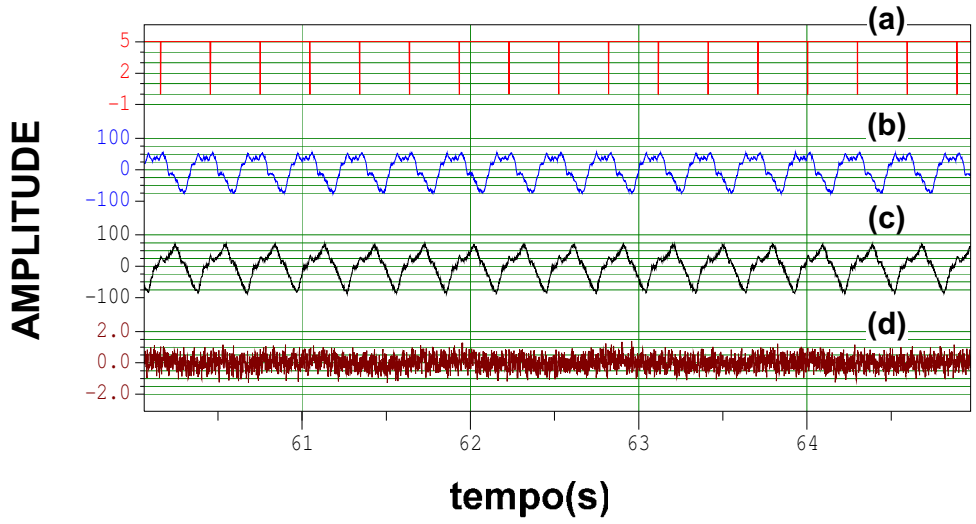


Figura 8.9 – Sinal no domínio do tempo proveniente do software *DASYLAB*®. (a) sinal do *trigger* (V). (b) sinal do sensor 5 – direção vertical (10^{-3}mm). (c) sinal do sensor 6 – direção horizontal (10^{-3} mm). (d) sinal do sensor 8 – vertical ao mancal de entrada do multiplicador (mm/s).

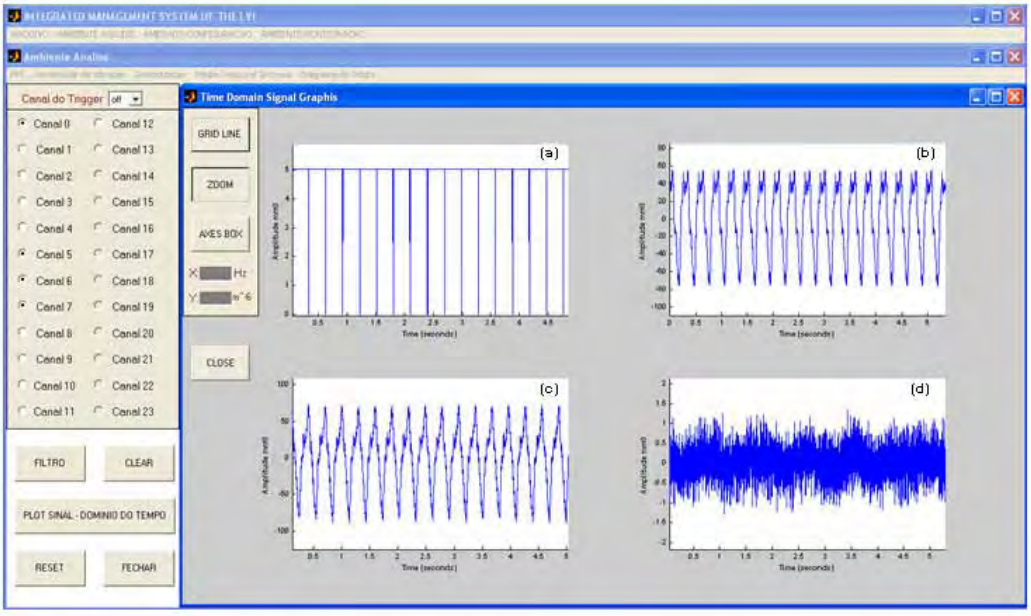


Figura 8.10 – Sinais no domínio do tempo utilizando o software IMSLVI. (a) Sinal do *trigger*. (b) sinal do sensor 5. (c) sinal do sensor 6. (d) sinal do sensor 8.

As características dos sinais são iguais provando que a aquisição do sinal neste ambiente está ocorrendo de forma correta. O resultado gráfico do espectro de freqüências

para os sinais dos sensores 5 e 6 provenientes do *DASYLAB*® e IMSLVI respectivamente é mostrado na figura 8.11 e 8.12 e para o sensor 8 temos as figuras 8.13 e 8.14 como segue.

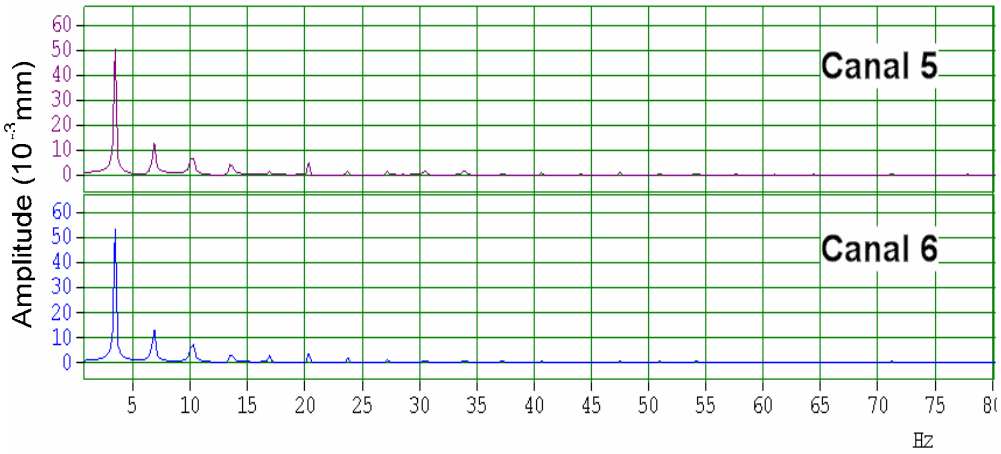


Figura 8.11 – Espectro de freqüências obtido com uso da Transformada rápida de Fourier dos sinais dos sensores 5 (vertical) e 6(horizontal) utilizando o software *DASYLAB*®.

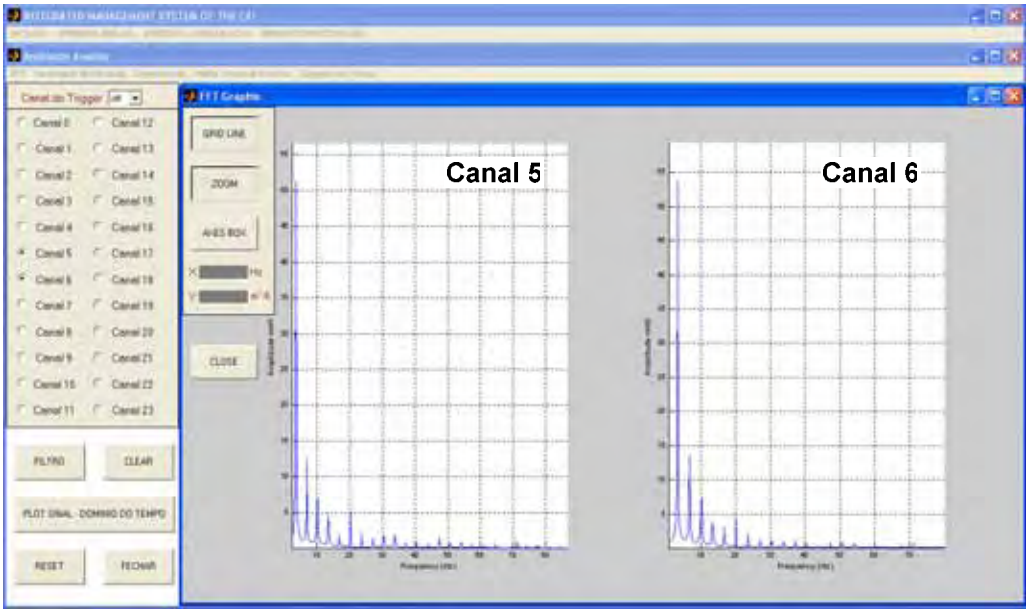


Figura 8.12 – Gráfico referente ao espectro de freqüências obtido com uso da *FFT* do sinal dos sensores dos canais 5(horizontal) e 6(vertical) utilizando o software IMSLVI.

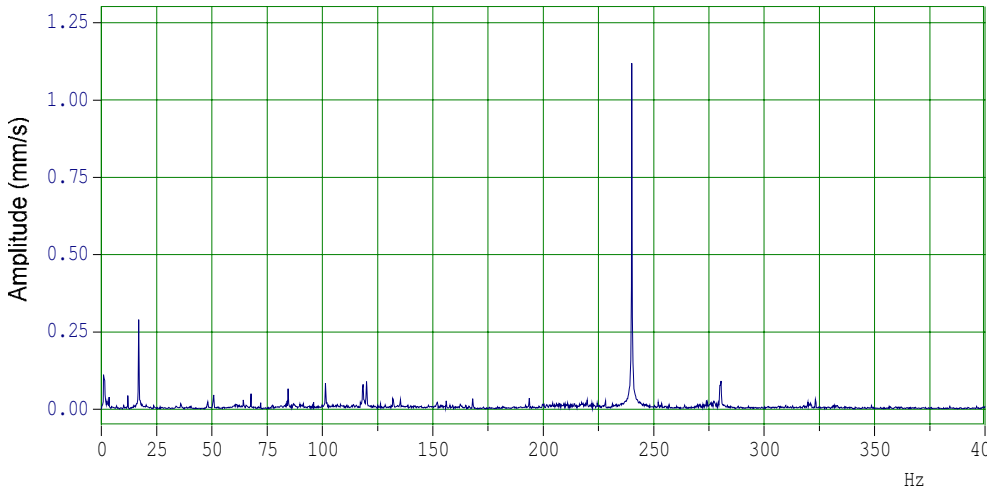


Figura 8.13 – Espectro de freqüências do sinal do sensor 8 (perpendicular ao mancal de entrada do multiplicador) utilizando o software *DASYLAB*®.

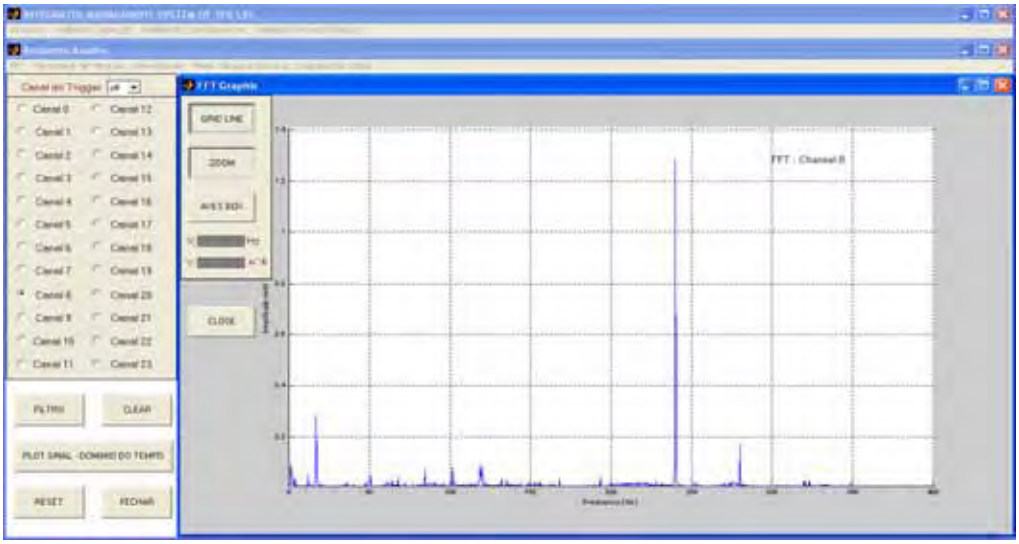


Figura 8.14 – Gráfico referente à *FFT* do sinal do sensor do canal 8 (perpendicular ao mancal de entrada do multiplicador) obtida por intermédio do software IMSLVI

Pode-se comprovar pelo gráfico e pelas amplitudes das principais freqüências que o cálculo da *FFT*, bem como, o seu gráfico por intermédio do software IMSLVI está de acordo com os resultados obtidos pelo uso do *DASYLAB*®. Para comprovar o funcionamento da média temporal síncrona utilizar-se-á o sinal do multiplicador de engrenagens. Ë esperado um sinal com menos pontos e ruídos após a utilização da técnica.

A figura 8.15 e 8.16 ilustra a aplicação de tal técnica e seu resultado no domínio do tempo e freqüência respectivamente.

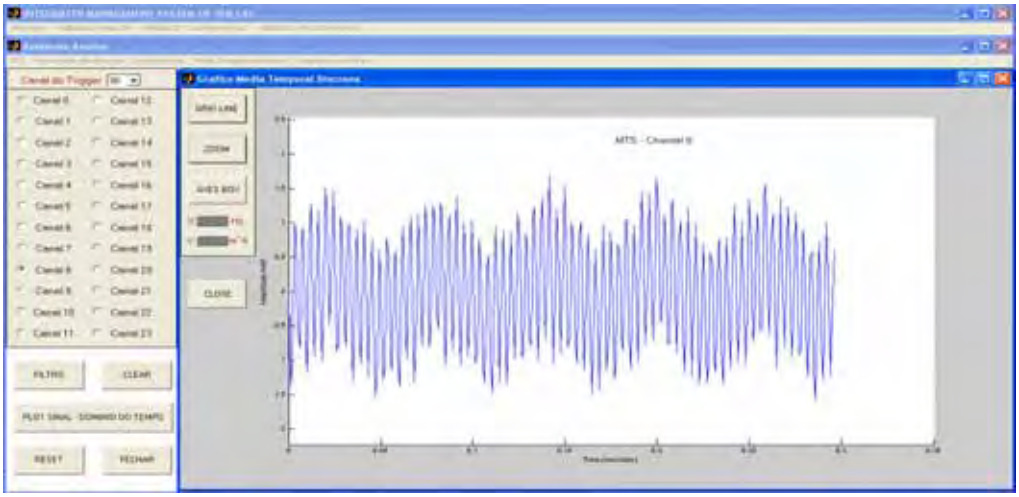


Figura 8.15 – Média temporal síncrona (MTS) no domínio do tempo – canal 8 (acelerômetro montado perpendicularmente ao mancal de entrada do multiplicador).

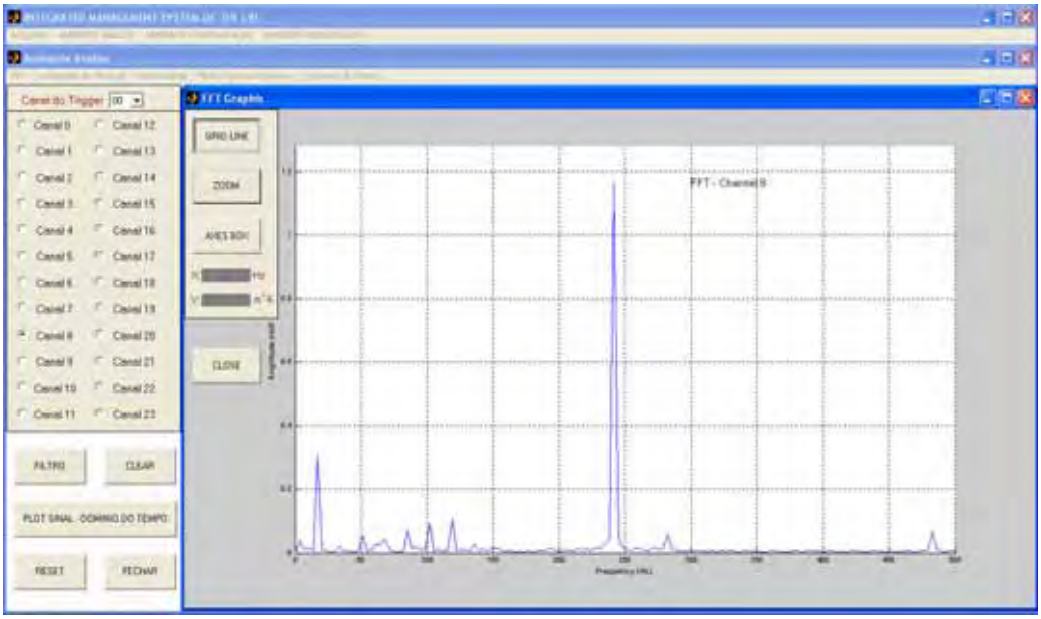


Figura 8.16 – Média temporal síncrona (MTS) no domínio da freqüência – (acelerômetro montado perpendicularmente ao mancal de entrada do multiplicador).

Para a severidade de vibração pode-se calcular o valor *RMS*, valor resultante pico a pico, máximo valor pico a pico e amplitude instantânea máxima. Para comparação será calculado o valor *RMS* e amplitude instantânea máxima. A figura 8.17 mostra esses valores calculados pelo intermédio do *DASYLAB*®.

A figura 8.18 e 8.19 ilustra visualmente e quantitativamente o cálculo do valor *RMS* e amplitude instantânea máxima respectivamente pelo uso do software IMSLVI.

Figura 8.17 – (a) Valor amplitude instantânea máxima do canal 5 (proxímetro na direção vertical) e 6 (proxímetro na direção horizontal) calculado pelo uso do software *DASYLAB*®. (b) valor *RMS* do canal 8 (acelerômetro montado perpendicularmente ao mancal de entrada do multiplicador) calculado pelo uso do software *DASYLAB*®.

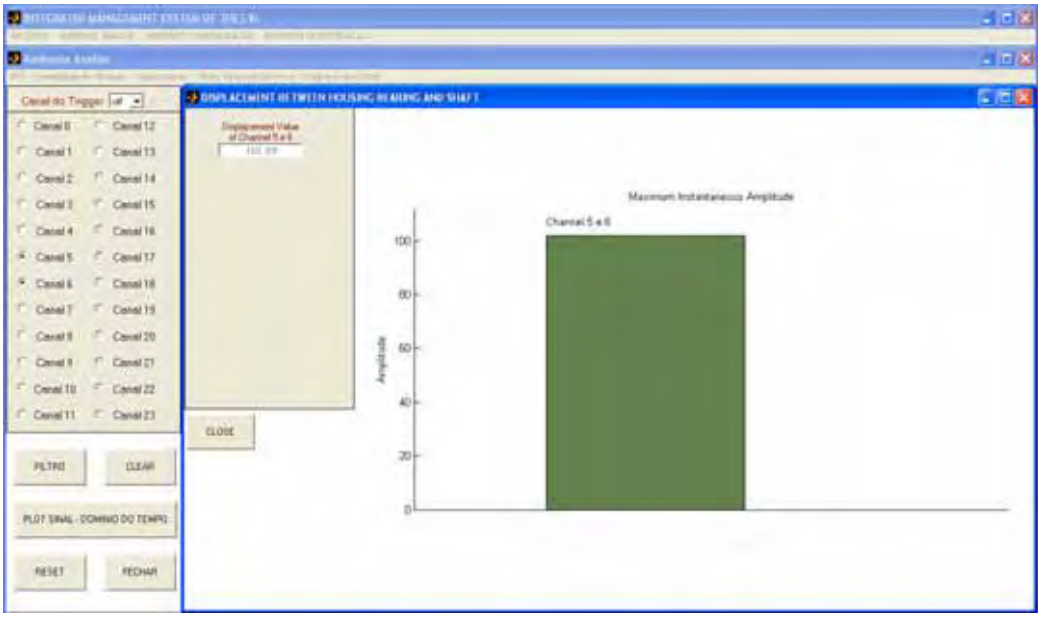


Figura 8.18 – Valor amplitude instantânea máxima do canal 5 (proxímetro na direção vertical) e 6 (proxímetro na direção horizontal) calculado pelo uso do software IMSLVI.

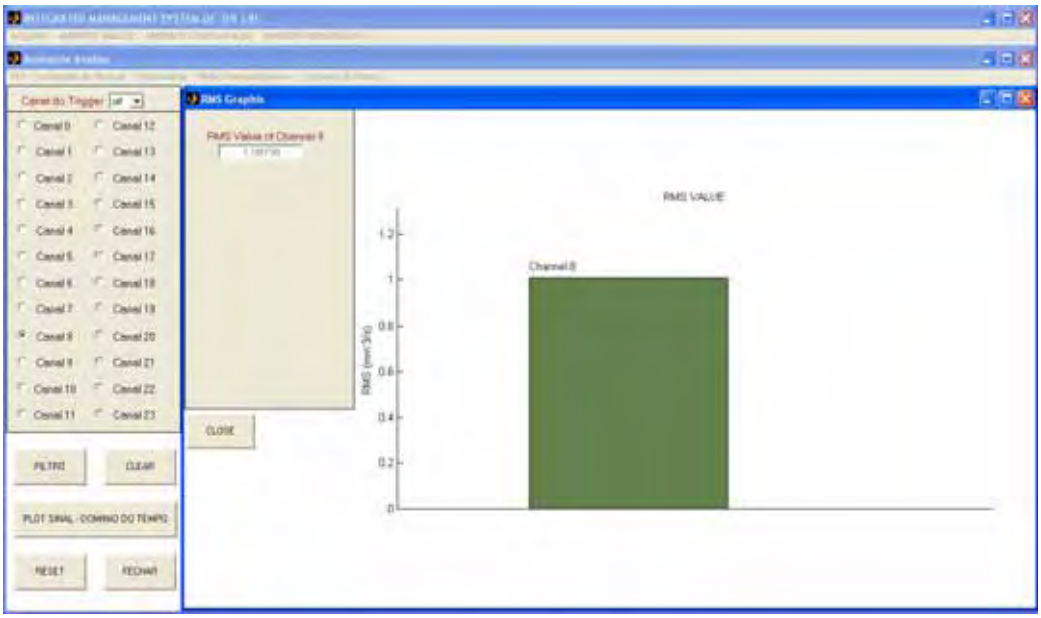


Figura 8.19 - Valor *RMS* do canal 8 (acelerômetro montado perpendicularmente ao mancal de entrada do multiplicador) calculado pelo uso do software IMSLVI

A pequena variação entre os valores está relacionado a lógica empregada em cada programa, mas pode-se notar que tal variação é bem menor que 1% comprovando que o calculo das severidades de vibração está correto e pode ser utilizado como base.

Para o cálculo do diagrama de órbita far-se-á o uso do filtro do tipo *butterworth*, passa-banda em torno da freqüência de giro do eixo conforme ilustra a figura 8.20. A figura 8.21 mostra o espectro de freqüências do sinal filtrado comprovando o funcionamento da rotina filtro. A figura 8.22 e 8.23 representa o diagrama de órbita dos canais 5 e 6 do IMSLVI e *DASYLAB*® respectivamente após o uso de filtros.

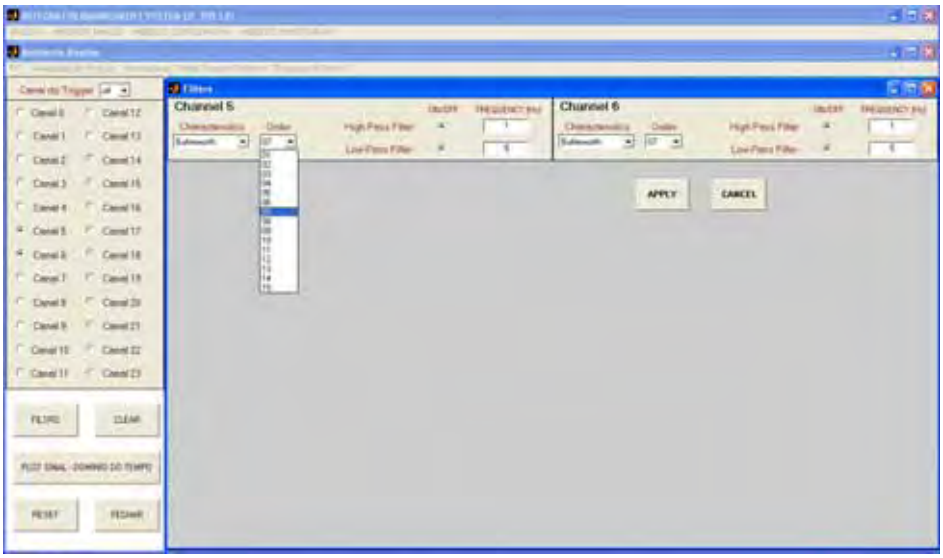


Figura 8.20 – Filtro aplicado aos canais 5 (proxímetro na direção vertical) e 6 (proxímetro na direção horizontal) para o cálculo do diagrama de órbita.

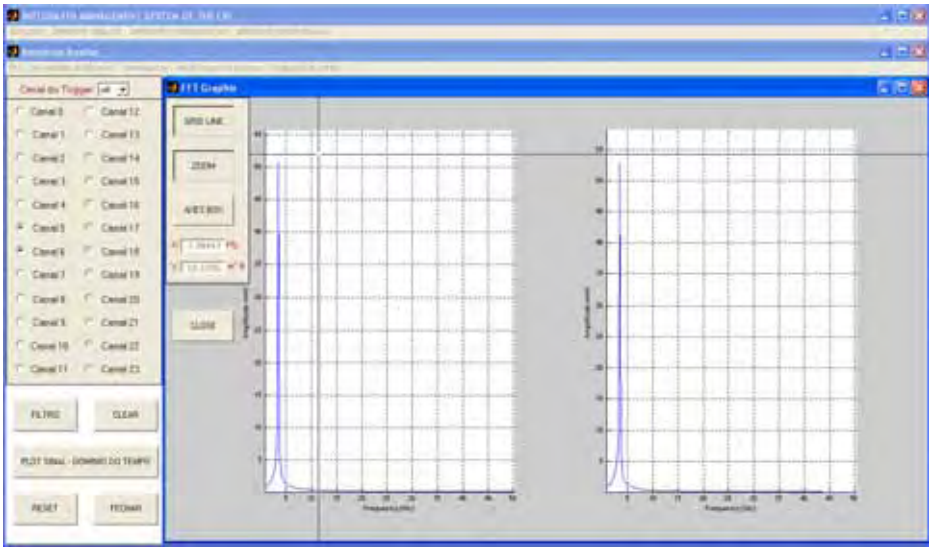


Figura 8.21 – Resposta do filtro aplicado aos canais 5 (proxímetro na direção vertical) e 6 (proxímetro na direção horizontal) para o calculo do diagrama de órbita.

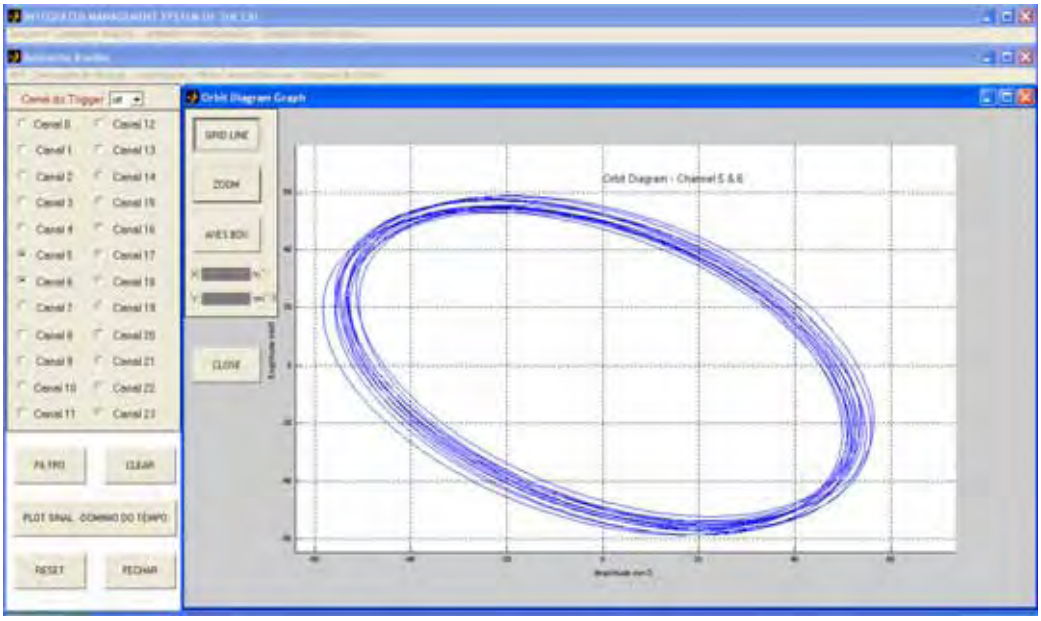


Figura 8.22 – Diagrama de órbita obtida pelo uso do software IMSLVI utilizando o sinal dos canais 5 (proxímetro na direção vertical) e 6 (proxímetro na direção horizontal)

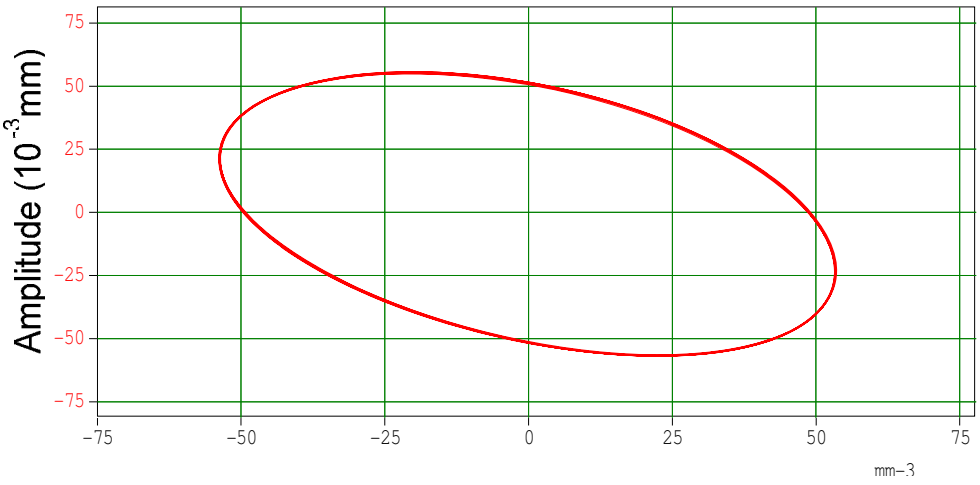


Figura 8.23 – Diagrama de órbita obtida pelo uso do software *DASYLAB*® (média de 5 blocos) utilizando o sinal dos canais 5 (proxímetro na direção vertical) e 6 (proxímetro na direção horizontal).

A pequena diferença entre os gráficos se deve ao fato do cálculo do número de médias, mas é possível notar que o "diâmetro" é aproximadamente o mesmo em ambos os

casos. Como o multiplicador não apresentou nenhum problema, não é possível notar a eficiência do método demodulação.

De maneira geral esse ambiente é utilizado para obtenção de dados significativos no gerenciamento do equipamento durante seu funcionamento, isto é, desde seu comissionamento até a sua parada para revisão. É possível montar relatórios e arquivos de histórico do equipamento ao qual está sendo aplicada a análise. Outro ponto importante é a utilização deste ambiente por um especialista onde o mesmo pode definir os parâmetros que serão utilizados na "construção" do EBFPD como larguras das bandas, valores de alarme e *trip*, entre outros.

8.4 AMBIENTE CONFIGURAÇÃO

Neste ambiente é onde se faz, literalmente, a construção da EBFPD e onde são aplicados todos os valores de alarmes. Primeiramente irão se definir quais os tipos de alarmes que poderão ser utilizados. Existem dois tipos de valores que podem ser utilizados como base: os valores globais e os valores locais. Os valores globais são aqueles relacionados com a severidade de vibração global do sinal. Os valores locais são valores relacionados com a severidade de vibração das bandas de freqüências. Definidos os tipos de valores existentes pode-se então definir as várias formas possíveis de alarmes e *trip* (emergência) para a quantificação da falha, são:

- Alarme e *trip* globais;
- Alarme e *trip* locais;
- Alarme dinâmico global – regra dos 3dB;
- Alarme dinâmico instantâneo – regra dos 3dB.

O alarme é um alarme automático, pré-ajustado no programa, que é emitido quando duas medidas de vibração diferem em 3dB. A função utilizada para o seu cálculo é dada pela equação 8.1.

$$20 \cdot \log_{10}\left(\frac{X_i}{X_{i-1}}\right) \geq 3 \qquad (8.1)$$

Onde:

X_i : medida de vibração atual;

X_{i-1} : medida de vibração anterior;

O alarme dinâmico global se dá quando é obtida uma diferença de 3dB entre a medida de vibração referente ao seu comissionamento (base) e a medida de vibração atual ou futura. O alarme dinâmico instantâneo se dá quando existe uma variação de 3dB ou mais entre duas medidas consecutivas, ou seja, a máquina está migrando rapidamente para um estado crítico de funcionamento.

No ambiente configuração pode-se carregar uma configuração já existente ou também se pode criar uma nova configuração. A figura 8.24 mostra a visão geral desse ambiente.

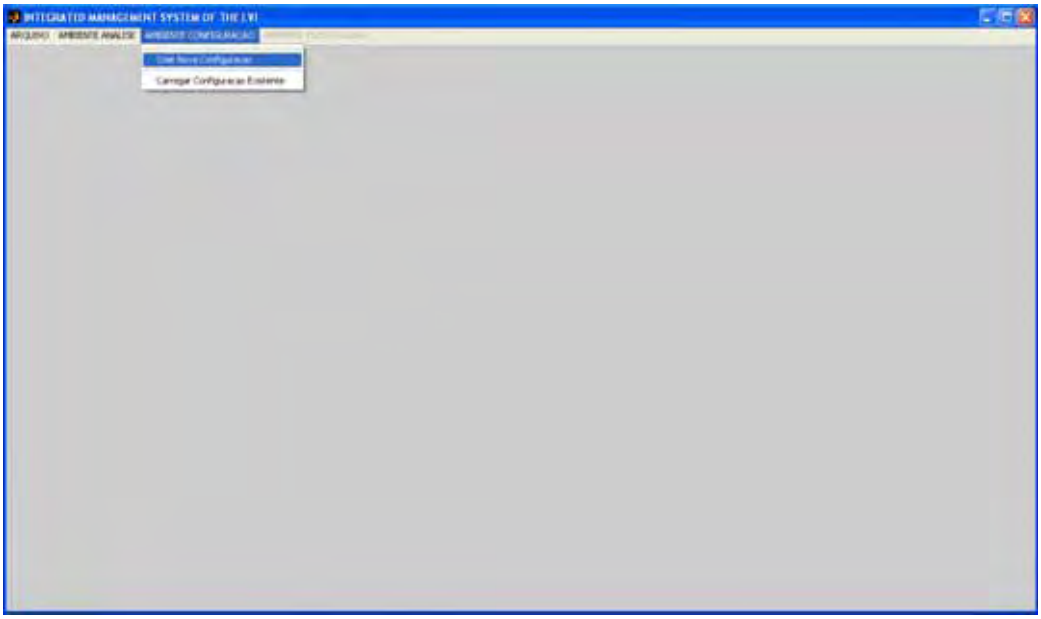


Figura 8.24 – Visão geral do ambiente configuração.

Neste ambiente é que se dá a customização do EBFPD, pois, todo o *set up* pode ser definido de acordo com as características construtivas da máquina que se pretende a análise.

Considerando o caso da turbina descrito anteriormente, far-se-á a análise da EBFPD utilizando-se a interface do software IMSLVI. A primeira janela é responsável pela

definição dos valores globais e número de bandas de freqüências que o EBFPD deve conter conforme ilustra a figura 8.25.

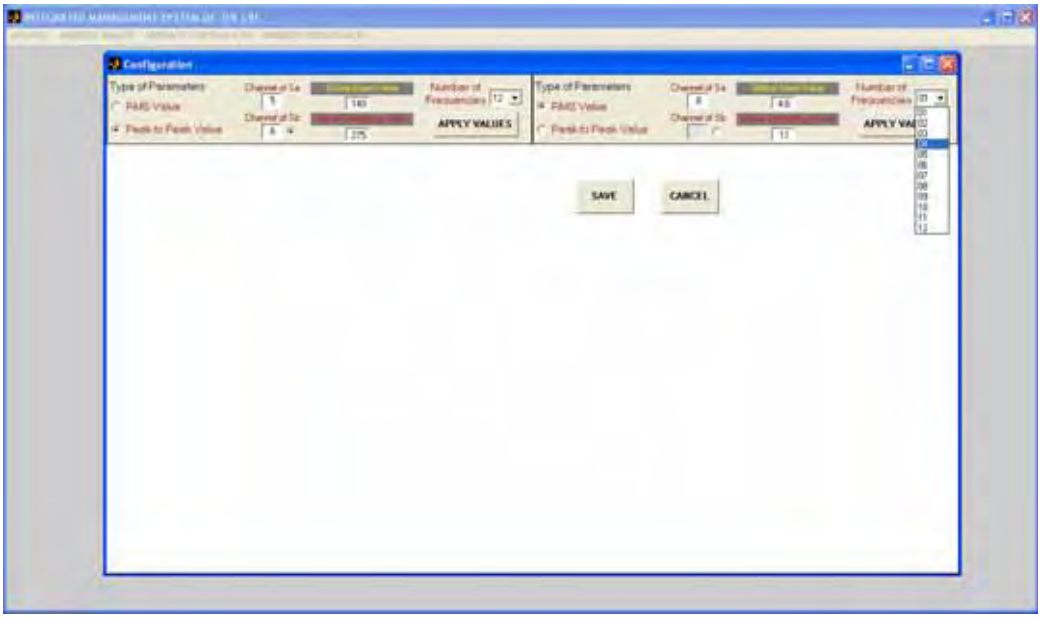


Figura 8.25 – Janela de *set up* dos valores globais e do número de bandas de freqüência que será utilizado na construção da EBFPD.

Como se pode notar, nesta etapa é feita a definição de qual tipo de severidade de vibração será calculada para o sinal (severidade global) e para as bandas de freqüências (severidade local). Também se faz a definição dos canais que serão usados na análise, valores do *trip* e alarme global, bem como, a definição dos números de bandas de freqüência. Todo o cálculo da severidade de vibração foi definido no capítulo 4. Como o intuito desse exemplo é a aplicação do EBFPD em turbinas de PCH's não será dada ênfase no resto dos seus componentes, como o multiplicador e o gerador.

Para esta aplicação exemplo, será calculado o valor pico a pico para os canais 5 e 6. Os valores globais de alarme e *trip* para a severidade de vibração segundo a norma ISO são respectivamente: 149 e $275*10^{-3}$mm. Serão definidas 12 bandas de freqüências para o canal 5 e 6 as quais foram descritas no capítulo 7 conforme segue nas tabelas 8.1 até 8.3:

Tabela 8.1 – Freqüências de interesse, alarme e *trip* relativos a rotação da turbina.

BANDAS DE FREQUÊNCIA RELATIVAS À FREQÜÊNCIA DE ROTAÇÃO DA TURBINA E SUAS HARMÔNICAS				
Freqüência (Hz)	Limite inferior da banda de freqüência (Hz)	Limite superior da banda de freqüência (Hz)	Alarme (µm)	Emergência (µm)
3,38	1,5	5	90	127
6,76	5	8	90	127
10,14	8	11,5	90	127
13,52	11,5	14,5	20	30

Tabela 8.2 – Freqüências de interesse relativas a rotação das pás do rotor.

BANDAS DE FREQUÊNCIA RELATIVAS À FREQÜÊNCIA DE ROTAÇÃO DAS PÁS DO ROTOR DA TURBINA E SUAS HARMÔNICAS				
Freqüência (Hz)	Limite inferior da banda de freqüência (Hz)	Limite superior da banda de freqüência (Hz)	Alarme (µm)	Emergência (µm)
16,9	15	18	4	6
33,8	32.5	35	4	6
50,7	49	52	1,5	2,2
67,6	66	69.5	1,5	2,2

Tabela 8.3 – Freqüências de interesse relativas a passagem das pás.

BANDAS DE FREQUÊNCIA RELATIVAS À FREQÜÊNCIA DE PASSAGEM DAS PÁS DA TURBINA E SUAS HARMÔNICAS				
Freqüência (Hz)	Limite inferior da banda de freqüência (Hz)	Limite superior da banda de freqüência (Hz)	Alarme (µm)	Emergência (µm)
43,13	42	45	1,1	1,7
86,26	85	88	1,1	1,7
129,39	128	131	1,1	1,7
172,52	171	174	1,1	1,7

Figura 8.26 – Janela de configuração local para o canal 5 e 6.

Como pôde ser notado o EBFPD pode ser totalmente customizável para qualquer máquina que se pretenda a análise, pois, todo o *set up* da técnica é completamente flexível podendo ser aplicado aos mais diversos tipos de máquinas rotativas.

8.4 AMBIENTE MONITORAÇÃO

Conforme descrito em tópicos anteriores, o EBFPD é utilizado tanto para quantificar quanto qualificar a condição de funcionamento da máquina. A quantificação se dá pelo uso das severidades locais e globais de vibrações. Já a qualificação é feita pelo diagnóstico automático de redes neurais artificiais utilizando os dados do EBFPD pré-processados. Nesse ambiente é possível analisar todos os tipos de severidades descritas, bem como, obter de forma visual o diagnóstico da máquina. A figura 8.27 mostra a visão geral desse ambiente para a configuração criada no tópico anterior.

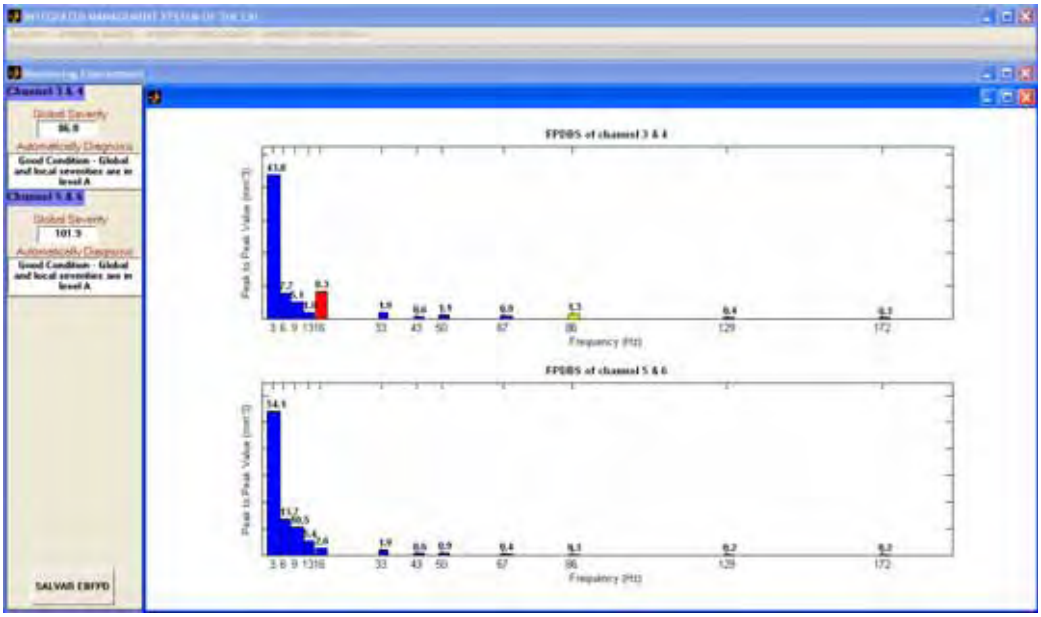


Figura 8.27 – Espectro de Bandas de Freqüências Pré-Definidas e sua utilização no IMSLVI.

O comando salvar EBFPD é utilizado para a gravação de histórico do EBFPD, onde tal dado será utilizado na emissão ou não do alarme referente a regra dos 3dB.

Dessa maneira se fecha completamente o ciclo estudo do sinal. O resultado é totalmente fidedigno da condição do equipamento e a forma visual de apresentação da EBFPD é de simples entendimento.

Após definido todos os ambientes do software IMSLVI e comprovado seu correto funcionamento, todos os exemplos descritos no próximo tópico utilizarão esse software em sua análise.

CAPÍTULO 9

APLICAÇÃO DA TÉCNICA DO EBFPD E RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados bem como as condições propostas para a análise da condição dinâmica de turbinas hidroelétricas pela técnica do Espectro de Bandas de Freqüência Pré-Definidas.

Foram utilizados quatro casos para a validação da técnica. Em todos eles os sinais foram adquiridos em grupos geradores de pequenas centrais hidroelétricas em comissionamento, ou, após a manutenção, dessa maneira sempre se tem duas situações distintas que são: equipamento em boas condições e o equipamento com falha.

As falhas que se pretendem com o diagnóstico pelas redes neurais são o desalinhamento e desbalanceamento, visto que, são as mais comuns encontradas em grupos geradores hidráulicos.

Como o sinal é adquirido em diferentes plantas haverá diferenças entre o tipo de turbina, entre as aplicações propostas, bem como, diferenças nas características construtivas. Com isso, poder-se-á mostrar a customização (flexibilidade) da técnica do EBFPD.

9.1 – REDE NEURAL UTILIZADA, SIMULADOR DE SINAIS PARA O TREINAMENTO E PADRÕES SEGUIDOS NA DEFINIÇÃO DE ALARMES E TRIPS.

Para aplicar o diagnóstico automático por intermédio de redes neurais utilizou-se nesse trabalho o *ToolBox neuralnetwork* do *MATLAB®*. Alguns testes foram realizados para definir qual seria o tipo de rede neural padrão. Seguiu-se então o *guide* do *MATLAB®* e algumas bibliografias como (Aguiar e Oliveira, 2007). Chegou-se a conclusão que o algoritmo *feed-forward backpropagation* seria uma boa opção para o nosso caso bem como as redes neurais probabilísticas, esta última utilizada para definir padrões.

Para o algoritimo *feed-forward backpropagation* é possível definir o número de camadas bem como os neurônios de cada camada. O tipo de treinamento e aprendizado também é fornecido. Seguindo o guia do *MATLAB®*, se optou fixar o aprendizado pelo algoritmo gradiente descendente com momento e variar o treinamento de três maneiras:

- BFGS método Quase-Newton;
- Resilente *backpropagation*;
- *Levenberg-Marquardt*.

Os dois primeiros métodos foram escolhidos segundo a bibliografia obtida no guia do *MATLAB®*, onde foi encontrada a recomendação de se utilizar esses dois primeiros métodos quando o algoritmo de RNA utilizado for *feed-forward*. O treinamento utilizando, o método de *Levenberg-Marquardt* (LM), é um dos mais rápidos atualmente, mas possui limitações quando aplicado a RNA do tipo *feed-forward*. O número de camadas escolhido é constante e igual a 4 (quatro) sendo uma camada de entrada, duas camadas intermediárias e uma camada de saída. O número de neurônios da camada de entrada sempre será igual ao número de entradas, e a camada de saída sempre possuirá um neurônio (uma única saída). O treinamento que melhor se adaptou aos dados de entrada e problemas apresentados foi o BFGS Quase-newton. O método Resiliente despende muito tempo no treinamento sendo que inúmeras vezes seus dados de saída não obtiveram a sensibilidade adequada para o diagnóstico e detecção das falhas. O método LM apresentou uma velocidade de aprendizado muito superior se comparada aos outros métodos de treinamento testados,

porém, na maioria dos casos seu treinamento não originou resultados satisfatórios para sua aplicação no diagnóstico de falhas utilizando o EBFPD.

A RNA probabilística é usada para classificação. O *MATLAB*® já possui uma configuração *default* para a mesma. Possui como saída valor binário, ou seja, assume 1 quando o sinal é compatível com o treinamento e 0 para o caso oposto. Apesar de parecer ideal para a nossa aplicação, esse tipo de rede não apresentou resultados satisfatórios na detecção de falhas utilizando dados da EBFPD.

Por fim, definiu-se que a rede padrão utilizada neste trabalho será do tipo *feed-forward* com o algoritmo de treinamento BFGS Quase-Newton e método de aprendizado de gradiente descendente com momento. A saída 1 (um) significa a detecção do parâmetro para o qual a rede foi treinada (boa condição ou falha). Com a utilização desse tipo de rede os valores não ficam limitados entre 1 e 0. Um outro ponto interessante dessa rede foi a variação do numero de neurônios da camada intermédia em relação a entrada aplicada. Se a entrada for elevada, como por exemplo, o máximo de pontos da EBFPD (12 pontos) o número de neurônios da camada intermediária não poderá ser muito discrepante do número de neurônios de entrada, ou seja, não existe uma regra definida para definição das características construtivas da rede, mas em nosso estudo a rede se mostrou apta à detecção da falha quando, o número de neurônios da camada intermediária ficou em torno de 45% maior que o número de neurônios da entrada. Para o caso da detecção da falha, ou seja, número de entradas em torno de 4 ou 5 pontos, as camadas intermediárias devem possuir pelo menos o dobro do número de neurônios se comparadas com a camada de entrada.

Outro ponto interessante é que a rede possui resultado satisfatório quando o número de neurônios das duas camadas intermediárias for igual e ímpar ou também, quando o número de neurônios for igual sendo ímpares e primos ao mesmo tempo. As funções de ativação possuem a seqüência: tangente hiperbólica, tangente hiperbólica, rampa e rampa conforme mostra a figura 9.1.

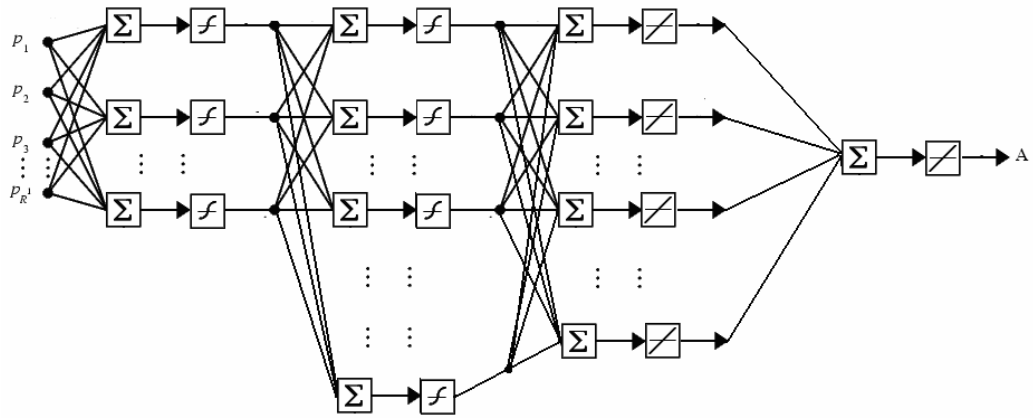


Figura 9.1 – Esquema ilustrativo das características da rede neural proposta nesse trabalho.

Seus dados de entradas são gerados em um simulador criado em rotina *MATLAB*®, onde é possível definir a amplitude máxima e mínima de cada banda, gerando assim um sinal onde as amplitudes das bandas variam aleatoriamente entre os limites definidos. Para comprovar a eficiência do treinamento propôs-se 2 tipos de dados gerados utilizados em seu treinamento:

1. Caso 1 - Treinamento da rede com 100 amostras simuladas;
2. Caso 2 - Treinamento da rede com 300 amostras simuladas.

Para comprovar a efetividade do treinamento utilizaram-se além do sinal do equipamento, 20 (vinte) amostras diferentes da amostra gerada utilizada no treinamento da rede, bem como, um sinal totalmente oposto do esperado pela rede, como por exemplo, o oposto da EBFPD, conforme ilustra a figura 9.2. Dessa maneira é possível observar se a rede possui uma boa dispersão (tende a um número diferente de 1) quando submetida a um sinal inesperado.

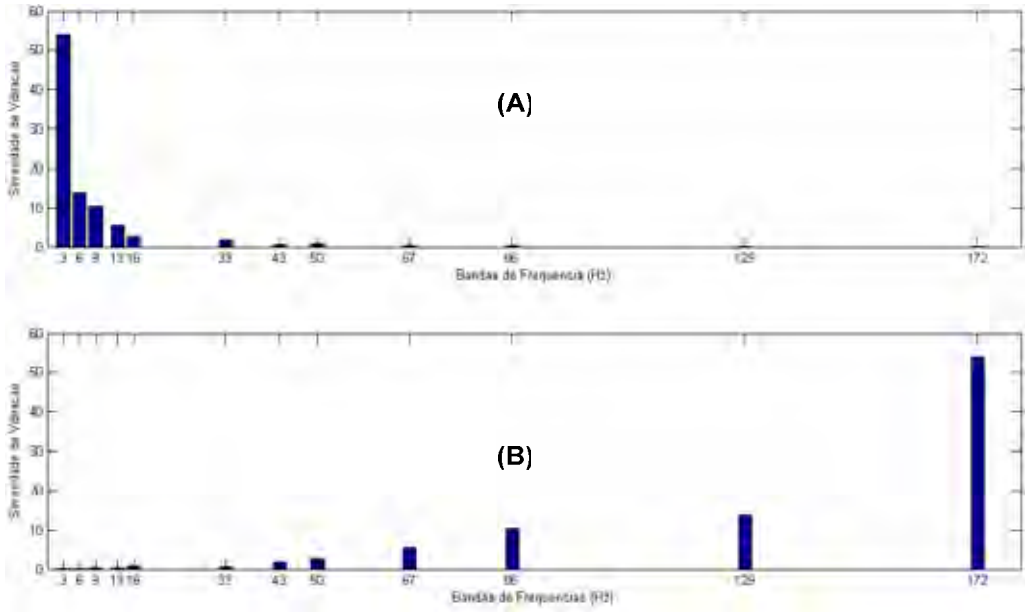


Figura 9.2 – (a) Sinal esperado. (b) Sinal totalmente oposto ao esperado (situação oposta).

Pode-se definir então duas situações de testes para as RNA's utilizadas na detecção da boa condição do equipamento após seu treinamento. Cada condição possui a seguinte denomição:

- Condição rede_boa 1 - Teste com amostra gerada para o sinal em boas condições diferente da utilizada no treinamento;
- Condição rede_boa 2 - Teste da situação oposta com o EBFPD da amostra gerada para o sinal em boas condições diferente da utilizada no treinamento;

Com esses testes poderá ser discutida a eficiência da rede na detecção das falhas para a condição de inexistência de falhas na máquina.

Para a rede neural relacionada com a detecção da condição de falha têm-se as seguintes condições de teste:

- Condição rede_falha 1 - Teste com amostra gerada para o sinal em condição de falha diferente da utilizada no treinamento;
- Condição rede_falha 2 - Teste da situação oposta com o EBFPD da amostra gerada para o sinal em boas condições diferente da utilizada no treinamento;

Dessa maneira pode-se analisar a reposta da rede utilizada para a detecção de falha.

Para uma melhor resposta da rede, sempre será utilizado sinais de entrada com doze pontos, ou seja, o EBFPD será customizado com 12 bandas de freqüências (ou próximo a 12 bandas devido às limitações, como baixas taxas de aquisição). As bandas sempre serão relacionadas com:

- Banda da freqüência de rotação e seus primeiros harmônicos;
- Banda da freqüência da passagem das pás do rotor e suas primeiras harmônicas;
- Banda da freqüência de passagem das pás (diretriz e rotor) e suas primeiras freqüências.

Para a definição dos alarmes e *trips* globais foi utilizada a norma ISO. Os alarmes e *trips* locais foram configurados após uma análise prévia do EBFPD. Sendo que o alarme será definido com o valor de 65% da medida atual do valor de cada banda e o *trip* como 90% do valor atual de medida de cada banda, diferindo assim do alarme de 3dB e enfatizando ainda mais o aparecimento da falha a qual a banda está relacionada.

Após definidos todos os parâmetros de análise pode-se começar a aplicação em exemplos reais que serão descritos na próxima seção.

9.2 – APLICAÇÃO E RESULTADOS DA TÉCNICA DO EBFPD

9.2.1 – PCH DE SALTO JAURU.

A PCH de Salto Jauru (figura 9.3) está localizada no estado de Mato Grosso próxima a cidade de Araputanga.

Figura 9.3 – Vista externa da PCH de Salto Jauru

Características construtivas dos grupos geradores.

Essa PCH é constituída de dois grupos geradores com potência total de 10 MW cada um. A figura 9.4 apresenta a montagem do grupo gerador cujas principais partes constituintes são descritas a seguir.

- Turbina tipo Kaplan, montagem horizontal "S", acoplado ao gerador através de um multiplicador de engrenagens com relação de multiplicação 1 : 3,55.
- A turbina é apoiada à jusante diretamente no eixo de baixa rotação do multiplicador, e a montante por um mancal combinado fixado por flange no bulbo. À jusante o eixo sai do tubo passando por uma gaxeta de vedação montada por flange no bloco de ancoragem de concreto.

- O gerador do tipo síncrono apoiado por dois mancais de deslizamentos hidrodinâmicos radiais do tipo coluna um a jusante e outro a montante. O volante de inércia/disco de frenagem está montado após o mancal guia de jusante em balanço a uma prolonga do eixo (figura 9.5).
- O multiplicador de engrenagens com um único par de transmissão sendo as engrenagens helicoidais opostas (tipo espinha de peixe). Os mancais são de rolamento e a montagem é compacta dentro de uma carcaça apoiada sobre base de concreto. O acoplamento entre a turbina e multiplicador é do tipo flange rígido. O acoplamento entre o multiplicador e gerador possui liberdade de deslocamento axial (rígida radialmente)
- Turbina Kaplan, com 5 pás e 14 diretrizes móveis (figura 9.6).
- Gerador com potência nominal de 10,0 MW, rotação de 720 rpm (12 Hz), 10 pólos.

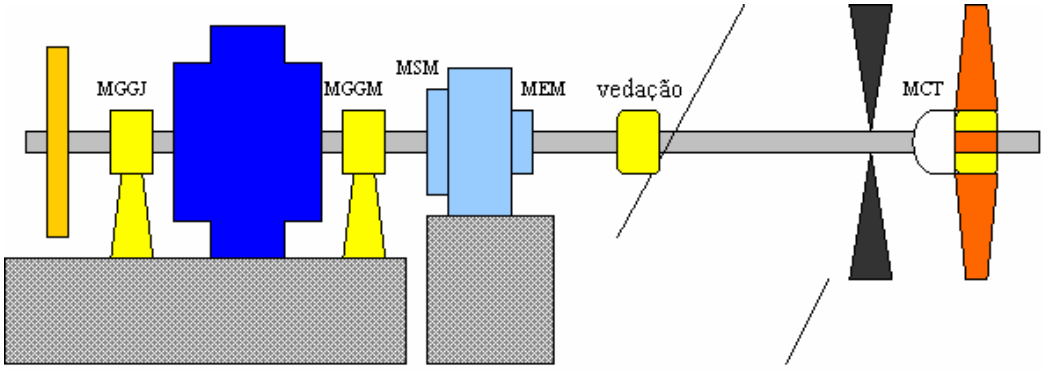


Figura 9.4 – Esquema da montagem. Grupo gerador 01 – PCH Salto Jauru.

De acordo com o esquema apresentado, a nomenclatura dos três mancais fica:

MGGJ – Mancal Guia do Gerador a Jusante ,

MGGM – Mancal Guia do Gerador a Montante ,

MSM – Mancal de Saída do Multiplicador,

MEM – Mancal de Entrada do Multiplicador,

SEV – Saída do eixo de vedação,

MCT – Mancal Combinado da Turbina.

Figura 9.5 – Visão geral do gerador e multiplicador – PCH Salto Jauru

Figura 9.6 – Vista do rotor da turbina e das pás diretrizes – PCH Salto Jauru.

Equipamentos e montagem experimental

Para a medição da oscilação relativa eixo mancal se utilizou sensores do tipo indutivo, sem contato, com sensibilidade de 8,0 V/mm, e amplitude máxima de medição de 3,00mm. Foram montados dois sensores no mancal combinado da turbina e outros dois na saída da do eixo da turbina próximo ao flange que conecta o eixo a entrada do multiplicador, tomando a medida na direção horizontal e vertical, fixados e ajustados com auxílio de bases magnéticas. Utilizou-se também um sensor ótico montado sobre o sensor indutivo vertical localizado na junta de vedação, com a finalidade de gerar um sinal de marcação da rotação, visando sincronizar a aquisição dos sinais. Figuras 9.7 e 9.8 a seguir mostram o layout de montagem dos sensores utilizados durante a medição na PCH de Salto Jauru.

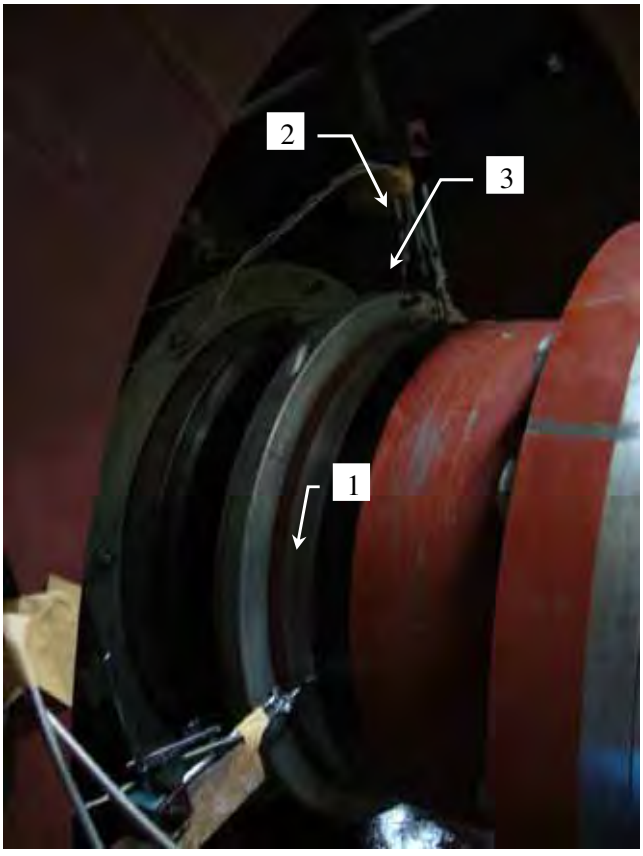


Figura 9.7 – Instrumentação do MGT. Transdutor indutivo horizontal (1), indutivo vertical (2) e *trigger* (3) – PCH Salto Jauru.

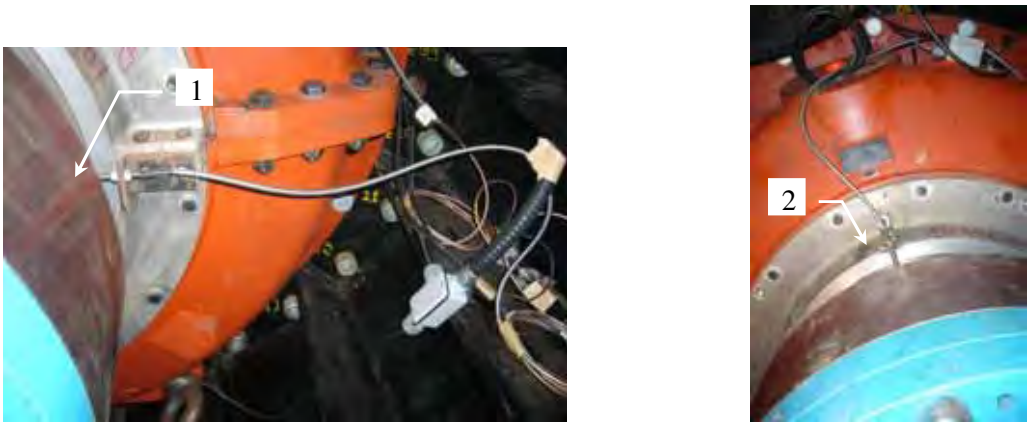


Figura 9.8 – Instrumentação do MCT. Transdutor indutivo horizontal (1) indutivo vertical (2) – PCH Salto Jauru.

A aquisição e digitalização dos sinais foram realizadas por um sistema de doze canais e taxa de conversão de 100 kHz. Em função das faixas de freqüências esperadas no conjunto, os sinais foram adquiridos com a taxa de 1kHz e blocos de 4096 pontos, conferindo uma resolução em freqüência da ordem de 0,24 Hz e banda de análise de 0 a 500 Hz. Controlados por um computador tipo "note book", através de programa desenvolvido pelo próprio fabricante, os sinais digitalizados podem ser analisados em tempo real e arquivados em disco rígido para posterior análise.

Como notado a turbina possui em sua saída uma vedação (gaxeta) e é apoiada por um mancal combinado do tipo escora. A norma ISO é definida somente para deslocamentos eixo-mancal, logo, só teremos um ponto de análise. Os canais utilizados na medição foram os canais 5 e 6, sendo conectado ao canal 5 um sensor indutivo na direção vertical e no canal 6 um sensor indutivo na horizontal.

Análise inicial do equipamento antes da configuração do EBFPD

Nessa etapa o especialista pode fazer algumas análises antes de definir as freqüências e larguras de bandas que serão configuradas, bem como, todos os valores de alarmes e trips.

Para a turbina faz-se a análise prévia utilizando o espectro de freqüências, diagramas de órbitas e severidade de vibração. O espectro de freqüência da turbina em boas condições de funcionamento é mostrado na figura 9.9.

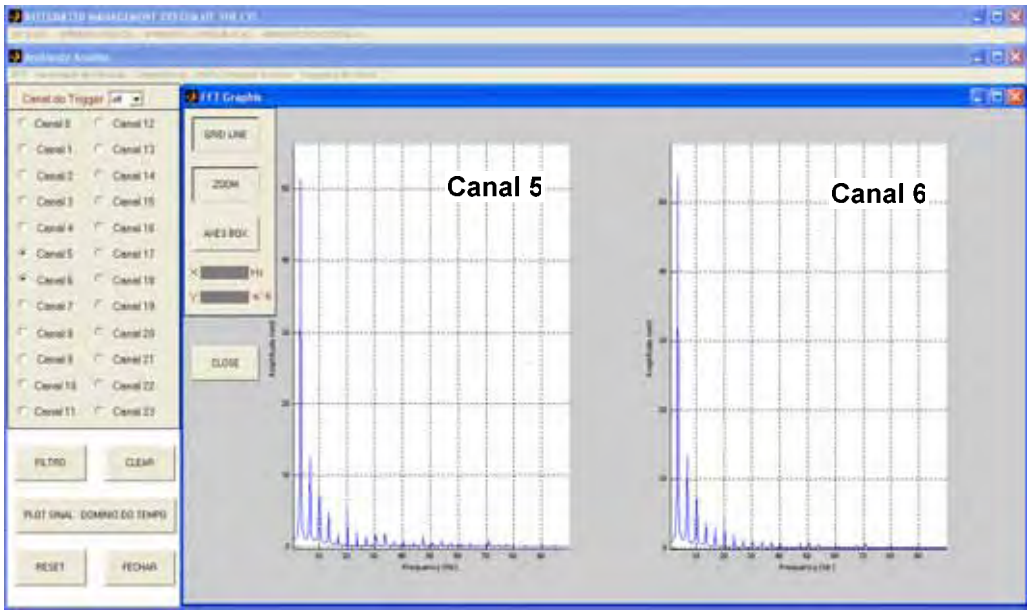


Figura 9.9 – Espectro de freqüência do canal 5 (proxímetro direção vertical) e 6 (proxímetro direção horizontal) para o equipamento em boas condições – PCH Salto Jauru.

O digrama de órbita da turbina em condições boas de operação é mostrada na figura 9.10.

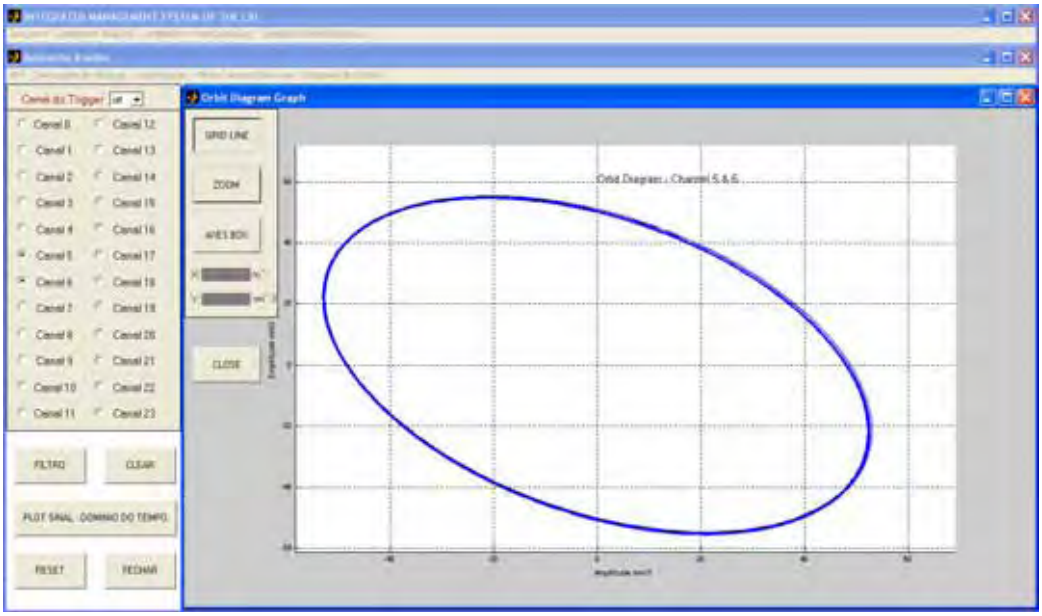


Figura 9.10 – Diagrama de órbita da turbina em boas condições de funcionamento - canal 5 (proxímetro direção vertical) e 6 (proxímetro direção horizontal) – PCH Salto Jauru.

Considerando a rotação da turbina e levando em conta que se trata de uma máquina hidráulica montada sob fundações rígidas, a Norma ISO 7919-1:1996 recomenda como o parâmetro de vibração mais apropriado para analise a oscilação relativa eixo-mancal, medida com transdutores do tipo indutivo sem contato.

A seção cinco da norma ISO 7919 (ISO 7919-5:1996), utiliza como severidade de vibração a amplitude da oscilação relativa eixo-mancal avaliada com uso da fórmula: $S_{\max} = \sqrt{S(V)^2 + S(H)^2}$; onde S(V) e S(H) são as oscilações medidas simultaneamente na direção vertical e horizontal do eixo, em um plano transversal o mais próximo possível do mancal. Para um grupo gerador com velocidade de rotação de 200 RPM (3,38 Hz), são definidos os seguintes níveis (tabela 9.1):

Tabela 9.1 – Severidade de vibração segundo a norma ISO – PCH Salto Jauru.

Nível	Faixa em μm	Recomendações
A	Até 82	Nível esperado no comissionamento. Muito bom.
B	83 a 148	Faixa considerada boa. Aceitável para operação continuada sem restrições.
C	149 a 275	Faixa considerada insatisfatória para operação contínua. Aceitável para operação por períodos limitados. Deve ser revisada logo que se tenha oportunidade.
D	Acima de 275	Nível de vibração inaceitável. Nesta faixa se poderá induzir quebra.

Fazendo o uso do ambiente análise e do comando severidade de vibração pode-se tomar tal severidade para o equipamento em boas condições conforme mostrado na figura 9.11.

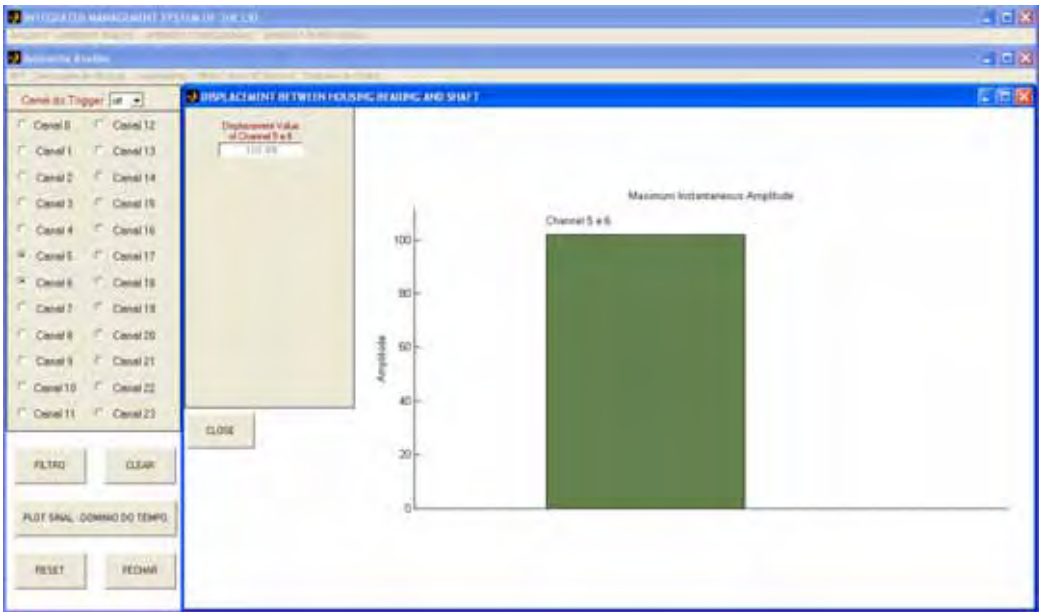


Figura 9.11 – Severidade de Vibração para a máquina em boas condições – PCH Salto Jauru (101,89 µm).

Dessa maneira é possível fazer uma análise prévia da máquina antes da aplicação da EBFPD e compara-la com os resultados obtidos quando a máquina apresentar algum problema obtendo-se, assim, um histórico efetivando a ação manutendora.

Configuração das freqüências de interesse, bandas de freqüências e alarmes e trips (global e local).

Será alvo de análise a freqüência de rotação (3,4 Hz) e seus 3 primeiros harmônicos (6,8; 10,1 e 13,5 Hz), a freqüência de giro das pás (16,9 Hz) do rotor e seus 3 primeiros harmônicos (33,8; 50,7 e 67,6) e por fim, a freqüência de passagem das pás (43,1 Hz) e seus 3 primeiros harmônicos (86,3; 129,4 e 172,5 Hz). Após definidas todas as freqüências representativas do funcionamento da turbina pode-se definir suas respectivas largura de banda que são respectivamente: (1,5 – 5 Hz); (5 – 8 Hz); (8 – 11,5 Hz); (11,5 – 14,5 Hz); (15 – 18 Hz); (32,5 – 35 Hz); (49 – 52 Hz); (66 – 69,5 Hz); (42 – 45 Hz); (85 – 88 Hz); (128 – 131 Hz) e (171 – 174 Hz).

Dessa maneira é possível obter os valores das amplitudes das bandas de freqüência antes da definição dos valores de alarme e *trip* pala observação do EBFPD preliminar conforme ilustra a figura 9.12.

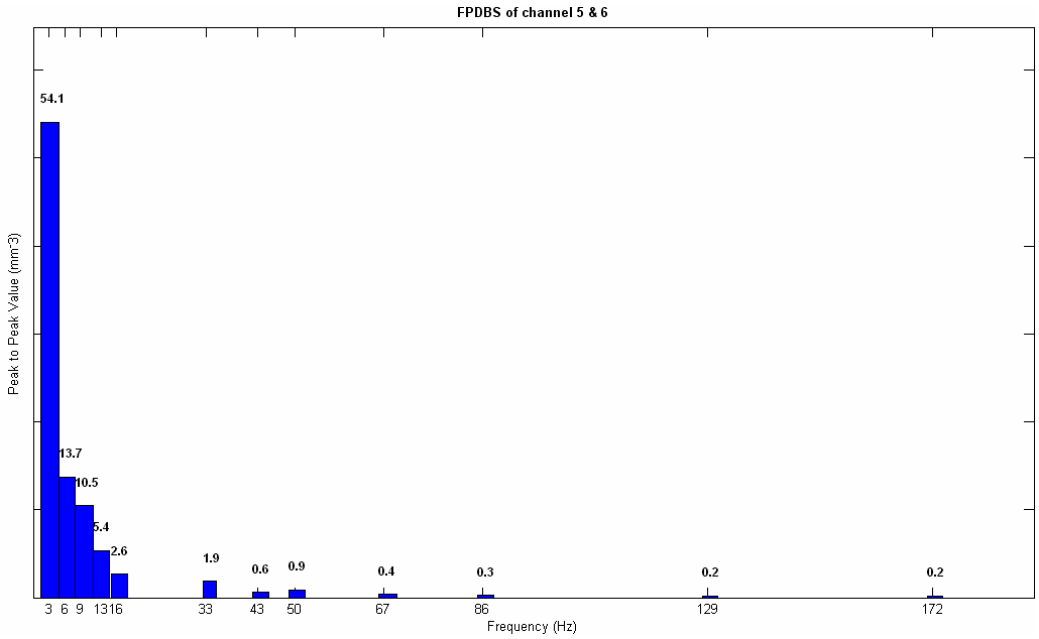


Figura 9.12 – EBFPD adquirido previamente para análise das amplitudes e definição dos valores e *trips* locais – PCH Salto Jauru.

Conforme demonstrado em tópicos anteriores, define-se para esse caso os seguintes alarmes e trips para as bandas conforme tabela 9.2, 9.3 e 9.4.

Tabela 9.2 – Freqüências de interesse, alarme e *trip* relativos à rotação da turbina – PCH Salto Jauru.

BANDAS DE FREQUÊNCIA RELATIVAS À FREQÜÊNCIA DE ROTAÇÃO DA TURBINA E SUAS HARMÔNICAS				
Freqüência (Hz)	Limite inferior da banda de freqüência (Hz)	Limite superior da banda de freqüência (Hz)	Alarme (µm)	Emergência (µm)
3,38	1,5	5	90	102,8
6,76	5	8	22,6	26
10,14	8	11,5	17,3	20
13,52	11,5	14,5	8,9	10,3

Tabela 9.3 – Freqüências de interesse, larguras das bandas e valores de alarme e *trip* relativas rotação das pás do rotor.

BANDAS DE FREQUÊNCIA RELATIVAS À FREQÜÊNCIA DE ROTAÇÃO DAS PÁS DO ROTOR DA TURBINA E SUAS HARMÔNICAS				
Freqüência (Hz)	Limite inferior da banda de freqüência (Hz)	Limite superior da banda de freqüência (Hz)	Alarme (µm)	Emergência (µm)
16,9	15	18	4,3	5
33,8	32.5	35	3,1	3,6
50,7	49	52	1,5	1,7
67,6	66	69.5	0,66	0,8

Tabela 9.4 – Freqüências de interesse, larguras das bandas e valores de alarme e *trip* relativas a passagem das pás – PCH Salto Jauru.

BANDAS DE FREQUÊNCIA RELATIVAS À FREQÜÊNCIA DE PASSAGEM DAS PÁS DA TURBINA E SUAS HARMÔNICAS				
Freqüência (Hz)	Limite inferior da banda de freqüência (Hz)	Limite superior da banda de freqüência (Hz)	Alarme (µm)	Emergência (µm)
43,13	42	45	1	1,2
86,26	85	88	0,5	0,6
129,39	128	131	0,3	0,4
172,52	171	174	0,3	0,4

O valor de alarme e emergência são respectivamente 149 e $275*10^{-3}$ mm conforme a tabela 9.1, referente à norma ISO.

Treinamento das RNA's

A rede neural foi treinada para dois tipos de falhas que são desbalanceamento e o desalinhamento. A figura 9.13 mostra a normalização do espectro de bandas de freqüência para o caso da condição boa.

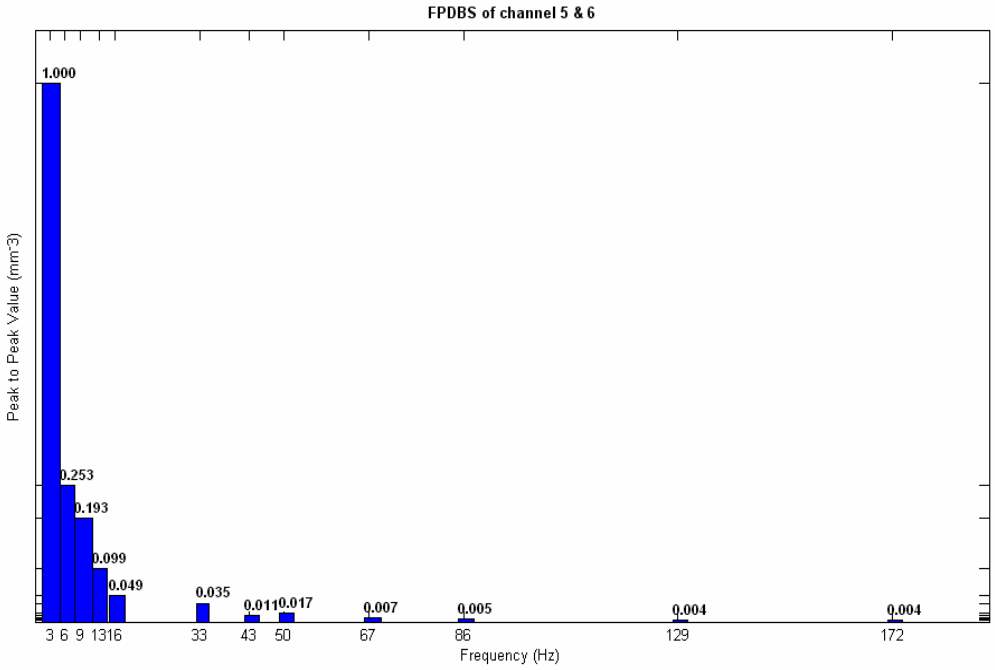


Figura 9.13 – Espectro de bandas de freqüências normalizado na condição boa de funcionamento – PCH Salto Jauru

A tabela 9.5 mostra a variação da porcentagem das amplitudes das bandas na condição boa, bem como, a variação aceitável das amplitudes das bandas para cada caso de falha, ou seja, para cada condição (desde a condição boa até as condições de falha). Pode-se definir níveis (amplitude das bandas) em que é considerado cada caso, sendo possível distingui-los e detecta-los pelo uso da cadeia de RNAs.

Tabela 9.5 – Variação das porcentagens de amplitude de cada banda relativa a boa condição e falhas – PCH Salto Jauru.

Freqüências de interesse (Hz)	% aceitável para a condição de bom funcionamento		% para a condição de falha por desalinhamento		% para a condição de falha por desbalanceamento	
	% mínima	%máxima	% mínima	%máxima	% mínima	%máxima
3,4	Cte = 1	Cte = 1	Cte = 1	Cte = 1	Cte = 1	Cte = 1
6,8	15	30	30	400	0,1	15
10,1	15	28	28	300	0,1	15
13,5	6	18	18	80	0,1	6
16,9	2	10	-	-	-	-
33,8	2	10	-	-	-	-
43,1	0,5	6	-	-	-	-
50,7	0,5	6	-	-	-	-
67,6	0,3	5	-	-	-	-
86,3	0,05	0,1	-	-	-	-
129,4	0,05	0,1	-	-	-	-
172,5	0,05	0,1	-	-	-	-

Lembrar que o número de pontos de entrada da rede neural boa para os casos apresentados nesse trabalho difere dos números de pontos utilizados na entrada das redes neurais responsáveis pela detecção dos defeitos (ver capítulo 7).

Treinamento e testes com as RNA's

Conforme descrito em tópicos anteriores serão feitos alguns testes para saber a qualidade do treinamento das RNA's antes de aplica-as no reconhecimento das falhas. Por este motivo utilizaremos tabelas para simplificar a discussão dos resultados. A tabela 9.6, 9.7 e 9.8 mostra os resultados referentes ao treinamento de cada rede para os diferentes casos que se pretende análise.

Tabela 9.6 – Resultados obtidos pela rede responsável pelo diagnóstico da boa condição nos testes aplicados – PCH Salto Jauru

VERIFICAÇÃO RNA DA CONDIÇÃO BOA		
	Condição rede_boa 1	Condição rede_boa 2
CASO 1	Todos os dados foram reconhecidos (saída: 0,98 – 1,0)	Saídas bem diferentes da esperada
CASO 2	Todos os dados foram reconhecidos (saída: 0,96 – 1,0)	Saídas bem diferentes da esperada

Tabela 9.7 – Resultados obtidos pela rede responsável pelo diagnóstico da falha de desalinhamento nos testes aplicados – PCH Salto Jauru

VERIFICAÇÃO RNA DA CONDIÇÃO DE FALHA – DESALINHAMENTO		
	Condição rede_falha 1	Condição rede_falha 2
CASO 1	Todos os dados foram reconhecidos (saída: 0,99 – 1,0)	Saídas bem diferentes da esperada
CASO 2	Todos os dados foram reconhecidos (saída: 0,99 – 1,0)	Saídas bem diferentes da esperada

Tabela 9.8 – Resultados obtidos pela rede responsável pelo diagnóstico da falha de desbalanceamento nos testes aplicados – PCH Salto Jauru.

VERIFICAÇÃO RNA DA CONDIÇÃO DE FALHA – DESBALANCEAMENTO		
	Condição rede_falha 1	Condição rede_falha 2
CASO 1	Todos os dados foram reconhecidos (saída: 0,99 – 1,0)	Saídas bem diferentes da esperada
CASO 2	Todos os dados foram reconhecidos (saída: 0,99 – 1,0)	Saídas bem diferentes da esperada

Para o treinamento para amostra conforme CASO 2 notou-se um dispêndio maior de tempo e esforço computacional no treinamento se comparada ao CASO 1 sem que houvesse mudança significativa na saída esperada para a rede. Por este motivo, aplicar-se-á em todas as redes o treinamento pelo CASO 1.

Diagnóstico automático

Depois de feito o treinamento das RNA's para os casos estudos utilizando sinais teóricos provenientes do simulador de dados, aplica-se o software IMSLVI para a detecção de falhas.

Para a detecção e comprovação da falha utilizaram-se sinais provenientes das duas turbinas kaplan PCH Salto Jauru, que são idênticas. A máquina 2 apresentou perfeito funcionamento após comissionamento, mas a máquina 1 apresentou o defeito de desalinhamento conforme mostra o diagnóstico mostrado na figura 9.14 e 9.15. Para uma melhor visualização utilizamos os dois sinais como se fosse de uma máquina só, ou seja, um sinal da máquina em perfeitas condições de funcionamento e em condição de falha.

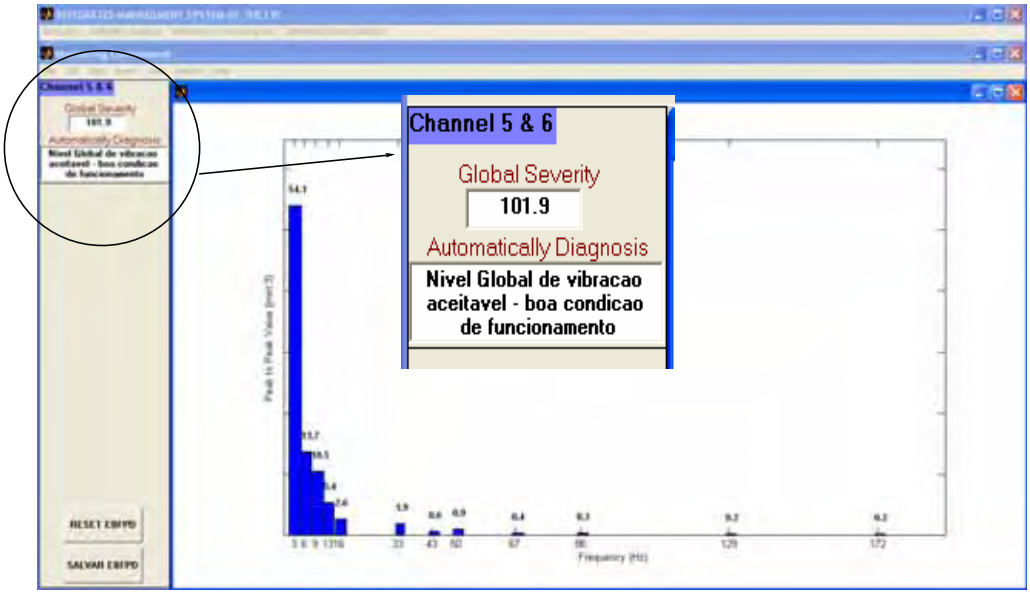


Figura 9.14 – Detecção da condição boa pela RNA – PCH Salto Jauru.

Na figura 9.15 pode-se notar a ativação dos alarmes locais, bem como o alarme local de 3db. Os alarmes são iguais porque, neste caso, a variação global e instantânea global é a mesma, por se ter utilizado somente dois sinais ao invés de vários.

Nota-se também que a primeira banda harmônica ultrapassou o limite de 90% definido no início deste capítulo e por esse motivo apresenta-se em coloração diferenciada (vermelho). A banda de freqüência principal referente à passagem das pás do rotor e distribuidor também ultrapassou limite, mas como nenhuma RNA foi treinada para localizar defeitos nas pás não foi emitido diagnostico.

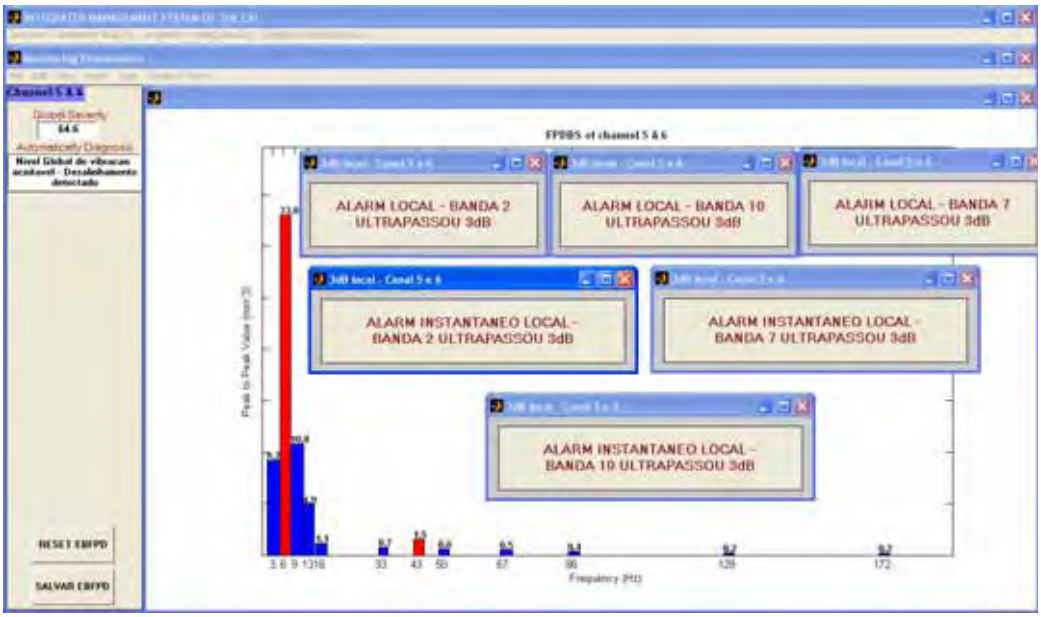


Figura 9.15 – Detecção do defeito de desalinhamento pela RNA – PCH Salto Jauru.

Como pode ser notada, a detecção da falha pode ser diagnosticada de maneira rápida pela rede neural. Se por acaso algo esteja acontecendo em diferente banda de freqüência ao qual a falha está relacionada, como o caso da banda principal de freqüência da passagem das pás do rotor e difusor, o alarme local e de 3dB poderá identifica-la de forma segura. Um outro ponto é quando o limite de 3dB é alcançado mas o alarme local ainda não foi atingido, conforme ocorre com a última banda de freqüência de rotação das pás da turbina. Pode ser notado que o alarme global não foi ativado, isto porque o nível de severidade aceitável está dentro da faixa limite definida.

Os valores de saída das RNA's em cada caso é mostrado na tabela 9.9.

Tabela 9.9 – Valores de saída das RNA's treinadas para a PCH Salto Jauru

SAÍDA DAS RNA'S			
	RNA BOA	RNA DESALINHAMENTO	RNA DESBALANCEAMENTO
Condição bom funcionamento.	1,00	-	-
Falha desalinhamento	-2,54	1,00	-2,60

Análise de dados posterior ao diagnóstico da falha

Para finalizar todo o processo de monitoramento da máquina faz-se a análise dos dados após o aparecimento da falha conforme feito previamente, ou seja, faz-se um histórico dos resultados da *FFT*, diagrama de órbita e severidade de vibração conforme ilustram as figuras 9.16, 9.17 e 9.18.

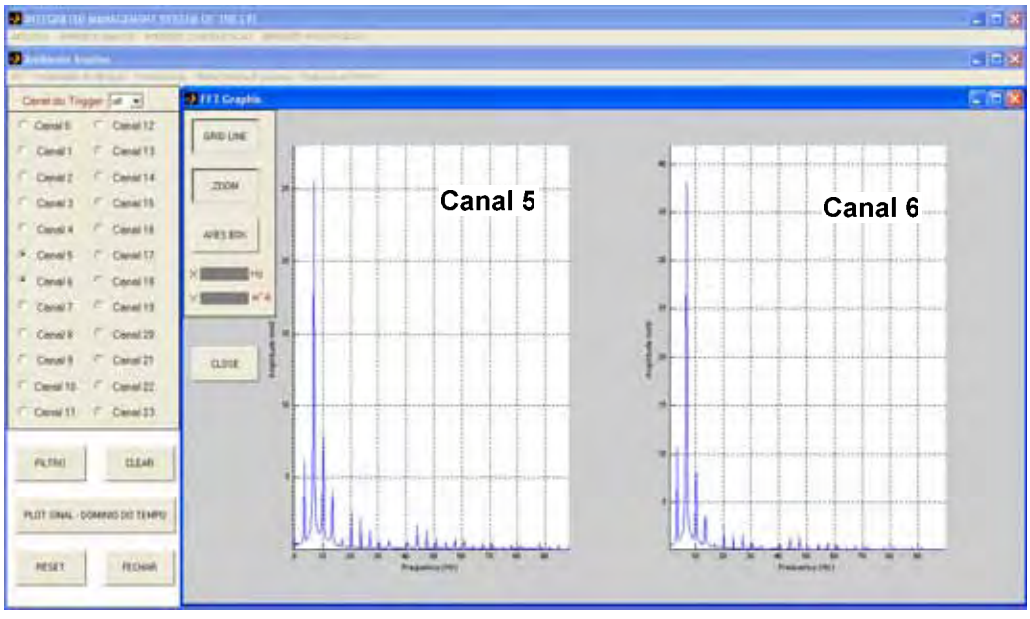


Figura 9.16 – Espectro de freqüência da máquina com desalinhamento – PCH Salto Jauru.

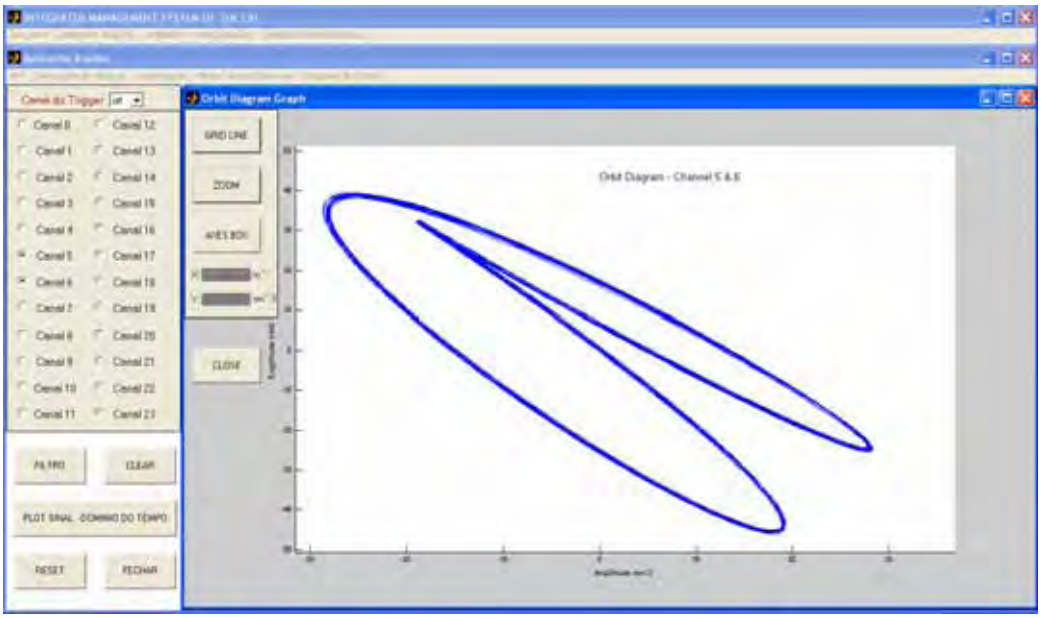


Figura 9.17 – Diagrama de órbita da maquina com desalinhamento – PCH Salto Jauru.

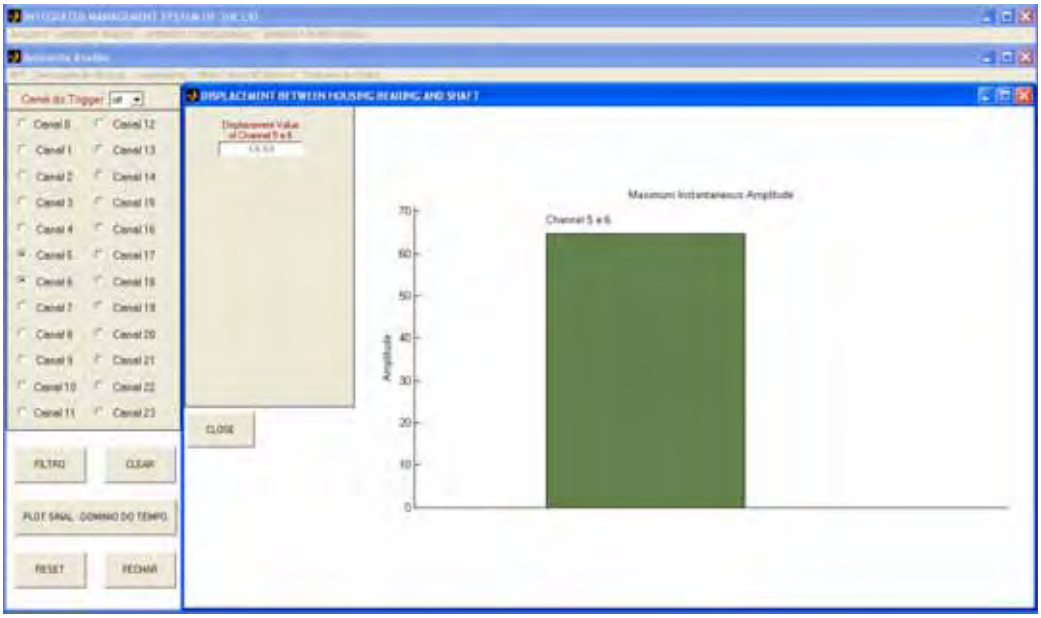


Figura 9.18 – Amplitude instantânea máxima da máquina com a falha de desalinhamento (64,64 µm) – PCH Salto Jauru.

Dessa maneira é possível fazer histórico do equipamento, melhorando a forma de gestão e também, o treinamento das RNA's. Pôde ser notado também que apesar do multiplicador (mais uma fonte de ruído no ambiente) a técnica (quantificação e

qualificação) respondeu de maneira satisfatória, ou seja, detectou as falhas com precisão. Este foi o primeiro caso utilizado para validação da técnica. Pôde-se notar que os valores das RNAs, apesar de divergirem do valor unitário, não ficam entre o intervalo de 0 e 1. Isso se deve principalmente ao simulador de sinais e pouco conhecimento no treinamento das RNAs. Com o decorrer do trabalho esse "sentimento" (como a rede trabalha) aliado a melhorias contínuas feitas no simulador, proporcionaram resultados mais próximos do requerido e também, uma maior agilidade no treinamento e diagnóstico de falhas pelas RNAs, conforme é notado nas seções e casos futuros.

9.2.2 – UHE LIMOEIRO.

A PCH de Limoeiro está localizada no estado de São Paulo próxima a cidade de Mogi-Guaçu. A visão externa dessa UHE é mostrada na figura 9.19 abaixo.

Figura 9.19 – Vista externa da UHE Limoeiro

Características construtivas dos grupos geradores.

Trata-se de um grupo gerador vertical, formado por uma turbina tipo Kaplan, acoplada diretamente a um gerador síncrono com 16 MW de potência. O esquema da figura 9.20 ilustra a turbina da UHE Limoeiro e a figura 9.21 mostra os dois grupos geradores de Limoeiro.

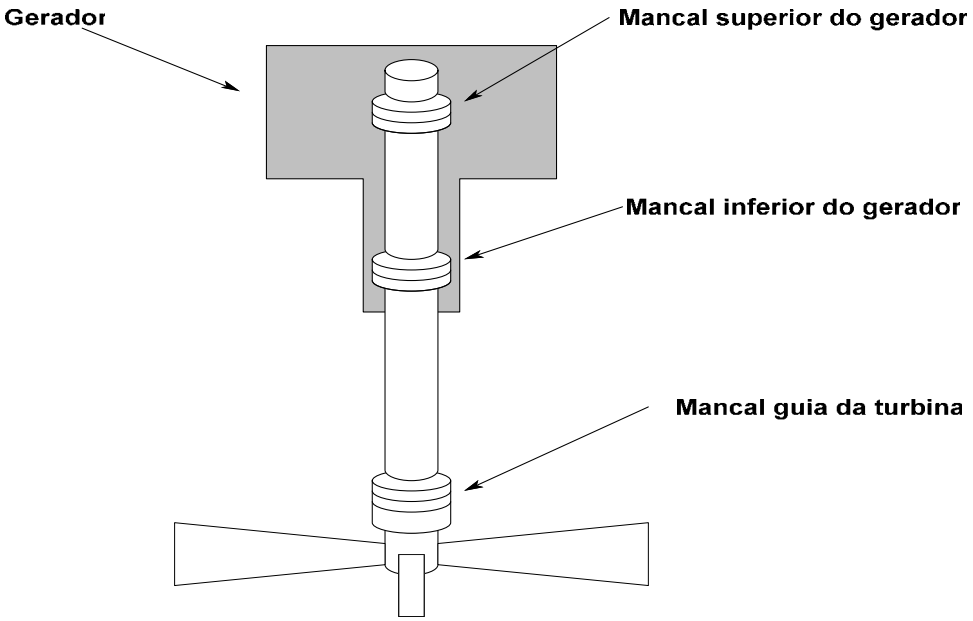


Figura 9.20 – Esquema ilustrativo do grupo gerador da UHE Limoeiro.

Figura 9.21 – Grupos geradores da UHE Limoeiro

Com base nas informações e desenhos fornecidos pela empresa, é possível enumerar as características básicas da máquina como segue:

Turbina:

- Kaplan, com seis pás.
- Rotação nominal de 180 rpm.
- Potência nominal máxima de 16 MW.
- Mancal guia da turbina, tipo deslizamento, montado na tampa do duto de adução.
- Distribuidor com 13 palhetas diretrizes.

Gerador:

- Vertical, síncrono, com capacidade de 16,0 MVA.
- Rotação de 180 rpm.
- Mancal guia inferior de deslizamento.
- Mancal combinado superior de deslizamento.

Equipamentos e montagem experimental

As medições foram realizadas com a utilização de sensores de proximidade do tipo indutivo, de não contato, e acelerômetros piezelétricos. Os sinais foram condicionados por equipamentos apropriados, adquiridos, digitalizados e armazenados em microcomputador através de um sistema de aquisição de sinais com dez canais e freqüência de amostragem máxima de 40 kHz, assistido por um microcomputador tipo *laptop*.

Foram instalados sensores nos seguintes pontos:

Mancal Guia da Turbina

- Dois sensores de proximidade, montados radialmente. Sensor 01 a jusante, denominado H1 e sensor 02 montado a 90o no sentido do giro do eixo, denominado V1.
- Um acelerômetro montado radialmente entre os dois sensores de proximidade, denominado R1.

- Um sensor ótico, montado sobre o sensor H1, com a finalidade de gerar um sinal de marcação da rotação, visando sincronizar a aquisição dos sinais.

Mancais Guias do Gerador

- Dois sensores de proximidade em cada, ambos no sentido radial, posicionados de modo idêntico aos do mancal guia da turbina. No mancal guia intermediário são referidos como H2 e V2, e no mancal guia superior H3 e V3.
- Um acelerômetro, montado na direção axial, sobre a junta da tampa da cuba de óleo do mancal combinado, denominado A1.

Análise inicial do equipamento antes da configuração do EBFPD

Para a turbina faz-se a análise prévia utilizando o espectro de freqüências, diagramas de órbitas e severidade de vibração. O espectro de freqüência da turbina em boas condições de funcionamento é mostrado na figura 9.22.

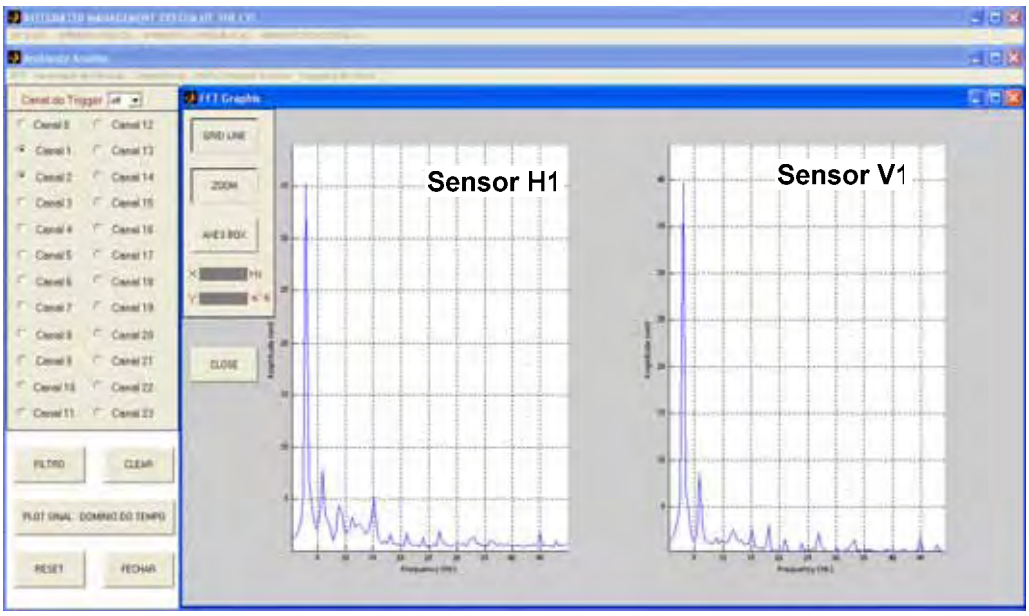


Figura 9.22 – Espectro de freqüência do sensor H1 e V1 para o equipamento em boas condições – UHE Limoeiro.

O digrama de órbita do da turbina em condições boas de operação é mostrada na figura 9.23.

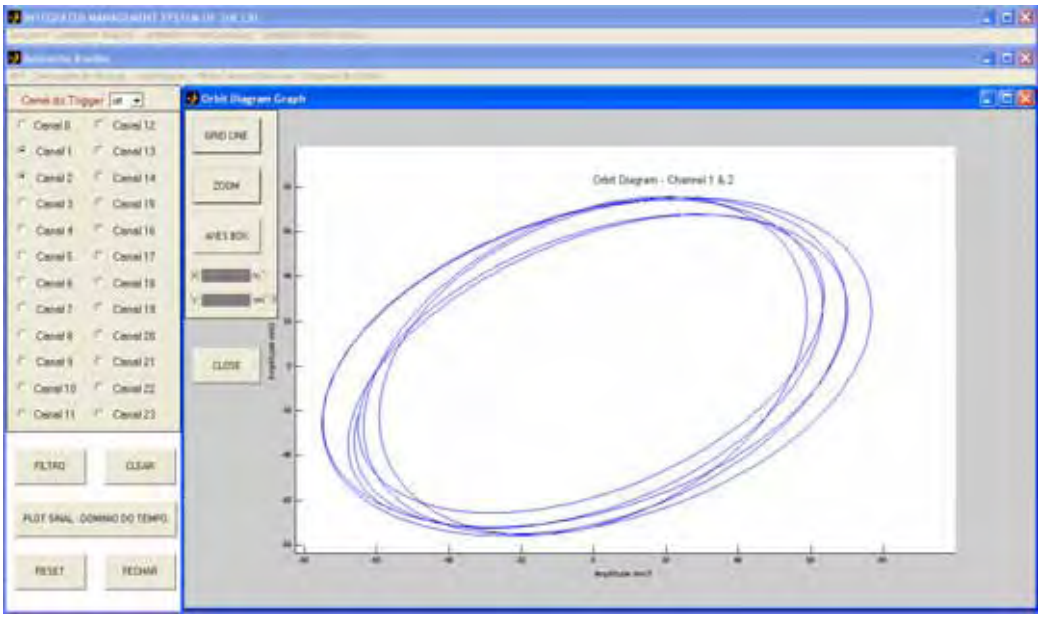


Figura 9.23 – Diagrama de órbita da turbina em boas condições de funcionamento – UHE Limoeiro

Considerando a rotação da turbina e levando em conta que se trata de uma máquina hidráulica montada sob fundações rígidas, a Norma ISO 7919-1:1996 recomenda como o parâmetro de vibração mais apropriado para analise a oscilação relativa eixo-mancal, medida com transdutores do tipo indutivo sem contato.

A seção cinco da norma ISO 7919 (ISO 7919-5:1996), utiliza como severidade de vibração a amplitude da oscilação relativa eixo-mancal avaliada com uso da fórmula: $S_{\max} = \sqrt{S(V)^2 + S(H)^2}$; onde S(V) e S(H) são as oscilações medidas simultaneamente na direção vertical e horizontal do eixo, em um plano transversal o mais próximo possível do mancal. Para um grupo gerador com velocidade de rotação de 180 rpm, são definidos os seguintes níveis (tabela 9.10):

Tabela 9.10 – Severidade de vibração segundo a norma ISO – UHE Limoeiro

Nível	Faixa em µm	Recomendações
A	Até 82	Nível esperado no comissionamento. Muito bom.
B	83 a 148	Faixa considerada boa. Aceitável para operação continuada sem restrições.
C	149 a 275	Faixa considerada insatisfatória para operação contínua. Aceitável para operação por períodos limitados. Deve ser revisada logo que se tenha oportunidade.
D	Acima de 275	Nível de vibração inaceitável. Nesta faixa se poderá induzir quebra.

Fazendo o uso do ambiente análise e do comando severidade de vibração pode-se tomar tal severidade para o equipamento em boas condições conforme mostrado na figura 9.24.

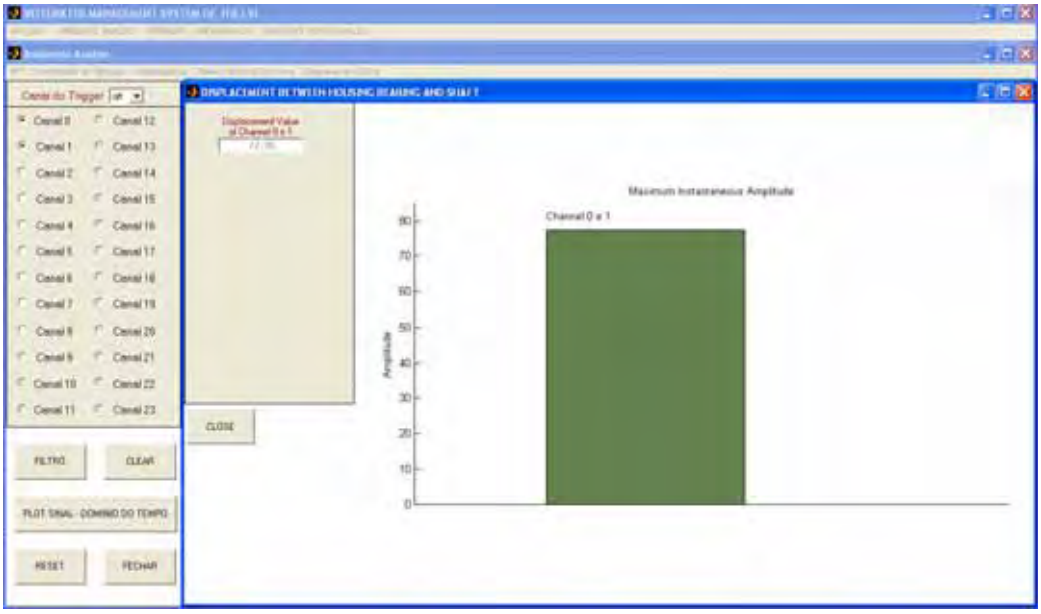


Figura 9.24 – Severidade de Vibração para a máquina em boas condições (77,4µm) – UHE Limoeiro.

Dessa maneira é possível fazer uma análise prévia da máquina antes da aplicação da EBFPD e compará-la com os resultados obtidos quando a máquina apresentar algum problema obtendo-se assim um histórico efetivando a ação manutendora.

Configuração das freqüências de interesse, bandas de freqüências e alarmes e *trips* (global e local).

Será alvo de análise a freqüência de rotação (3 Hz) e seus 4 primeiros harmônicos (6; 9,12 e 15 Hz) e a freqüência de giro das pás (18 Hz) do rotor e seu primeiro harmônicos (36 Hz). Após definidas todas as freqüências representativas do funcionamento da turbina pode-se definir suas respectivas largura de banda que são respectivamente: (1,5 – 4,5 Hz); (4,5 – 7,5 Hz); (7,5 – 10,5 Hz); (10,5 – 13,5 Hz); (13,5 – 16,5 Hz); (16,5 – 19,5 Hz) e (34,5 – 37,5 Hz).

Dessa maneira é possível obter os valores das amplitudes das bandas de freqüência antes da definição dos valores de alarme e *trip* pala observação do EBFPD preliminar conforme ilustra a figura 9.25.

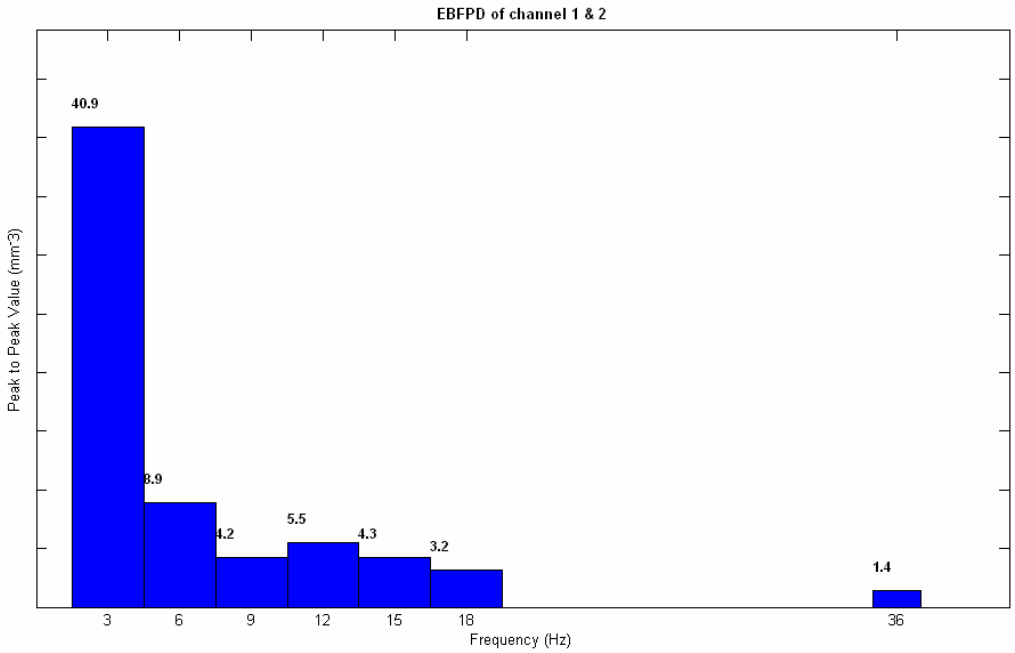


Figura 9.25 – EBFPD adquirido previamente para análise das amplitudes e definição dos valores e *trips* locais – UHE Limoeiro.

Conforme definido em tópicos anteriores define-se para esse caso os seguintes alarmes e trips para as bandas conforme tabela 9.11 e 9.12.

Tabela 9.11 – Freqüências de interesse, alarme e *trip* relativos a rotação da turbina – UHE Limoeiro.

BANDAS DE FREQUÊNCIA RELATIVAS À FREQÜÊNCIA DE ROTAÇÃO DA TURBINA E SUAS HARMÔNICAS				
Freqüência (Hz)	Limite inferior da banda de freqüência (Hz)	Limite superior da banda de freqüência (Hz)	Alarme (µm)	Emergência (µm)
3	1,5	4,5	67,5	77,7
6	4,5	7,5	14,68	16,9
9	7,5	10,5	6,93	8
12	10,5	13,5	9,1	10,5
15	13,5	16,5	7,1	8,2

Tabela 9.12 – Freqüências de interesse, larguras das bandas e valores de alarme e *trip* relativas rotação das pás do rotor – UHE Limoeiro.

BANDAS DE FREQUÊNCIA RELATIVAS À FREQÜÊNCIA DE ROTAÇÃO DAS PÁS DO ROTOR DA TURBINA E SUAS HARMÔNICAS				
Freqüência (Hz)	Limite inferior da banda de freqüência (Hz)	Limite superior da banda de freqüência (Hz)	Alarme (µm)	Emergência (µm)
18	16,5	19,5	5,3	6,1
36	34,5	37,5	1,8	2,7

O valor de alarme e emergência são respectivamente 149 e 275µm conforme a tabela 9.10 referente à normatização ISO.

Treinamento das RNA's

A rede neural foi treinada para dois tipos de falhas que são desbalanceamento e desalinhamento. A figura 9.26 mostra a normatização do espectro de bandas de freqüência para o caso da condição boa.

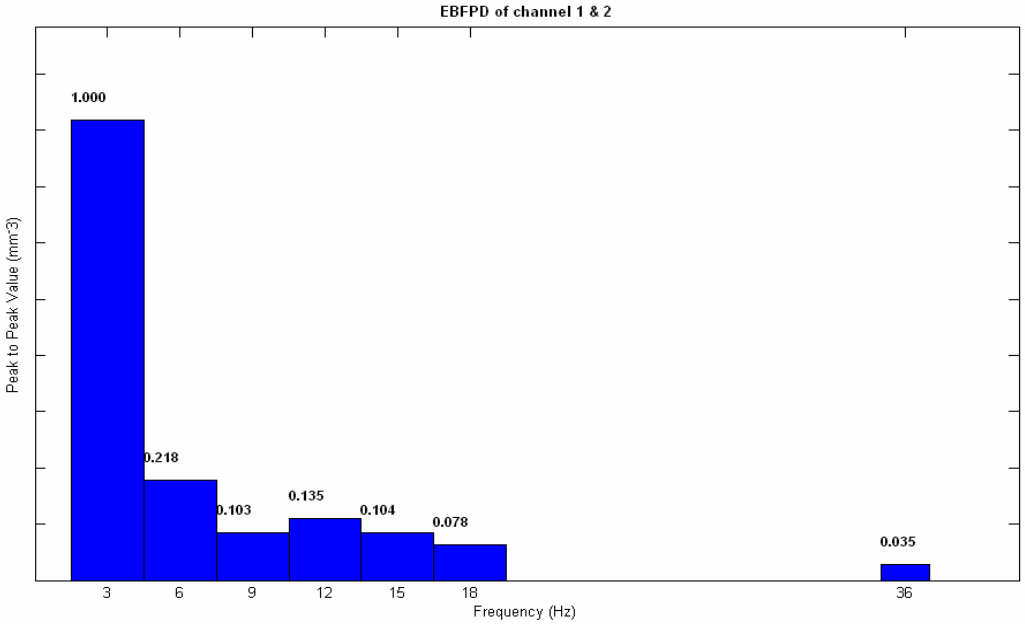


Figura 9.26 – Espectro de bandas de freqüências normalizado para a condição boa de funcionamento – UHE Limoeiro

A tabela 9.13 mostra a variação da porcentagem das amplitudes das bandas na condição boa, bem como, a variação aceitável das amplitudes das bandas para cada caso de falha.

Tabela 9.13 – Variação das porcentagens de amplitude de cada banda relativa a boa condição e falhas – UHE Limoeiro.

Freqüências de interesse (Hz)	% aceitável para a condição de bom funcionamento		% para a condição de falha por desalinhamento		% para a condição de falha por desbalanceamento	
	% mínima	%máxima	% mínima	%máxima	% mínima	%máxima
3	Cte = 1	Cte = 1	Cte = 1	Cte = 1	Cte = 1	Cte = 1
6	15	25	25	400	0,5	15
9	8	18	18	300	0,2	10
12	6	18	18	8	0,1	6
15	6	18	18	8	0,1	6
18	5	11	-	-	-	-
36	0,2	8	-	-	-	-

Lembrar que o número de pontos de entrada da rede neural boa para os casos apresentados nesse trabalho difere dos números de pontos utilizados na entrada das redes neurais responsáveis pela detecção dos defeitos (ver capítulo 7).

Treinamento e testes com as RNA's

Conforme descrito em tópicos anteriores serão feitos alguns testes para saber a qualidade do treinamento das RNA's antes de aplica-as no reconhecimento das falhas. Por este motivo utilizaremos tabelas para simplificar a discussão dos resultados. A tabela 9.14, 9.15 e 9.16 mostra os resultados referentes ao treinamento de cada rede para os diferentes casos que se pretende análise.

Tabela 9.14 – Resultados obtidos pela rede responsável pelo diagnóstico da boa condição nos testes aplicados – UHE Limoeiro

VERIFICAÇÃO RNA DA CONDIÇÃO BOA		
	Condição rede_boa 1	Condição rede_boa 2
CASO 1	Todos os dados foram reconhecidos (saída: 0,99 – 1,00)	Saídas bem diferentes da esperada

Tabela 9.15 – Resultados obtidos pela rede responsável pelo diagnóstico da falha de desalinhamento nos testes aplicados – UHE Limoeiro

VERIFICAÇÃO RNA DA CONDIÇÃO DE FALHA – DESALINHAMENTO		
	Condição rede_falha 1	Condição rede_falha 2
CASO 1	Todos os dados foram reconhecidos (saída: 0,99 – 1,0)	Saídas bem diferentes da esperada

Tabela 9.16 – Resultados obtidos pela rede responsável pelo diagnóstico da falha de desbalanceamento nos testes aplicados – UHE Limoeiro

VERIFICAÇÃO RNA DA CONDIÇÃO DE FALHA – DESBALANCEAMENTO		
	Condição rede_falha 1	Condição rede_falha 2
CASO 1	Todos os dados foram reconhecidos (saída: 0,99 – 1,0)	Saídas bem diferentes da esperada

Diagnóstico automático

Depois de feito o treinamento das RNA's para os casos estudos utilizando sinais teóricos provenientes do simulador de dados, aplica-se o software IMSLVI para a detecção de falhas.

Para a detecção e comprovação da falha utilizaram-se sinais provenientes das duas turbinas kaplan da UHE Limoeiro, que são idênticas. A máquina 2 apresentou perfeito funcionamento após comissionamento, mas a máquina 1 apresentou o defeito de desalinhamento conforme mostra o diagnóstico mostrado na figura 9.27 e 9.28. Para uma melhor visualização utilizamos os dois sinais como se fosse de uma máquina só, ou seja, um sinal da máquina em perfeitas condições de funcionamento e em condição de falha.

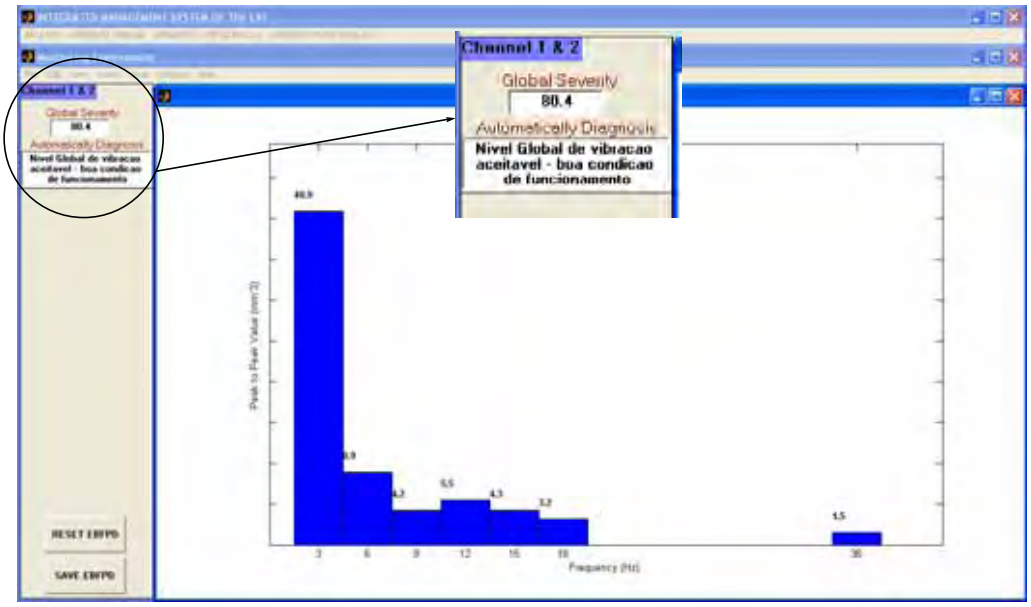


Figura 9.27 – Detecção da condição boa pela RNA – UHE Limoeiro

Na figura 9.28 pode-se notar que somente o alarme local da banda de freqüência referente a passagem de pás do rotor foi acionada, além do diagnóstico automático. Com isto pode-se notar a interconexão da técnica EBFPD e os alarmes, ou seja, para este caso nota-se a detecção da falha em um estado bastante prematuro onde nenhuma severidade de vibração (global e local) bem como a regra de 3dB foram alcançados. Dessa maneira pode-se gerir de maneira ótima a manutenção e planejamento da mesma reduzindo o tempo ocioso do equipamento.

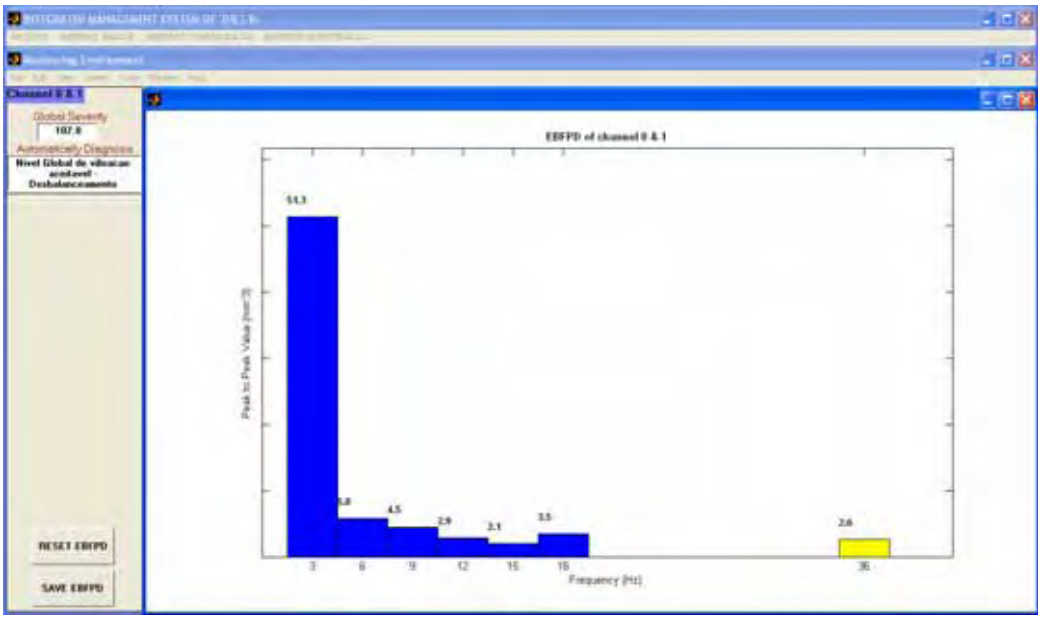


Figura 9.28 – Detecção do defeito de desalinhamento pela RNA – UHE Limoeiro.

Os valores de saída das RNA's em cada caso é mostrado na tabela 9.17.

Tabela 9.17 – Valores de saída das RNA's treinadas para a UHE Limoeiro

SAÍDA DAS RNA'S			
	RNA BOA	RNA DESALINHAMENTO	RNA DESBALANCEAMENTO
Condição bom funcionamento.	1,00	-	-
Falha desalinhamento	0,62	1,00	0,52

Análise de dados posterior ao diagnóstico da falha

Para finalizar todo o processo de monitoramento da máquina faz-se a análise dos dados após o aparecimento da falha conforme feito previamente, ou seja, faz-se um histórico dos resultados da *FFT*, diagrama de órbita e severidade de vibração conforme ilustram as figuras 9.29, 9.30 e 9.31.

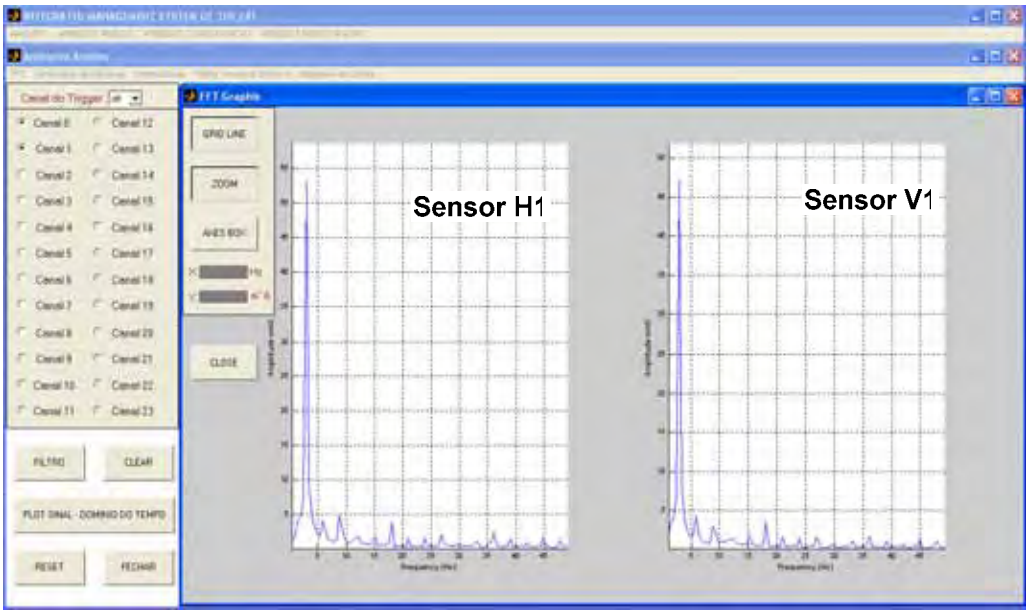


Figura 9.29 – Espectro de freqüência da máquina com desalinhamento – UHE Limoeiro

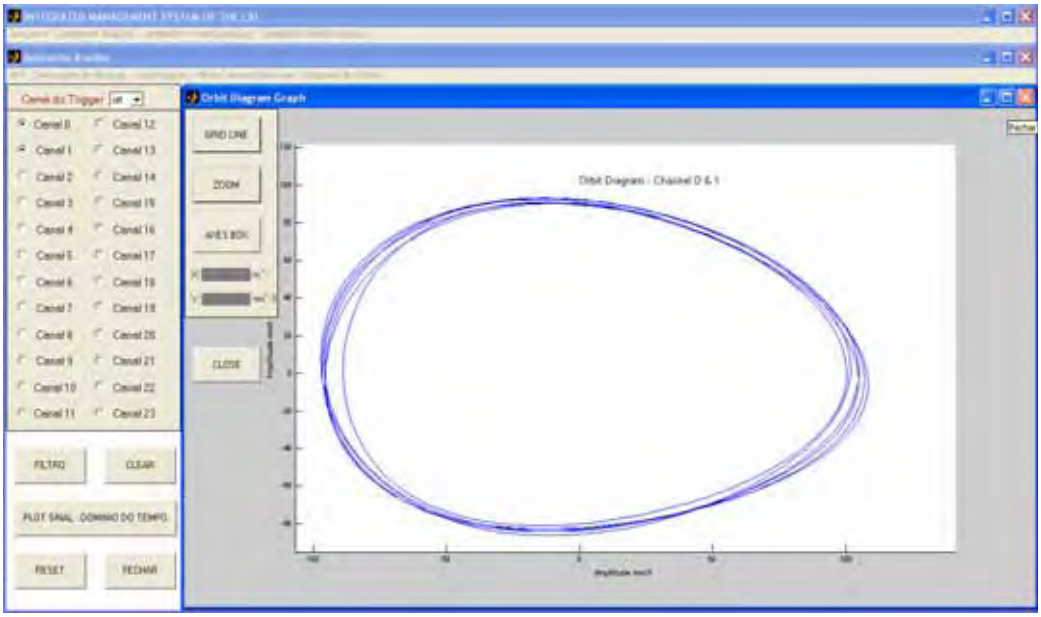


Figura 9.30 – Diagrama de órbita da maquina com desbalanceamento – UHE Limoeiro

Figura 9.31 – Amplitude instantânea máxima da máquina com a falha de desalinhamento (107,8µm).

9.2.3 – PCH BURITI.

A PCH Buriti está localizada no estado de Mato Grosso do Sul entre os municípios de Água Clara e Chapadão do Sul. A visão externa dessa PCH é mostrada na figura 9.32 abaixo.

Figura 9.32 – Vista externa da PCH Buriti.

Características construtivas dos grupos geradores.

O esquema do grupo gerador da PCH Buriti é mostrado na figura 9.33 possui as seguintes características construtivas:

- Montagem horizontal tipo Kaplan S, com três mancais de deslizamento hidrodinâmicos, sendo um mancal guia tipo coluna montado a montante do gerador, um mancal combinado tipo coluna montado a jusante do gerador e um mancal guia montado a montante da turbina, dentro do bulbo de proteção no interior do tubo de adução. Esquema figura 33.
- Turbina Kaplan, com 5 pás e 16 diretrizes móveis.
- Gerador com potência nominal de 18,53 MW, rotação de 327,27 rpm (5,45 Hz), 22 pólos.

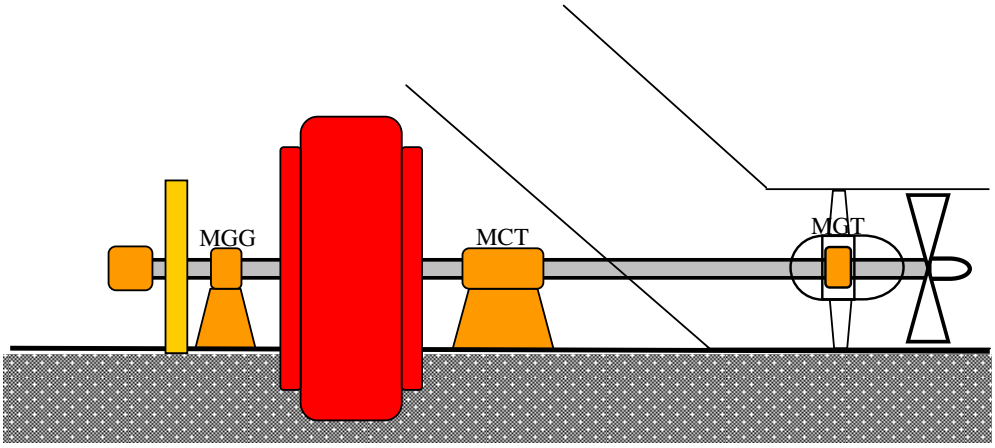


Figura 9.33 – Esquema da montagem. Grupo gerador 01 – PCH Buriti.

De acordo com o esquema apresentado, a nomenclatura dos três mancais fica:

MGG – Mancal Guia do Gerador,

MCT – Mancal Combinado da Turbina,

MGT – Mancal Guia da Turbina.

Figura 9.34 – Conduto forçado e um dos grupos geradores de energia da PCH Buriti

Equipamentos e montagem experimental

Para a medição da oscilação relativa eixo mancal se utilizou sensores do tipo indutivo, sem contato, com sensibilidade de 8,0 V/mm, e amplitude máxima de medição de 3,00mm. Foram montados dois sensores em cada mancal, tomando a medida na direção horizontal e vertical, fixados e ajustados com auxílio de bases magnéticas. Figuras 9.35 e 9.36 a seguir.

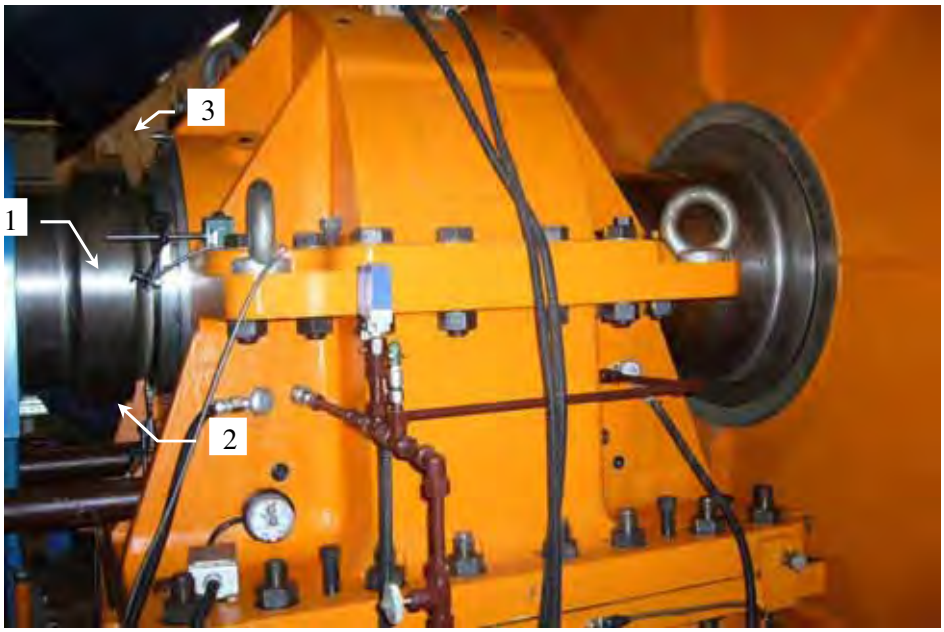


Figura 9.35 – Instrumentação do MCT. Transdutor indutivo horizontal (1), indutivo vertical (2) e acelerômetro (3).

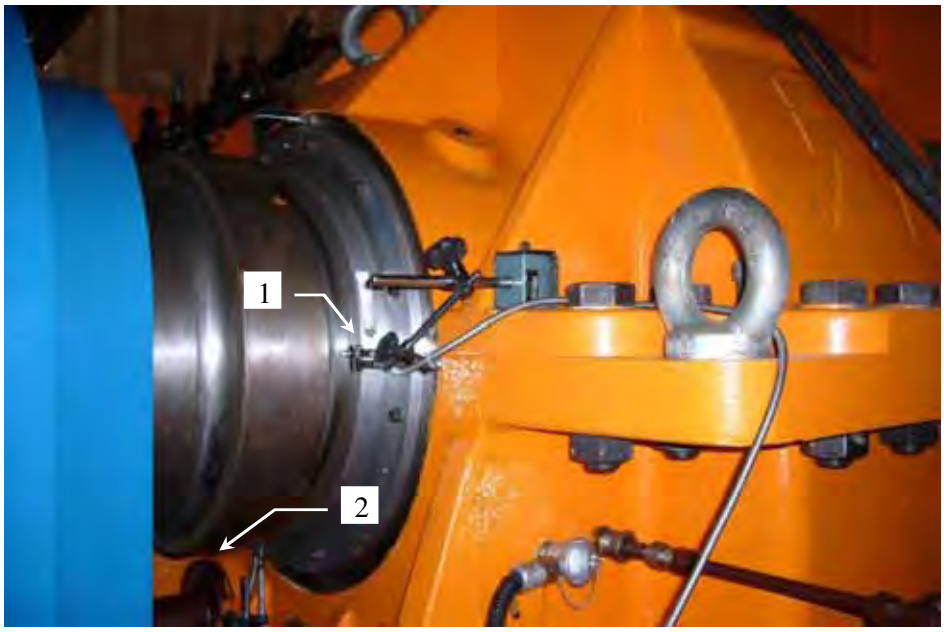


Figura 9.36 – Instrumentação do MGG. Transdutor indutivo horizontal (1) indutivo vertical (2).

A medida de velocidade de vibração foi feita com acelerômetro do tipo piezelétrico, com freqüência de ressonância maior que 7 KHz, fixado na carcaça do mancal combinado da turbina (MCT) na direção axial, através de parafuso, condicionado por um amplificador/integrador com faixa de resposta em freqüência de 0 a 4 KHz e ganho regulado para a faixa 0 a 10mm/s *RMS*.

A aquisição e digitalização dos sinais foi realizada por um sistema de doze canais com aquisição simultânea, taxa de conversão de 100 KHz, resolução de 12 bits, controlado por um computador tipo "note book", através de programa desenvolvido pelo próprio fabricante, que arquiva os sinais digitalizados em disco rígido.

Análise inicial do equipamento antes da configuração do EBFPD

Para a turbina faz-se a análise prévia utilizando o espectro de freqüências, diagramas de órbitas e severidade de vibração. O espectro de freqüência da turbina em boas condições de funcionamento é mostrado na figura 9.37.

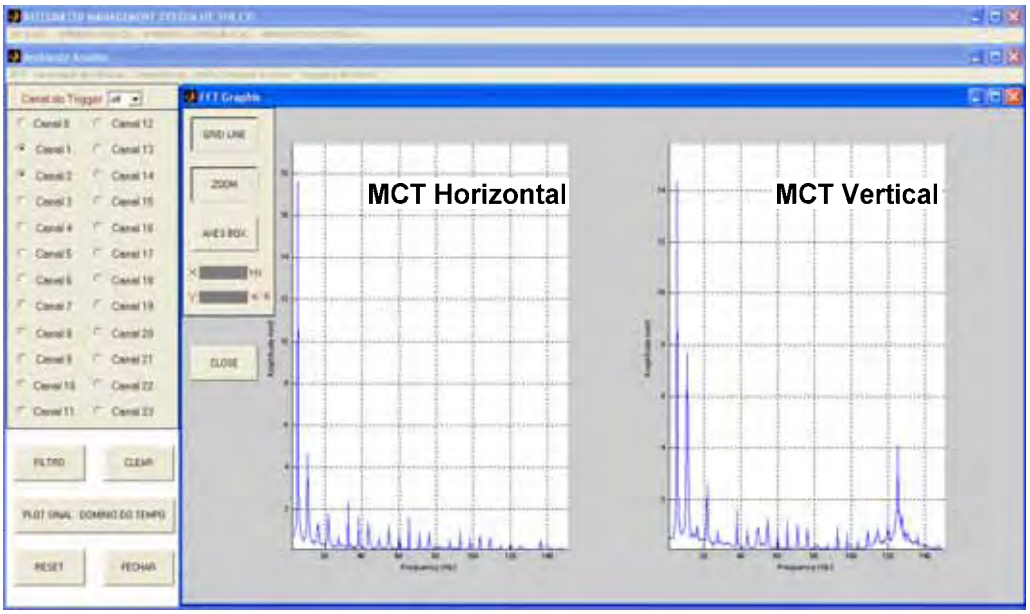


Figura 9.37 – Espectro de freqüência do sensor MCT Horizontal (canal 1) e MCT Vertical (canal 2) para o equipamento em boas condições – PCH Buriti.

O digrama de órbita do da turbina em condições boas de operação é mostrada na figura 9.38.

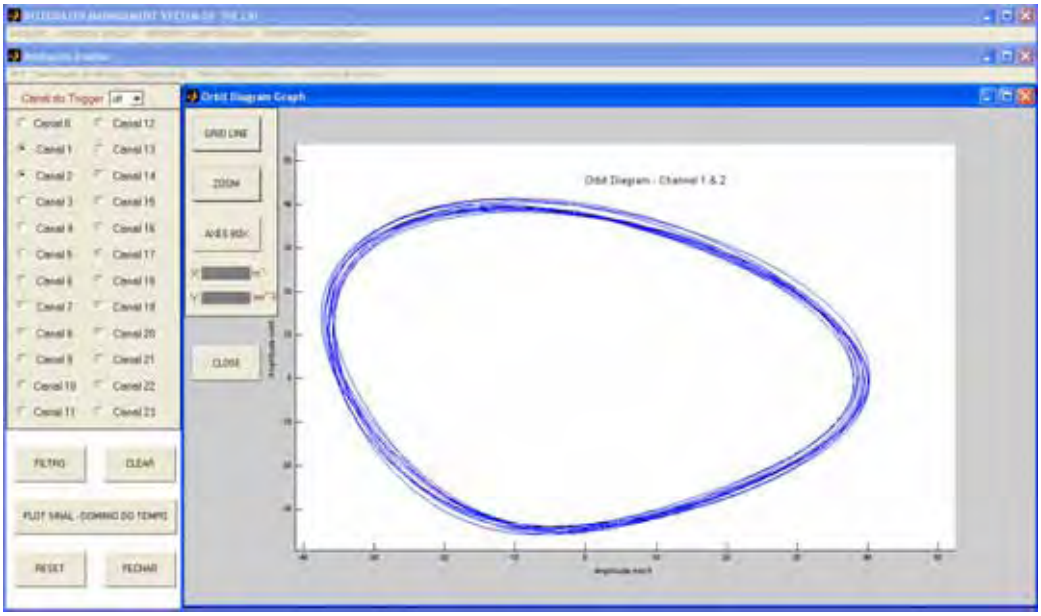


Figura 9.38 – Diagrama de órbita da turbina em boas condições de funcionamento – PCH Buriti

Considerando a rotação do grupo gerador e levando em conta que se trata de uma máquina hidráulica montada sob fundações rígidas, a Norma ISO 7919-1:1996 recomenda

como o parâmetro de vibração mais apropriado para analise a oscilação relativa eixo-mancal, medida com transdutores do tipo indutivo sem contato. Devido à forma construtiva, apenas o MGG e o MCT puderam ser instrumentados dessa forma, e o MGT não pode ser monitorado diretamente. Para se obter uma certa indicação das condições na turbina, foi medida a vibração absoluta do mancal combinado na direção axial, com uso de um acelerômetro.

A seção cinco da norma ISO 7919 (ISO 7919-5:1996), utiliza como severidade de vibração a amplitude da oscilação relativa eixo-mancal avaliada com uso da fórmula: $S_{\max} = \sqrt{S(V)^2 + S(H)^2}$; onde S(V) e S(H) são as oscilações medidas simultaneamente na direção vertical e horizontal do eixo, em um plano transversal o mais próximo possível do mancal. Para um grupo gerador com velocidade de rotação de 327 rpm (5,45 Hz), são definidos os seguintes níveis (tabela 9.18):

Tabela 9.18 – Severidade de vibração segundo a norma ISO – PCH Buriti

Nível	Faixa em μm	Recomendações
A	Até 78	Nível esperado no comissionamento. Muito bom.
B	79 a 145	Faixa considerada boa. Aceitável para operação continuada sem restrições.
C	146 a 260	Faixa considerada insatisfatória para operação contínua. Aceitável para operação por períodos limitados. Deve ser revisada logo que se tenha oportunidade.
D	Acima de 260	Nível de vibração inaceitável. Nesta faixa se poderá induzir quebra.

Fazendo o uso do ambiente análise e do comando severidade de vibração pode-se tomar tal severidade para o equipamento em boas condições conforme mostrado na figura 9.39.

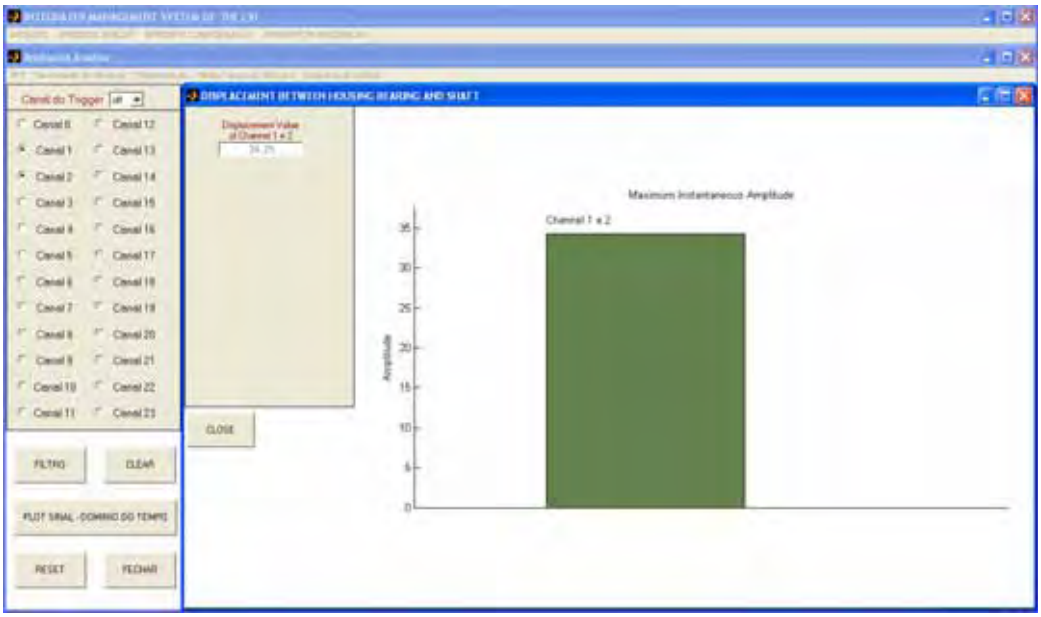


Figura 9.39 – Severidade de Vibração para a máquina em boas condições (34,25 µm) – PCH Buriti.

Dessa maneira é possível fazer uma análise prévia da máquina antes da aplicação da EBFPD e compara-la com os resultados obtidos quando a máquina apresentar algum problema obtendo-se assim um histórico efetivando a ação manutendora.

Configuração das freqüências de interesse, bandas de freqüências e alarmes e *trips* (global e local).

Será alvo de análise a freqüência de rotação (5,5 Hz) e seus 3 primeiros harmônicos (10,9; 16,4 e 21,8 Hz), a freqüência de giro das pás (27,3 Hz) do rotor e seus 3 primeiros harmônicos (54,5; 81,8 e 109) e por fim, a freqüência de passagem das pás (87,2 Hz) e seus 3 primeiros harmônicos (174,4; 261,6 e 348,8 Hz). Após definidas todas as freqüências representativas do funcionamento da turbina pode-se definir suas respectivas largura de banda que são respectivamente: (3 – 8,2 Hz); (8,2– 13,6 Hz); (13,6 – 19,1 Hz); (19,1 – 24,1 Hz); (24,1 – 29,1 Hz); (52,5 – 56,5 Hz); (79,75 – 83,75 Hz); (107 – 111 Hz); (85,20 – 89,20 Hz); (172,4 – 176,4 Hz); (259,6 – 263,6 Hz) e (346,8 – 350,8 Hz).

Dessa maneira é possível obter os valore das amplitudes das bandas de freqüência antes da definição dos valores de alarme e *trip* pala observação do EBFPD preliminar conforme ilustra a figura 9.40.

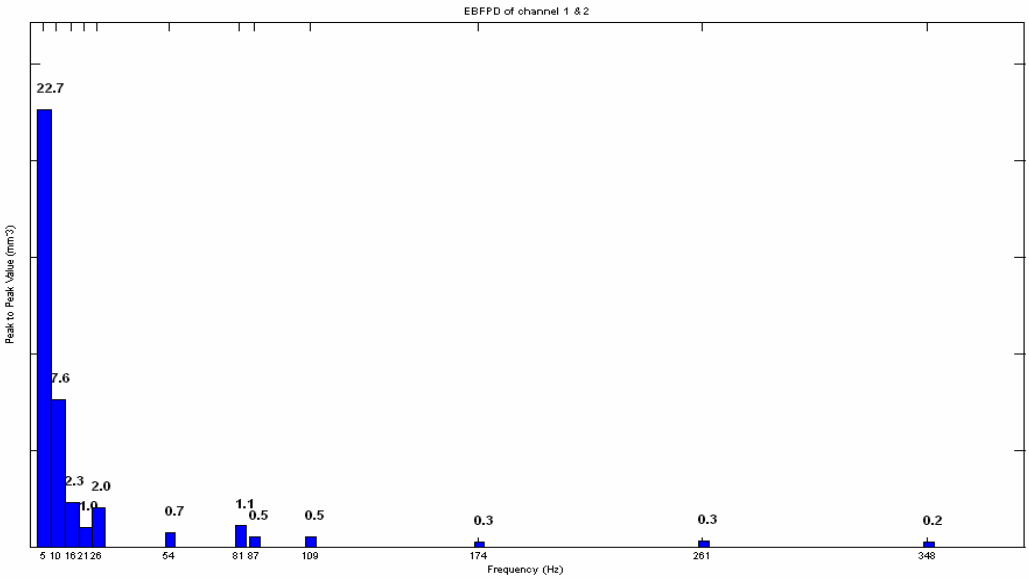


Figura 9.40 – EBFPD adquirido previamente para análise das amplitudes e definição dos valores e *trips* locais – PCH Buriti.

Conforme definido em tópicos anteriores define-se para esse caso os seguintes alarmes e *trips* para as bandas conforme tabela 9.19, 9.20 e 9.21.

Tabela 9.19 – Freqüências de interesse, alarme e trip relativos a rotação da turbina – PCH Buriti.

BANDAS DE FREQUÊNCIA RELATIVAS À FREQÜÊNCIA DE ROTAÇÃO DA TURBINA E SUAS HARMÔNICAS				
Freqüência (Hz)	Limite inferior da banda de freqüência (Hz)	Limite superior da banda de freqüência (Hz)	Alarme (µm)	Emergência (µm)
5,45	3	8,2	34,2	39,3
10,9	8,2	13,6	6,8	7,8
16,35	13,6	19,1	2,6	3,1
21,8	19,1	24,1	1,5	1,71

Tabela 9.20 – Freqüências de interesse, larguras das bandas e valores de alarme e *trip* relativas rotação das pás do rotor – PCH Buriti.

BANDAS DE FREQUÊNCIA RELATIVAS À FREQÜÊNCIA DE ROTAÇÃO DAS PÁS DO ROTOR DA TURBINA E SUAS HARMÔNICAS				
Freqüência (Hz)	Limite inferior da banda de freqüência (Hz)	Limite superior da banda de freqüência (Hz)	Alarme (µm)	Emergência (µm)
27,25	24,1	29,1	2	2,3
54,5	52,5	56,5	0,8	1
81,75	79,75	83,75	1,3	1,5
109	107	111	0,3	0,4

Tabela 9.21 – Freqüências de interesse, larguras das bandas e valores de alarme e *trip* relativas a passagem das pás – PCH Buriti.

BANDAS DE FREQUÊNCIA RELATIVAS À FREQÜÊNCIA DE PASSAGEM DAS PÁS DA TURBINA E SUAS HARMÔNICAS				
Freqüência (Hz)	Limite inferior da banda de freqüência (Hz)	Limite superior da banda de freqüência (Hz)	Alarme (µm)	Emergência (µm)
87,2	85,2	89,2	0,5	0,6
174,4	172,4	176,4	0,3	0,4
261,6	259,6	263,6	0,3	0,4
348,8	346,8	350,8	0,16	0,2

O valor de alarme e emergência são respectivamente 145 e 260 µm conforme a tabela 9.18 referente à normatização ISO.

Treinamento das RNA's

Com o objetivo de mostrar a capacidade da técnica do EBFPD, duas RNA's foram treinadas com o objetivo de detectar a evolução de uma determinada falha, no caso a

evolução do desalinhamento. As redes neurais artificiais foram treinadas para dois tipos de falhas que são pequeno desalinhamento e severo desalinhamento. A figura 9.41 mostra a normalização do espectro de bandas de freqüência para o caso da condição boa.

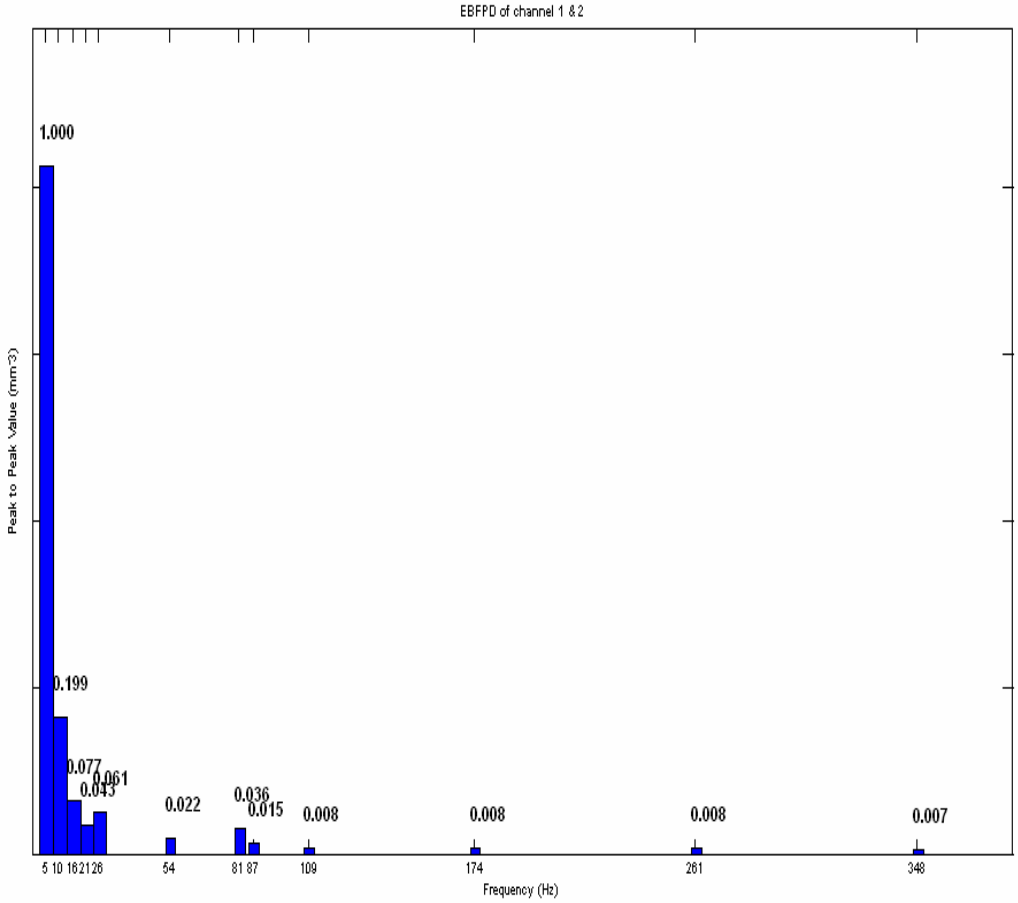


Figura 9.41 – Espectro de bandas de freqüências normalizado para na condição boa de funcionamento – PCH Buriti.

A tabela 9.22 mostra a variação da porcentagem das amplitudes das bandas na condição boa, bem como, a variação aceitável das amplitudes das bandas para cada caso de falha.

Tabela 9.22 – Variação das porcentagens de amplitude de cada banda relativa a boa condição e falhas – PCH Buriti

Freqüências de interesse (Hz)	% aceitável para a condição de bom funcionamento		% para a condição de falha por pequeno desalinhamento		% para a condição de falha por severo desbalanceamento	
	% mínima	%máxima	% mínima	%máxima	% mínima	%máxima
5,45	Cte = 1	Cte = 1	Cte = 1	Cte = 1	Cte = 1	Cte = 1
10,9	15	25	25	35	35	5
16,35	5	18	5	18	5	18
21,8	2	16	5	18	5	18
27,25	2	16	-	-	-	-
54,5	1	7	-	-	-	-
81,75	1	7	-	-	-	-
87,20	0,5	2,5	-	-	-	-
109	0,1	1,5	-	-	-	-
174,4	0,05	1,5	-	-	-	-
261,6	0,05	1,5	-	-	-	-
348,8	0,05	1,5	-	-	-	-

Lembrar que o número de pontos de entrada da rede neural boa para os casos apresentados nesse trabalho difere dos números de pontos utilizados na entrada das redes neurais responsáveis pela detecção dos defeitos (ver capítulo 7).

Treinamento e testes com as RNA's

Conforme descrito em tópicos anteriores serão feitos alguns testes para saber a qualidade do treinamento das RNA's antes de aplica-as no reconhecimento das falhas. Por

este motivo utilizaremos tabelas para simplificar a discussão dos resultados. A tabela 9.23, 9.24 e 9.25 mostra os resultados referentes ao treinamento de cada rede para os diferentes casos que se pretende análise.

Tabela 9.23 – Resultados obtidos pela rede responsável pelo diagnóstico da boa condição nos testes aplicados – PCH Buriti

VERIFICAÇÃO RNA DA CONDIÇÃO BOA		
	Condição rede_boa 1	Condição rede_boa 2
CASO 1	Todos os dados foram reconhecidos (saída: 0,98 – 1,02)	Saídas bem diferentes da esperada

Tabela 9.24 – Resultados obtidos pela rede responsável pelo diagnóstico da falha de desalinhamento nos testes aplicados – PCH Buriti

VERIFICAÇÃO RNA DA CONDIÇÃO DE FALHA – PEQUENO DESALINHAMENTO		
	Condição rede_falha 1	Condição rede_falha 2
CASO 1	Todos os dados foram reconhecidos (saída: 0,99 – 1,0)	Saídas bem diferentes da esperada

Tabela 9.25 – Resultados obtidos pela rede responsável pelo diagnóstico da falha de desbalanceamento nos testes aplicados – PCH Buriti

VERIFICAÇÃO RNA DA CONDIÇÃO DE FALHA – SEVERO DESALINHAMENTO		
	Condição rede_falha 1	Condição rede_falha 2
CASO 1	Todos os dados foram reconhecidos (saída: 0,99 – 1,0)	Saídas bem diferentes da esperada

Diagnóstico automático

Depois de feito o treinamento das RNA's para os casos estudos utilizando sinais teóricos provenientes do simulador de dados, aplica-se o software IMSLVI para a detecção de falhas.

Para a detecção e comprovação da falha utilizaram-se sinais provenientes das duas turbinas kaplan da PCH Buriti, que são idênticas. A máquina 1 apresentou perfeito funcionamento após comissionamento (figura 9.42 – aquisição 1), mas após certo período seu estado de funcionamento migrou de bom funcionamento para um desalinhamento de grau leve (figura 9.43 – aquisição 2). A máquina 2 apresentou o defeito de desalinhamento severo conforme mostra o diagnóstico na figura 9.44 (aquisição 3). Para uma melhor visualização utilizamos os dois sinais como se fosse de uma máquina só, ou seja, um sinal da máquina em perfeitas condições de funcionamento e os outros dois como se fossem históricos das falhas.

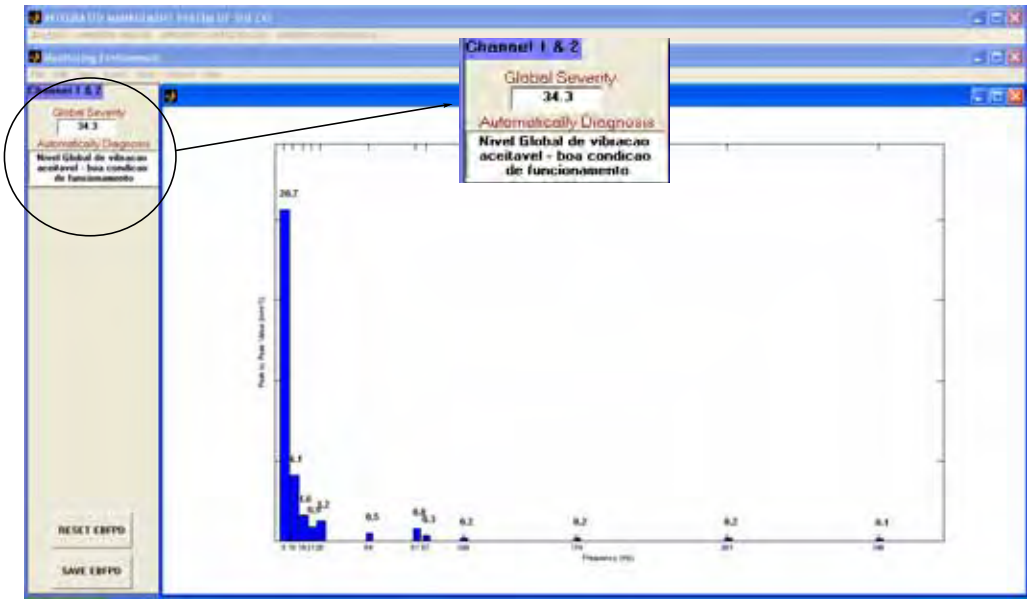


Figura 9.42 – Detecção da condição boa pela RNA – PCH Buriti

Com a evolução do defeito treinaram-se duas redes neurais, uma responsável pela detecção da falha de desalinhamento em seu estágio inicial e a outra para detectar a falha em um estado mais severo.

Na figura 9.43 (aquisição 2) pode-se notar que somente o alarme local de severidade de vibração da banda de freqüência do primeiro harmônico e banda de freqüência da fundamental da rotação do rotor foi acionado. O alarme de severidade local na banda de freqüência enfatiza que algum problema está ocorrendo em relação ao eixo da turbina, o que é confirmado pela RNA. Os *trip's* de severidade locais foram acionados para a o terceiro harmônico da freqüência de passagem das pás do rotor e terceiro harmônico da freqüência de passagem das pás diretrizes, enfatizando que algo está ocorrendo com as mesmas. Como nenhuma RNA foi treinada para a detecção de falhas relacionadas com essas bandas de freqüência, não se pode diagnóstica-las pelo uso das mesmas.

Os alarmes globais e locais foram acionados conjuntamente, pois, somente duas medidas dos equipamentos foram utilizadas como base de cálculo até o momento, fazendo com que seus valores coincidissem. Para uma melhor visualização, os alarmes locais foram omitidos na figura 9.43.

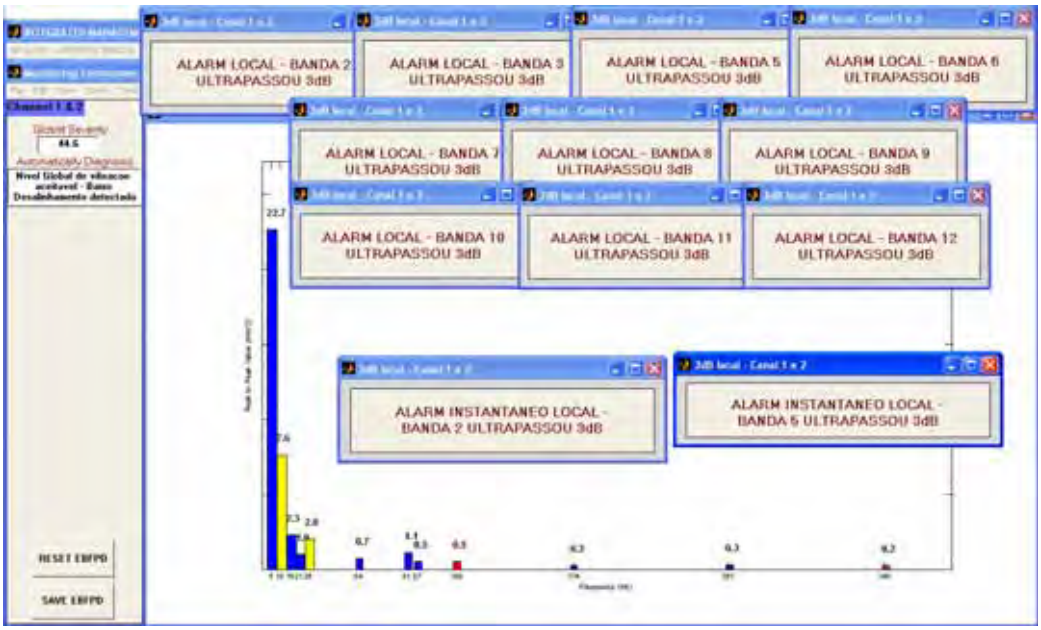


Figura 9.43 – Detecção do defeito de baixo desalinhamento pela RNA – PCH Buriti.

Na Figura 9.44 (aquisição 3) pode-se notar a diferença entre o alarm local (bandas: 2, 4, 6, 8, 9, 10 e 12) e alarm instantâneo (bandas: 4, 6, 9 e 10) das bandas devido ter-se adquirido mais de dois sinais.

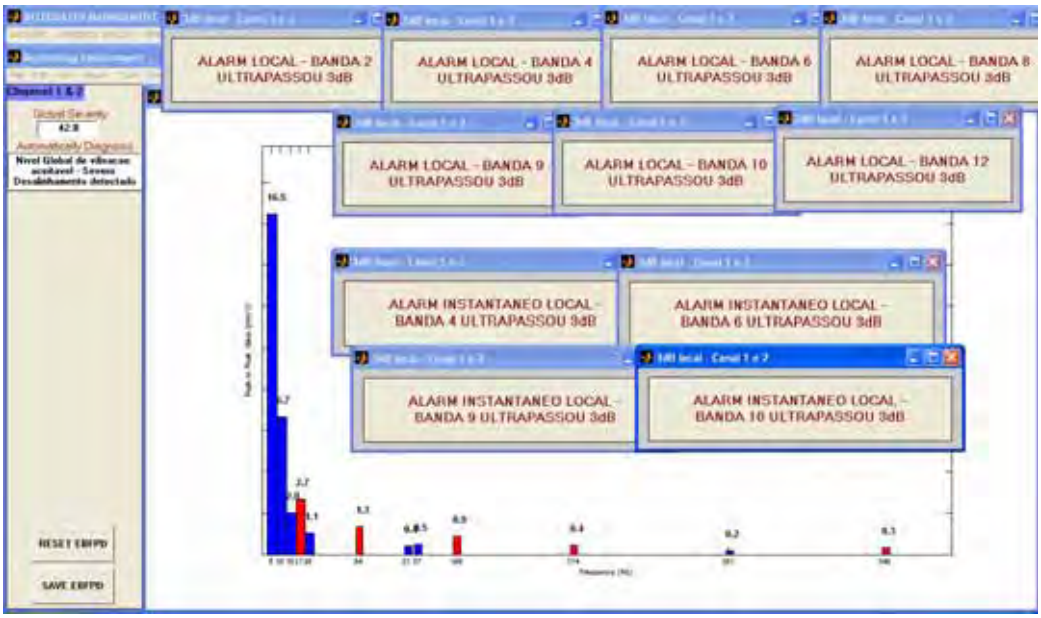


Figura 9.44 - Detecção do defeito de baixo desalinhamento pela RNA – PCH Buriti.

Pôde-se notar que o alarm e *trip* global não foi acionado, mas mesmo sem ele a rede foi capaz de detectar todos os defeitos para a qual foi treinada.

Os valores de saída das RNA's em cada caso é mostrado na tabela 9.26.

Tabela 9.26 – Valores de saída das RNA's treinadas para a UHE Limoeiro

SAÍDA DAS RNA'S			
	RNA BOA	RNA PEQUENO DESALINHAMENTO	RNA SEVERO DESALINHAMENTO
Condição bom funcionamento.	1,00	-	-
Falha de pequeno desalinhamento	0,86	1,00	0,46
Falha de severo desalinhamento	0,73	0,53	0,99

Análise de dados posterior ao diagnóstico da falha

Para finalizar todo o processo de monitoramento da máquina faz-se a análise dos dados após o aparecimento da falha conforme feito previamente, ou seja, faz-se um histórico dos resultados da *FFT*, diagrama de órbita e severidade de vibração conforme ilustram as figuras 9.45, 9.46, 9.47, 9.48, 9.49 e 9.50.

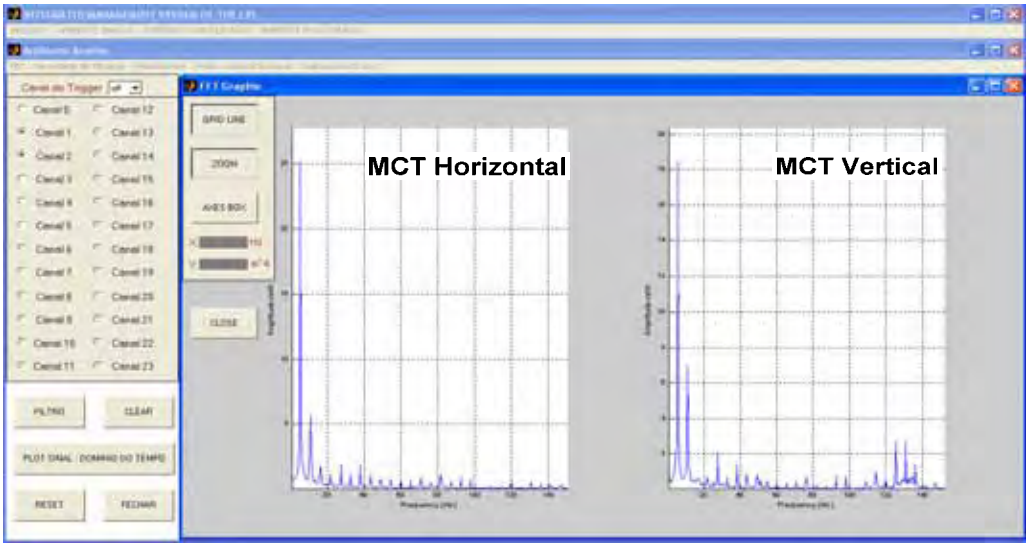


Figura 9.45 – Espectro de freqüência da máquina com baixo desalinhamento – PCH Buriti

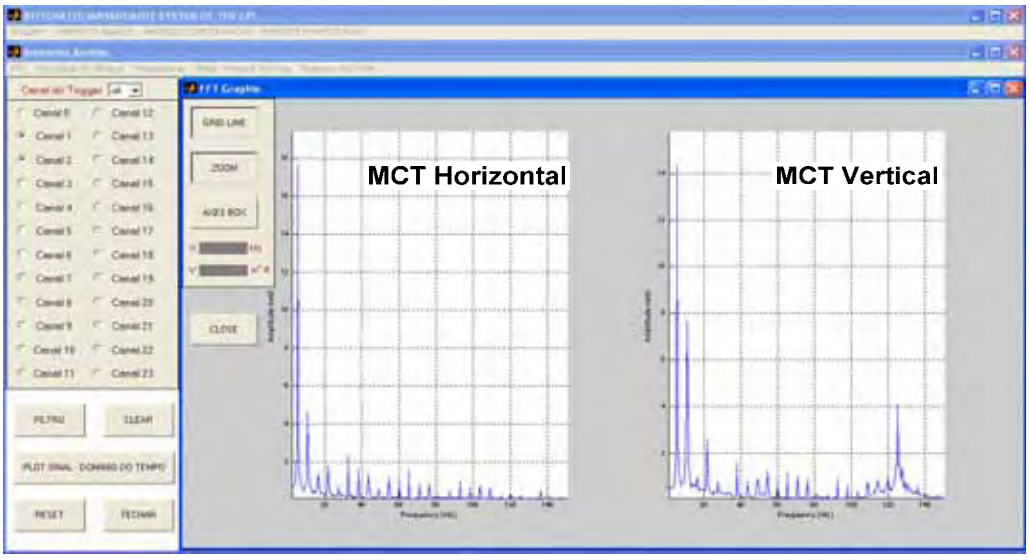


Figura 9.46 – Espectro de freqüência da máquina com severo desalinhamento – PCH Buriti

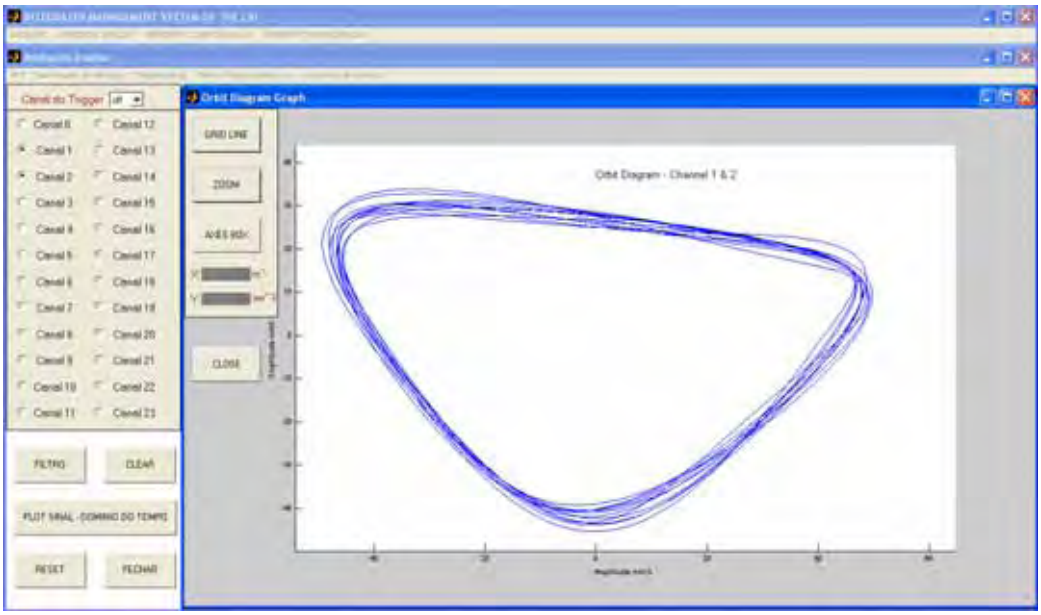


Figura 9.47 – Diagrama de órbita da maquina com baixo desalinhamento – PCH Buriti

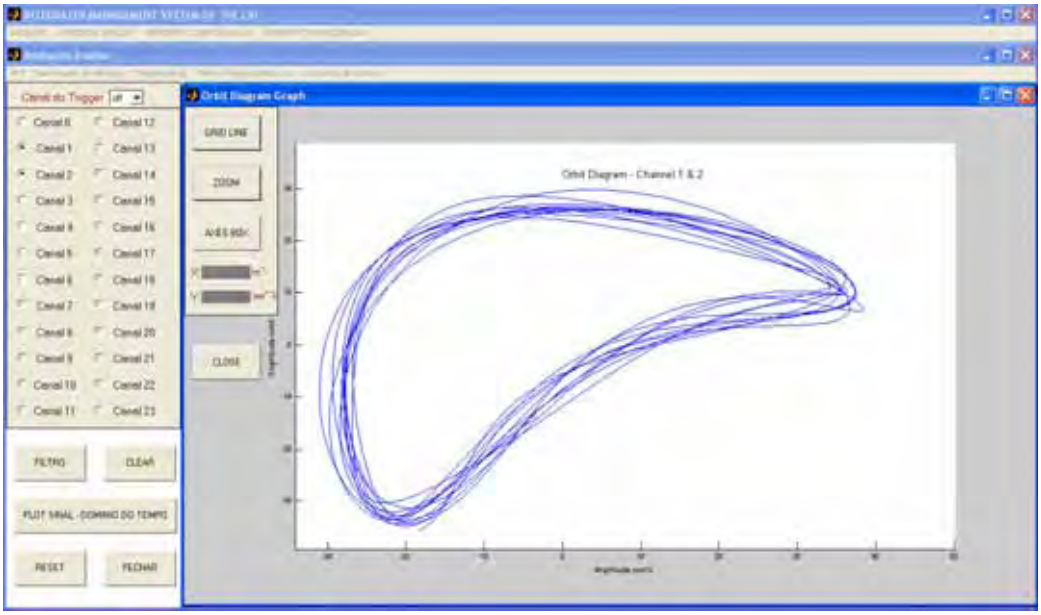


Figura 9.48 – Diagrama de órbita da maquina com severo desalinhamento – PCH Buriti

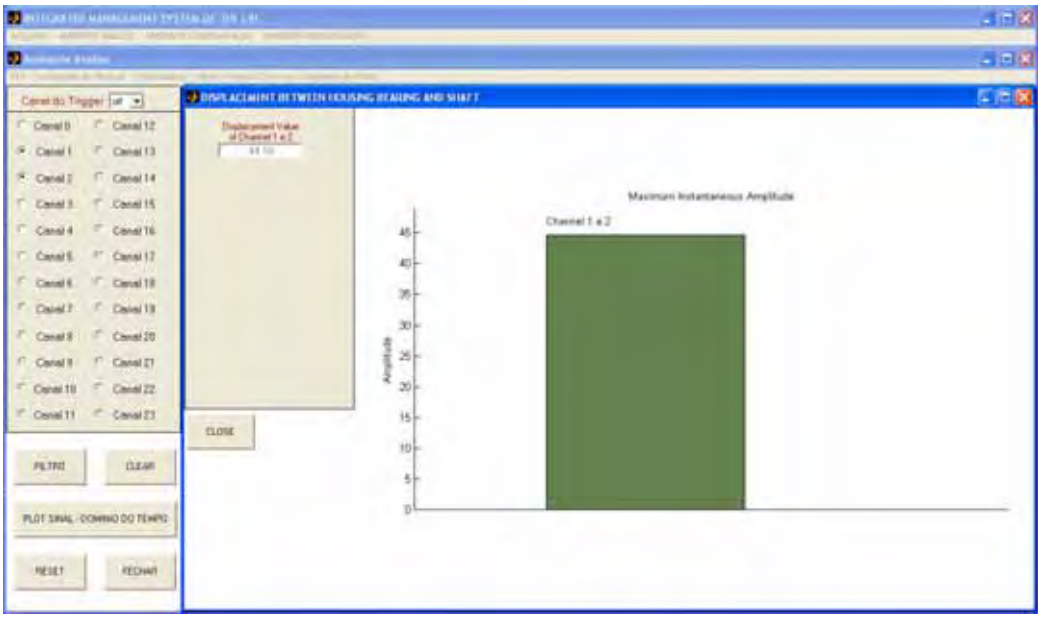


Figura 9.49 – Amplitude instantânea máxima da máquina com a falha de baixo desalinhamento (44,56µm).

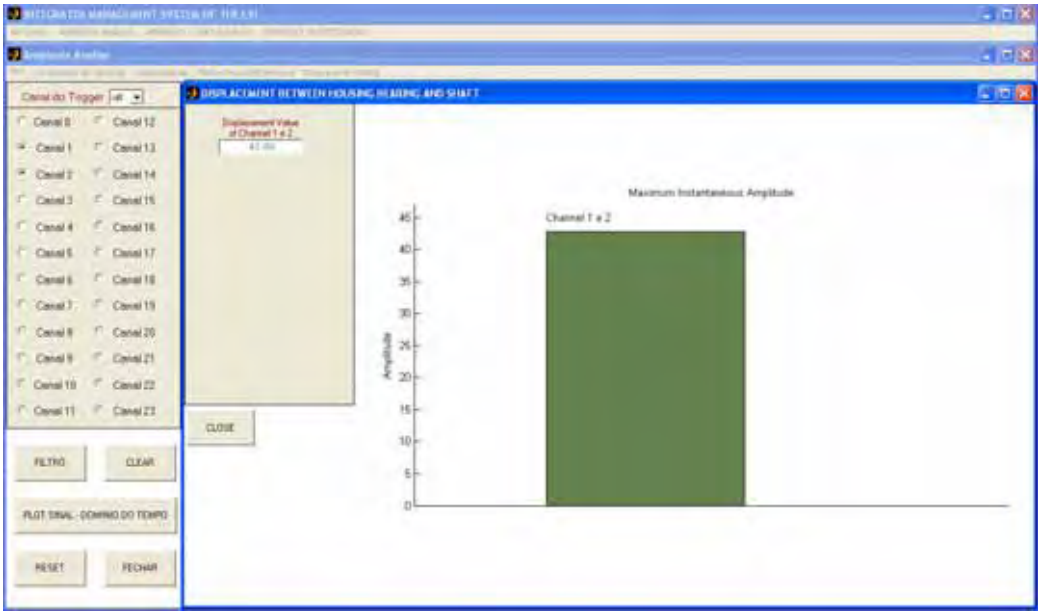


Figura 9.50 – Amplitude instantânea máxima da máquina com a falha de severo desalinhamento (42,8µm).

CAPÍTULO 10

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Após a definição e aplicação da técnica do Espectro de bandas de Freqüência puderam-se obter as seguintes conclusões:

- A técnica do Espectro de Banda de Freqüência Pré-Definida pode ser usada tanto para qualificar quanto quantificar a falha em turbinas hidráulicas de qualquer porte e características construtivas, sendo seus dados fidedignos a condição de funcionamento do equipamento, ou seja, é uma técnica totalmente flexível e customizada;
- A técnica de redução (EBFPD) proposta nesse trabalho pode ser usada com eficiência e confiabilidade como dado de entrada em RNA's obtendo-se o diagnóstico automático de falhas.
- Visando a monitoração e gerência da manutenção alarmes simples (forma visual) podem ser aplicados em conjunto com a técnica do EBFPD.
- A RNA utilizada possui características suficientes para identificar as falhas em turbinas hidráulicas, bem como, definir o grau de severidade (diferentes estágios) que as mesmas possuem;

- Os dados provenientes desta técnica são reduzidos viabilizando a transmissão dos mesmos via o sistema de intranet especial desenvolvido para o gerenciamento das PCH's de forma segura e confiável

Sugestões para Trabalhos Futuros

Visando melhorar a aplicação desta nova técnica fazem-se algumas citações que poderão ser feitas em trabalhos futuros:

- Utilizar maior quantidade de aquisições e em diferentes períodos de funcionamento das turbinas hidráulicas para obter um histórico mais fidedigno dos equipamentos e analisar de forma ampla o resultado do EBFPD;
- Aplicar a técnica utilizando diferentes máquinas rotativas, como por exemplo, o multiplicador (ou redutores) e gerador dessas unidades de geração de energia;
- Fazer uma análise mais aprofundada da influência dos fatores de uma RNA quando utilizado dados provenientes de um EBFPD, como por exemplo, fazer uma análise mais detalhada do número de camadas, redes por camada e treinamentos que possam ser utilizados;
- Otimizar o software de treinamento para as RNA's conforme proposto nesse trabalho.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, H. ; OLIVEIRA, J. **Inteligência computacional aplicada à administração, economia e engenharia em matlab**. São Paulo: Thomson Learning, 2007.

ALEXANDRE, R. P. **Redes neurais**: aplicação no monitoramento da vida de ferramenta de corte. 2005. 105 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005.

ALMEIDA, M.T. **Manutenção preditiva:** confiabilidade e qualidade. Itajubá: Fundação de Pesquisa e Assessoramento à Indústria, 1999. Curso de análise de vibrações I. Disponível em: <http://www.mtaev.com.br>. Acesso em: 12 abr. 2008.

ALMEIDA, M. T.; GOZ, R. D. S. ; ALMEIDA, F. R. V. **Curso de análise de vibração I**. Itajubá: FUPAI, 2007.

ARATO, A. J. **Manutenção preditiva usando análise de vibrações.** Barueri: Manole , 2004.

BARRON, R. **Engineering condition monitoring:** practice, methods and applications. 2.ed. New York: Longman, 1999.

BONIFÁCIO, M. A. **Manutenção industrial:** uma discussão entre a relação dos investimentos aplicados e os resultados operacionais e ambientais obtidos. Dissertação (Mestrado) – UNIARA – Centro Universitário de Araraquara, 2005.

CROCKER, M. J. **Handbook of noise and vibration control**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2007.

EBELING, C. E. **An introduction to reliability and maintainability engineering**. New York: McGraw-Hill, 1997.

EDUARDO, A. C. **Diagnósticos de defeitos em sistemas mecânicos rotativos através da análise de correlações e redes neurais artificiais.** Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

EISENMANN, R. C. **Machinery malfunction diagnosis and correction:** vibration analysis and troubleshooting for process industries. New Jersey: Prentice Hall, 1997.

FERNANDES, M. A. Como aumentar a disponibilidade das máquinas e reduzir custos de manutenção. **Revista Máquinas e Metais**, São Paulo, p. 316-329, abril 2003.

FERNANDEZ, O. et al. A decision support maintenance management system: development and implementation. **International Journal of Quality & Reality Management**, Bradford, v.20, p.965 -979, 2003.

GARG, A. ; DESHMUKH, S. G. Maintenance management: literature review and directions. **International Journal of Quality & Reability Management**, Bradford, v.12, p.205 -238, 2006.

GEBRAEEL, N.; LAWLEY, M.; LIU, R.; PARMESHWARAN, V. Residual life predictions from vibration-based degradation signals: a neural network approach. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, New York, 2004, v.51, p.694-700, 2004.

HARRIS, C. M. **Shock and vibration handbook**. 4.ed. Singapore: MacGraw-Hill, 1997. v.1.

HARTMANN, E.H. **Succesfully Installing TPM in a Non-Japanese Plant**. Pittsburgh, EUA: TPM Press, 1992

JARDINE, A. K. S.; JOSEPH, T. ; BANJEVIC, D. Optimizing condition-based maintenance decisions for equipment subject to vibration monitoring. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, Bradford, v.5, p. 192-202, 1999.

KARDEC, A. **Gestão estratégica e técnicas preditivas**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002.

LEGER, R. P.; GARLAND, W. J. ; POEHLMAN, W. F. S. Fault detection and diagnosis using statistical control charts and artificial neural networks. **Artificial Intelligence in Engineering**, Ashurst, v.12, p. 35-47, 1998.

LEWIS, E. E. **Introduction to reliability engineering**. 2.ed. Baskerville: Courier Stoughton, 1996.

LIPTROT, D.; PALARCHIO, G. Utilizing advanced maintenance practices and information technology to achieve maximum equipment reliability. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, Bradford, v.17, p. 919-928, 2000.

LONGMAN, A. W. **Engineering condition monitoring:** practice, methods and applications. 2.ed. London: Riverside Printing, 1999.

MARCONI, W. R. ; LIMA, C. R. C. Análise dos custos de manutenção e de não-manutenção de equipamentos produtivos. **Revista de Ciência e Tecnologia**, São Paulo, v.11, p. 35-42, 2003.

MENDONÇA, A. E. R. **Aplicação de redes neurais artificiais na identificação de falhas em redutores mecânicos de engrenagem.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2002.

MOUBRAY, J. **Manutenção Centrada em Confiabilidade**. São Paulo: Ed. SPES Engenharia de Sistemas Ltda, 2000.

NASCIMENTO, L. P. **Analisis del comportamento vibratorio para el mantenimiento predictivo de grupos hidráulicos**. Doctoral (Thesis) - Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 1995.

NEPOMUCENO, L. X. **Técnicas de manutenção preditiva.** São Paulo: Edgard Blucher, 1989. 2v.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO. **NBR 10816-1:** mechanical vibration – evaluation of machine vibration by measurements o non-rotating parts. Part 1: general guidelines. Suíça: ISO, 1995.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO. **NBR 7919-5:** mechanical vibration of non-reciprocating machines – measurements on rotating shafts and evaluation criteria. Part 5: machine sets in hydraulic power generating and pumping plants. Suíça: ISO, 1997

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO. **NBR 7919-1**. mechanical vibration of non-reciprocating machines – measurements on rotating shafts and evaluation criteria. Part 1: general guidelines. Suíça: ISO, 1996

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – **ISO 7919-2**, "Mechanical vibration of non-reciprocating machines – measurements on rotating shafts and evaluation criteria". Part 2: Large land-based steam turbine generator sets, ISO, Suíça, 1996

PAYA, B. A.; ESAT, I. I. ;BADI, M. N. M. Artificial neural network based fault diagnostics of rotating machinery using wavelet transforms as a pre-processor. **Mechanical Systems and Signal Processing**, London, v.11, p. 751-765, 1997.

PICANÇO, J. R. S. **Análise da produtividade na manutenção industrial.** 2002. 95f. Dissertação (Mestrado em Administração) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2002.

PUKITE, J.; PUKITE, P. **Modeling for reliability analysis**: markov modeling for reliability, maintainability, safety, and supportability analyses of complex systems. Piscataway: IEEE Press Marketing, 1998.

PUSEY, H. C.; ROEMER, M. J. An assessment of turbomachinery condition monitoring and failure prognosis technology. **Shock and Vibration Digest**, Washington, p. 365-371, v. 31, 1999.

RANDALL, R. B. **Frequency analysis**. 3.ed. Dinamarca: Bruel & Kjaer, 1987.

RANGANATH, K.; HUANG, S. H.; LEEP, H. R. Comparison of selected model evaluation criteria for maintenance applications. **Structural Health Monitoring**, Stanford, v.3, p. 213-224, 2004.

RAO, J. S. Vibratory condition monitoring of machines. New Delhi: Narosa Publishing House, 2000.

SARANGA, H. Relevant condition-parameter strategy for an effective condition-based maintenance. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, Bradford, v.8, p. 92-105, 2002.

SILVA, D. G. **Diagnóstico de falhas em redutores de velocidade submetido à variação de potência.** 2001. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual, Ilha Solteira, 2001.

SOUZA, A. C. **Gerenciamento da manutenção eletrônica de máquinas críticas em uma indústria automobilística.** 2003. 82 f. Monografia (Especialização em MBA) – Departamento de Economia, Contabilidade, Administração e Secretariado – Universidade de Taubaté, Taubaté, 2003.

TAKAHASHI, Y & OSADA, T. **Manutenção Produtiva Total**. São Paulo: Instituto IMAM, 1993

TAPLAK, H.; UZMAY, I.; YILDIRIM, S. An artificial neural network application to fault detection of a rotor bearing system. **Industrial Lubrication and Tribology**, Droitwich, v.58, p. 32-44, 2006.

TICHY, M. **Applied methods of structural reliability.** Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1993.

TU, P. Y. L. et al. An integrated maintenance management system for an advanced manufacturing company. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, London, v.17, p.692-703, 2001.

YAM, R. C. M.; TSE, P. W.; LI, L. ;TU, P. Intelligent predictive decision support system for condition-based maintenance. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, London, v.17, p.383-391, 2001.

WANG, C. C. ; TOO, G. P. J. Rotating machine fault detection based on HOS and artificial neural networks. **Journal of Intelligent Manufacturing**, New York, v.13, p. 283-293, 2002.

WATER, H. A maintenance model for quality management. **International Journal of Quality & Reliability Management**, Bradford, v.17, p.756-770, 2000.

APÊNDICE A

ROTINA PARA O CÁLCULO DA EBFPD

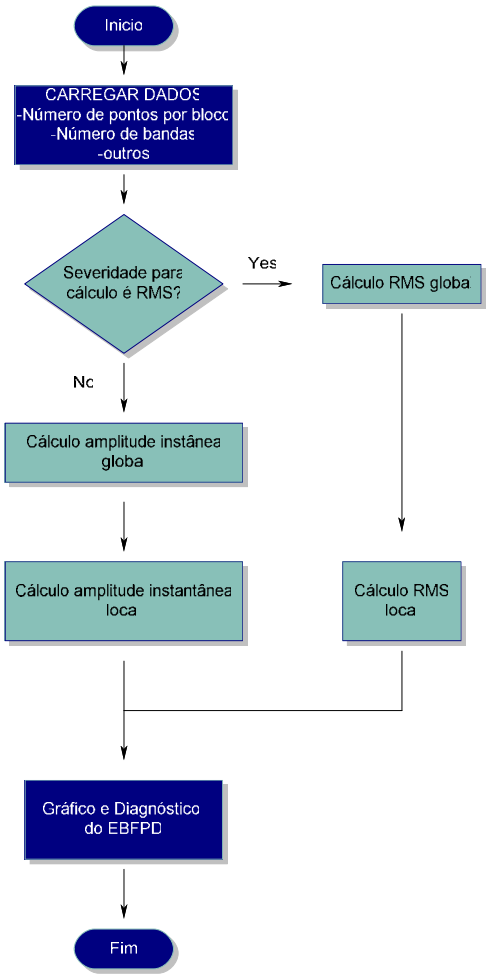


Figura A1 – Fluxograma da rotina de cálculo do EBFPD

```
%function monitoring_function
%carregamento dos valores para cálculo futuro

global day
global month
global year
```

```
global NPB                  %numero de pontos por bloco
global taxa_aquisicao
global nc                   %numero de canais
global arquivo_leitura
global matriz_sinal         %vetor sinal original
global analise              %configurar tecla analise
global monitoracao          %configurar tecla monitoracao
global NB                   %numero de blocos


global trip_b
global alarm_b
global inf_l
global sup_l
global nbc
global trip_g
global alarm_g
global Sa
global Sb
global ts
global p
global path
global global_severity
global local_severity

 Wn_nyquist = taxa_aquisicao/2;

%teste realizado para saber se na aquisição foi utilizado trigger
(cálculo MTS)

if t_true == 1
    %subrotina que realiza o cálculo
    vetor_mts_function
end

if p == 0
    p = 1;
    global_severity = [];
    local_severity = [];
else
    [p,k] = size(global_severity);
    clear k
    p = p+1;
end

%vetor das frequências
freq = linspace(0,Wn_nyquist,(NPB/2)+1);
freq2 = linspace(0,taxa_aquisicao,NPB);

for i = 1:length(Sa)
    if ts(i) == 0
        for r = 1:nbc(i)
            signal_rms_globalf = 0;
            signal_ampl_globalf = 0;

            if t_true == 1
                %global RMS value
==============================================
```

```
                if r == 1
                    %calculation of the time sychronous average
                    function_mts_monitoring

                    signal_rms_global = mts_final_monitoring;
                    signal_rms_global = signal_rms_global .*
signal_rms_global;
                    signal_rms_global =
sum(signal_rms_global)/length(signal_rms_global);
                    signal_rms_global = sqrt(signal_rms_global);
                    signal_rms_globalf = signal_rms_globalf +
signal_rms_global;
                    clear signal_rms_global

                    global_severity(1,1)
                    global_severity(p,i) = signal_rms_globalf

                    clear signal_rms_globalf
                end

%================================================================

                %edição do sinal
                FFT_s = fft(mts_final_monitoring);

                %cálculo do sinal editado
                hp =inf_l(i,r);
                lp =sup_l(i,r);

                n = 1;
                ffte2 = zeros(1,NPB);
                for cont = 1:(length(FFT_s)/2)+1
                    if freq(cont) >= hp & freq(cont) <= lp
                        ffte2(cont) = FFT_s(cont);
                        a(n) = cont;
                        n=n+1;
                    end
                end

                a2 = (length(FFT_s)/2);
                for cont = 2:(length(FFT_s)/2)-1
                    ffte2(NPB-(cont-2)) = conj(ffte2(cont));
                    a2 = a2-1;
                end

                %local RMS value
                signal_rms = ifft(ffte2);
                signal_rms = real(signal_rms);
                singal_rms = signal_rms.*signal_rms;
                signal_rms = sum(signal_rms)/length(signal_rms);


                signal_rms = sqrt(signal_rms);

                local_severity(p,i,r) = signal_rms;

                clear signal_rms
                clear FFT_s
```

```
                clear ffte2

            else

                %global RMS value
================================================
                if r == 1
                    for k = 1:NB
                        signal_rms_global = matriz_sinal((NPB*(k-
1))+1:NPB*k,Sa(i)+2);
                        signal_rms_global = signal_rms_global .*
signal_rms_global;
                        signal_rms_global =
sum(signal_rms_global)/length(signal_rms_global);
                        signal_rms_global = sqrt(signal_rms_global);
                        signal_rms_globalf = signal_rms_globalf +
signal_rms_global;
                        clear signal_rms_global
                    end
                    signal_rms_globalf = signal_rms_globalf/k;

                    global_severity(p,i) = signal_rms_globalf;

                    clear signal_rms_globalf
                end

%================================================================


                %edição do sinal
                local_severityf = 0;
                for k = 1:NB
                    mts_final_monitoring = matriz_sinal((NPB*(k-
1))+1:NPB*k,Sa(i)+2);
                    FFT_s = fft(mts_final_monitoring);

                    %Cálculo do sinal editado
                    hp =inf_l(i,r);
                    lp =sup_l(i,r);

                    n = 1;
                    ffte2 = zeros(1,NPB);
                    for cont = 1:(length(FFT_s)/2)+1
                        if freq(cont) >= hp & freq(cont) <= lp
                            ffte2(cont) = FFT_s(cont);
                            a(n) = cont;
                            n=n+1;
                        end
                    end

                    a2 = (length(FFT_s)/2);
                    for cont = 2:(length(FFT_s)/2)-1
                        ffte2(NPB-(cont-2)) = conj(ffte2(cont));
                        a2 = a2-1;
                    end

                    %local RMS value
                    signal_rms = ifft(ffte2);
```

```
                    signal_rms = real(signal_rms);

                    signal_rms =
norm(signal_rms)/sqrt(length(signal_rms));

                    local_severityf = local_severityf + signal_rms;


                    clear signal_rms
                    clear FFT_s
                    clear ffte2
                    clear mts_final_monitoring
                end
                local_severity(p,i,r) = local_severityf/k;

                clear local_severityf
            end
        end
    else
        for r = 1:nbc(i)
            if t_true == 1
                %instantaneous global amplitude value
================================================
                if r == 1
                    if Sb == 0
                        function_mts_monitoring
                        mm_1 = mts_final_monitoring;
                        mm_2 = zeros(length(mm_1),1);
                    else
                        function_mts_monitoring_2
                        mm_1 = mts_final_monitoring1;
                        mm_2 = mts_final_monitoring2;
                    end

                    signal_ampl_global_mm1 =mm_1;
                    signal_ampl_global_mm2 = mm_2;

                    signal_ampl_global_mm1 = signal_ampl_global_mm1 .*
signal_ampl_global_mm1;
                    signal_ampl_global_mm2 = signal_ampl_global_mm2 .*
signal_ampl_global_mm2;

                    signal_ampl_global = signal_ampl_global_mm1 +
signal_ampl_global_mm2;
                    signal_ampl_global = sqrt(signal_ampl_global);
                    signal_ampl_global = max(signal_ampl_global);

                    global_severity(p,i) = signal_ampl_global;

                end

%=========================================================================
==========

                %edição do sinal
                FFT_s1 = fft(mm_1);
                NPB_n = length(FFT_s1);
```

```
%Cálculo do sinal editado

hp =inf_l(i,r);
lp =sup_l(i,r);

n = 1;
ffte2 = zeros(1,NPB_n);
for cont = 1:(length(FFT_s1)/2)+1
    if freq(cont) >= hp & freq(cont) <= lp
        ffte2(cont) = FFT_s1(cont);
        a(n) = cont;
        n=n+1;
    end
end

a2 = (length(FFT_s1)/2);
for cont = 2:(length(FFT_s1)/2)-1
    ffte2(NPB-(cont-2)) = conj(ffte2(cont));
    a2 = a2-1;
end

clear ffte2
clear FFT_s1


%signal ampli2
%edição do sinal
if Sb(i) == 0
    signal_ampl2 = mm_2;
else
    FFT_s2 = fft(mm_2);

    %Cálculo do sinal editado
    hp =inf_l(i,r);
    lp =sup_l(i,r);

    n = 1;
    ffte2 = zeros(1,NPB);
    for cont = 1:(length(FFT_s2)/2)+1
        if freq(cont) >= hp & freq(cont) <= lp
            ffte2(cont) = FFT_s2(cont);
            a(n) = cont;
            n=n+1;
        end
    end

    a2 = (length(FFT_s2)/2);
    for cont = 2:(length(FFT_s2)/2)-1
        ffte2(NPB-(cont-2)) = conj(ffte2(cont));
        a2 = a2-1;
    end
    signal_ampl2 = ifft(ffte2);
    signal_ampl2 = real(signal_ampl2);

    clear FFT_s2
    clear ffte2
end
```

```
                signal_ampl1 = signal_ampl1 .* signal_ampl1;
                signal_ampl2 = signal_ampl2 .* signal_ampl2;

                signal_ampl = signal_ampl1 + signal_ampl2;
                signal_ampl = sqrt(signal_ampl);
                signal_ampl = max(signal_ampl);

                local_severity(p,i,r) = signal_ampl;

                clear signal_ampl
            else

                if r == 1
                    if Sb == 0
                        mm_1 = matriz_sinal(:,Sa(i)+2);
                        mm_2 = zeros(length(mm_1),1);
                    else
                        mm_1 = matriz_sinal(:,Sa(i)+2);
                        mm_2 = matriz_sinal(:,Sb(i)+2);
                    end

                    %Amplitude instantânea global
=====================================================
                    signal_ampl_globalf = 0;
                    for k = 1:NB
                        Sa1 = mm_1(((NPB*(k-1))+1):(NPB*k)) ;
                        Sb1 = mm_2(((NPB*(k-1))+1):(NPB*k));
                        Sa2 = (Sa1).^2;
                        Sb2 = (Sb1).^2;
                        S = Sa2 + Sb2;
                        Smax = sqrt(S);
                        Smax_n(k) = max(Smax);
                        clear Smax
                    end
                    Smax = Smax_n;
                    clear Smax_n



                    signal1 = mean(Smax);
                    global_severity(p,i) = signal1;
                    clear signal1
                end

                %Aplitude instantânea local
                %edição do sinal
                local_severityf = 0;
                for k = 1:NB
                    signal1 = mm_1((NPB*(k-1))+1:NPB*k);

                    FFT_s1 = fft(signal1);

                    %Cálculo do sinal editado

                    hp =inf_l(i,r);
```

```
lp =sup_l(i,r);

n = 1;
ffte2 = zeros(1,NPB);
for cont = 1:(length(FFT_s1)/2)+1
    if freq(cont) >= hp & freq(cont) <= lp
        ffte2(cont) = FFT_s1(cont);
        a(n) = cont;
        n=n+1;
    end
end

a2 = (length(FFT_s1)/2);
for cont = 2:(length(FFT_s1)/2)-1
    ffte2(NPB-(cont-2)) = conj(ffte2(cont));
    a2 = a2-1;
end

signal_ampl1 = ifft(ffte2);
signal_ampl1 = real(signal_ampl1);

clear FFT_s1
clear ffte2
clear signal1

if Sb == 0;
    signal2 = mm_2;
else
    signal2 = mm_2((NPB*(k-1))+1:NPB*k);

    FFT_s2 = fft(signal2);

    %Cálculo do sinal editado
    hp =inf_l(i,r);
    lp =sup_l(i,r);

    n = 1;
    ffte2 = zeros(1,NPB);
    for cont = 1:(length(FFT_s2)/2)+1
        if freq(cont) >= hp & freq(cont) <= lp
            ffte2(cont) = FFT_s2(cont);
            a(n) = cont;
            n=n+1;
        end
    end

    a2 = (length(FFT_s2)/2);
    for cont = 2:(length(FFT_s2)/2)-1
        ffte2(NPB-(cont-2)) = conj(ffte2(cont));
        a2 = a2-1;
    end

    signal_ampl2 = ifft(ffte2);
    signal_ampl2 = real(signal_ampl2);

    clear FFT_s2
    clear ffte2
    clear signal12
```

```
                    end

                    Sa_local = (signal_ampl1) .^2;
                    Sb_local = (signal_ampl2) .^2;

                    S_local = Sa_local + Sb_local;
                    S_local_max = sqrt(S_local);
                    S_local_max(k) = max(S_local_max);


                    clear signal_ampl
                    clear signal_ampl1
                    clear signal_ampl2
                end

                S_localf = mean(S_local_max);

                local_severity(p,i,r) = S_localf;

                clear local_severityf

            end
        end
        clear mm_1
        clear mm_2
    end
end



%subrotina utilizada para a janela de monitoramento (diagnóstido
automático e forma gráfica do EBPDF
grafico_configuracao_04
```

APÊNDICE B

ROTINA PARA A CONSTRUÇÃO DO GRÁFICO DA EBFPD

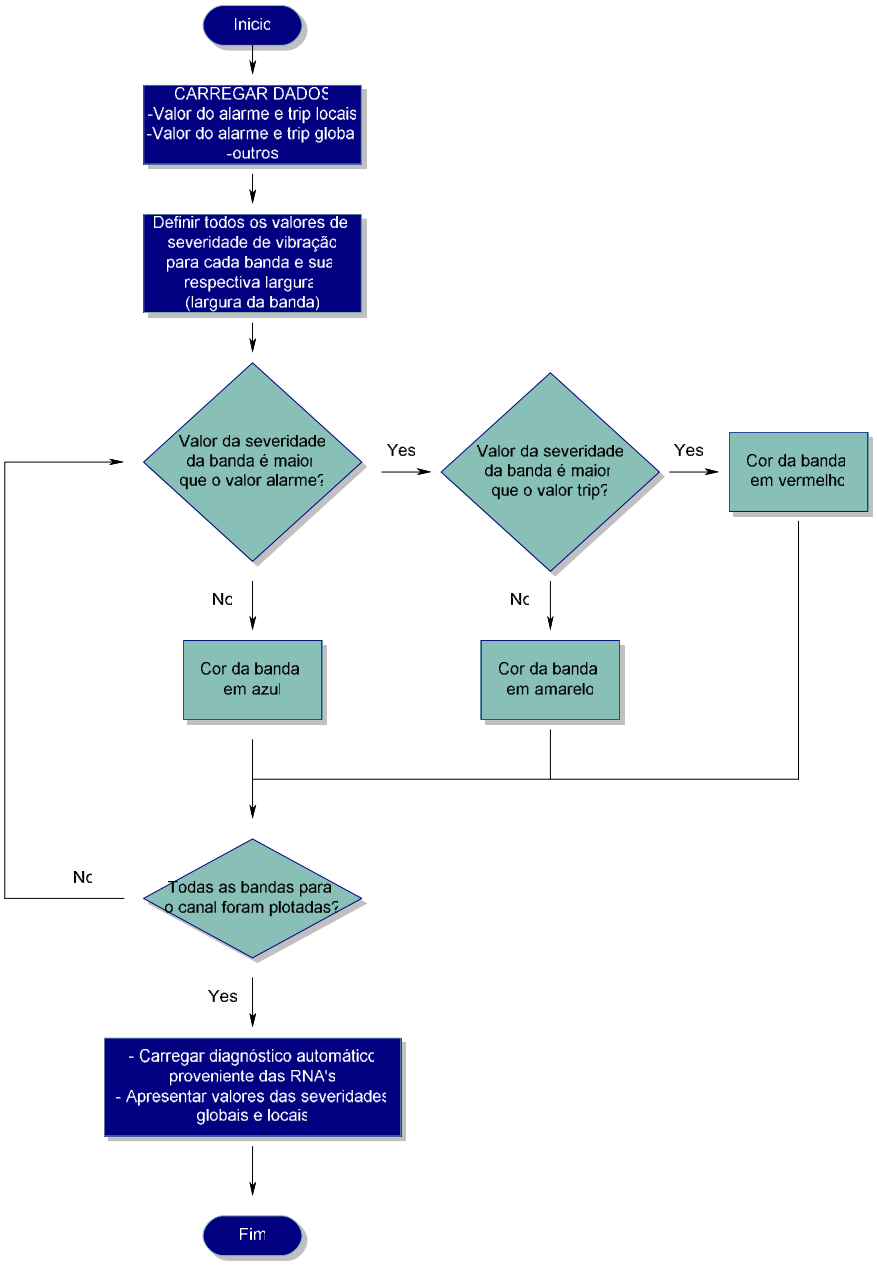


Figura A2 – Fluxograma da rotina para a construção do gráfico do EBFPD

```
base = [];
height = [];
for i = 1:length(Sa)
    n = 0;
    m = 0;
    clear base
    clear height
    for r = (max(nbc) - nbc(i) + 1):nbc(i)+(max(nbc) - nbc(i))
        m = m+1;
        %definition of the base vector will be used in the building of
        %bar charts
        base(1,m) = inf_l(i,r);
        base(2,m) = inf_l(i,r);
        base(3,m) = sup_l(i,r);
        base(4,m) = sup_l(i,r);


        %definition of the height vector used in the building of bar
charts
        height(1,m) = 0;
        height(2,m) = local_severity(p,i,m);
        height(3,m) = local_severity(p,i,m);
        height(4,m) = 0;

        if length(Sa) ~= 1

        end

        %Acceptable up to level B (blue)
        if local_severity(p,i,m) <= alarm_b(i,m)
            fill(base(:,m), height(:,m),'b')
        end

        %setting alarm
        if local_severity(p,i,m) >= alarm_b(i,m) & local_severity(p,i,m)
<= trip_b(i,m)
            %part of signal correlation with alarm (yellow)
            fill(base(:,m), height(:,m),'y')
        end

        %setting trip
        if local_severity(p,i,m) > trip_b(i,m)
            %part of signal correlation with emergency (red)
            fill(base(:,m), height(:,m), 'r')
        end

        hold on
        grid off
        box on

        n=n+1;
        tickx(n) = (base(2,m)+base(3,m))/2;
        ticky(n) = height(2,m);

        if r == 1
            if ts(i) == 1
```

```
                factor1 = (max(max(height(:,m)))*0.05);
            else
                factor1 = (max(max(height(:,m)))*0.01);
            end
        end

        text_t = text(0,0,sprintf('%.1f',max(max(height(:,m)))),
            'Color', [0 0 0], ...%'backgroundcolor',[1 1 1],.
            'FontSize', 9, ...
            'FontWeight', 'bold',...
            'position',[base(2,m) max(max(height(:,m))) + factor1]) ;
    end


    tickx = fix(tickx);
    set(gca,'xtick',tickx)
    set(gca,'yticklabel',[])
    set(gca,'fontsize', 7)


    ticky = sort(height(2,:));
    clear ticky_new
    %set(gca,'ytick',ticky)
    axis([0 max(max(base))*1.1 0 max(max(local_severity(p,i,:)))*1.2])
    clear tickx
    clear ticky
    xlabel('Frequency (Hz)')

    if ts(i) == 1
        if i <= length(Sb)
            ylabel('Peak to Peak Value (mm^-3)');

set(texto2_value(i),'string',sprintf('%.1f',global_severity(p,i)))
            title(sprintf('EBFPD of channel %.0f &
%.0f',Sa(i),Sb(i)),'fontweight','bold')
        else
            ylabel('Peak to Peak Value (mm^-3)');

set(texto2_value(i),'string',sprintf('%.1f',global_severity(p,i)))
            title(sprintf('EBFPD of channel
%.0f',Sa(i)),'fontweight','bold')
        end
    else
        ylabel('RMS Value (mm^-3/s)');

set(texto2_value(i),'string',sprintf('%8.3g',global_severity(p,i)))
        title(sprintf('EBFPD of channel %g',Sa(i)),'fontweight','bold')
    end
end

%Subrotina que responsável pelo diagnóstico da RNA
neural_network_jauru

%Alarmes intantâneo e dinâmico globais e locais
local_global_3dB
```

APÊNDICE C

ROTINA DAS RNA'S PARA DETECÇÃO DAS FALHAS

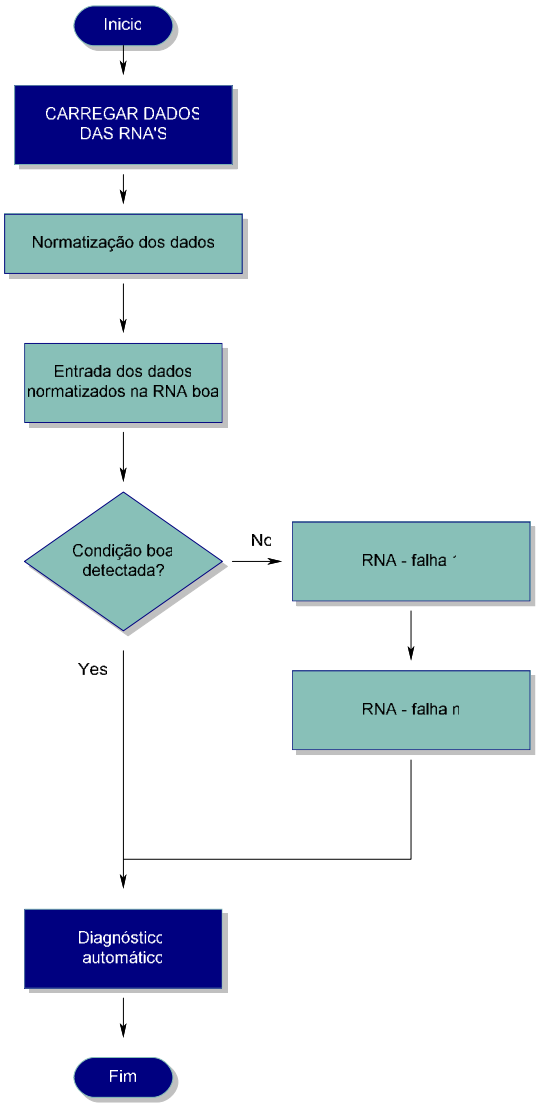


Figura A3 – Fluxograma da rotina de detecção de falhas pelas RNA's

```
%carregamento das redes para detecção das condições do equipamento

load rede_neural_buriti_good_rp_3_100 -mat %net_bg

load rede_neural_buriti_fault_mi_rp_2_100 -mat %net_bl

load rede_neural_buriti_fault_bh_rp_3_100 -mat %net_bh

for i = 1:length(Sa)
    %detection of the good condition
    for i_n = 1:12;
        a1(i_n) = local_severity(p,i,i_n);

        if i_n == 1
            b1 = a1(i_n);
        end
        a1(i_n) = a1(i_n)/b1;
    end
    a1
    good_condition_buriti = sim(net_bg,a1')




    if good_condition_buriti <=0.95 & good_condition_buriti <=1.05
        %detection of the light misalingment
        clear a
        for i_n = 1:4;
            a(i_n) = local_severity(p,i,i_n);

            if i_n == 1
                b = a(i_n);
            end
            a(i_n) = a(i_n)/b;
        end
        a
        misalingment_light_buriti = sim(net_bl,a')

        if misalingment_light_buriti >=0.95 & misalingment_light_buriti
<=1.05
            mil_true = 1;
        else
            mil_true = 0;
        end


        %detection oh the hard misilignment
        clear a
        for i_n = 1:4;
            a(i_n) = local_severity(p,i,i_n);

            if i_n == 1
                b = a(i_n);
            end
            a(i_n) = a(i_n)/b;
        end
```

```
        a
        misalingment_hard_buriti = sim(net_bh,a')

        if misalingment_hard_buriti >=0.95 & misalingment_hard_buriti
<=1.05
            mih_true = 1;
        else
            mih_true = 0;
        end


        if mih_true == 0 & mil_true == 1
            %Aceptable up to level B (blue)
            if global_severity(p,i) <= alarm_g(i)
                text_t = 'Nivel Global de vibracao aceitavel - Baixo
Desalinhamento detectado';
            end

            %setting alarm
            if global_severity(p,i) >= alarm_g(i) & global_severity(p,i)
<= trip_g(i)
                text_t = 'Nivel Global de vibracao em alarme - Baixo
Desalinhamento detectado';
            end

            %setting trip
            if global_severity(p,i) > trip_g(i)
                text_t = 'Nivel Global de vibracao em emergencia - Baixo
Desalinhamento detectado';
            end
        end


        if mih_true == 1 & mil_true == 0
            %Aceptable up to level B (blue)
            if global_severity(p,i) <= alarm_g(i)
                text_t = 'Nivel Global de vibracao aceitavel - Severo
Desalinhamento detectado';
            end

            %setting alarm
            if global_severity(p,i) >= alarm_g(i) & global_severity(p,i)
<= trip_g(i)
                text_t = 'Nivel Global de vibracao em alarme - Severo
Desalinhamento detectado';
            end

            %setting trip
            if global_severity(p,i) > trip_g(i)
                text_t = 'Nivel Global de vibracao em emergencia - Severo
Desalinhamento detectado';
            end
        end

    else
        %Aceptable up to level B (blue)
        if global_severity(p,i) <= alarm_g(i)
```

```
            text_t = 'Nivel Global de vibracao aceitavel - boa condicao
de funcionamento';
        end

        %setting alarm
        if global_severity(p,i) >= alarm_g(i) & global_severity(p,i) <=
trip_g(i)
            text_t = 'Nivel Global de vibracao em alarme - nao detectou
falha';
        end

        %setting trip
        if global_severity(p,i) > trip_g(i)
            text_t = 'Nivel Global de vibracao em emergencia - nao
detectou falha';
        end
    end
    set(texto3_value(i),'string',text_t)
end
```

APÊNDICE D

ROTINA UTILIZADA PARA O CÁLCULO DOS ALARMES DE 3Db

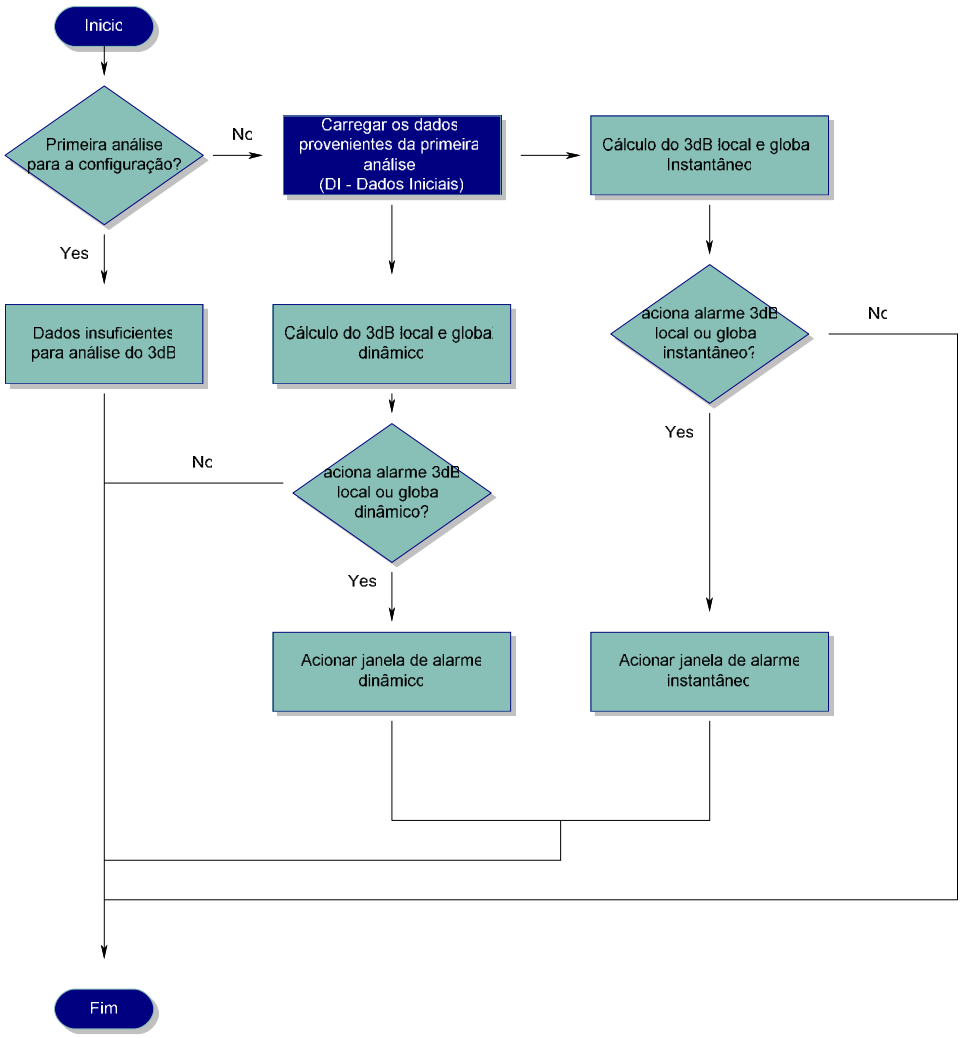


Figura A4 – Fluxograma da rotina de cálculo dos alarmes instantâneo e dinâmico locais e globais de 3dB

```
%Sa e Sb são os sinais proveniemtes dos proxímetros montados
perpendicularmente no eixo para o cálculo do deslocamento relativo eixo-
mancal
for i = 1:length(Sa)
    if p >= 2
        %global 3dB alarm - general
        global_dB = 20*log10(global_severity(p,i)/global_severity(1,i));

        if global_dB >= 3

            if i <= length(Sb)
                texto_prin = sprintf('3dB Global - Canal %g e
%g',Sa(i),Sb(i));
            else
                texto_prin = sprintf('3dB Global - Canal %g',Sa(i));
            end

            fig_3dB_global = figure('Position',[400,d,300,100],...
%posicao horizontal, vertical,largura, altura
                'Name',texto_prin,...
                'MenuBar','none',...   %'units','normalized',...
%,...figure - exibe os menus padroes
                'NumberTitle','off'); %on - numera as figuras


            janela1 = uicontrol(fig_3dB_global,'style','frame',...
                'units','normalized',...
                'Position',[ 0.03 0.09 0.94 0.8 ]);


            texto2 = uicontrol(fig_3dB_global,'Style','text',...
                'String','ALARM GLOBAL - ULTRAPASSOU 3dB',...
                'Units','normalized',...
                'Fontweight','normal',...
                'ForeGroundColor',[0.5 0 0],...
                'fontsize',12,...
                'fontweight','bold',...
                'Position',[0.1 0.2 0.8 0.5]);
            d = d-20;
        end
        %global intantaneous 3dB alarm - general
        global_dB_i = 20*log10(global_severity(p,i)/global_severity(p-
1,i));

        if global_dB_i >= 3
            if i <= length(Sb)
                texto_prin = sprintf('3dB Instantaneo Global - Canal %g e
%g',Sa(i),Sb(i));
            else
                texto_prin = sprintf('3dB Instantaneo Global - Canal
%g',Sa(i));
            end

            fig_3dB_global = figure('Position',[800,e,400,100],...
%posicao horizontal, vertical,largura, altura
                'Name',texto_prin,...
                'MenuBar','none',...   %'units','normalized',...
%,...figure - exibe os menus padroes
```

```
                'NumberTitle','off'); %on - numera as figuras


            janela1 = uicontrol(fig_3dB_global,'style','frame',...
                'units','normalized',...
                'Position',[ 0.03 0.09 0.94 0.8 ]);


            texto2 = uicontrol(fig_3dB_global,'Style','text',...
                'String','ALARM INSTANTANEO GLOBAL - ULTRAPASSOU 3dB',...
                'Units','normalized',...
                'Fontweight','normal',...
                'ForeGroundColor',[0.5 0 0],...
                'fontsize',12,...
                'fontweight','bold',...
                'Position',[0.1 0.2 0.8 0.5]);
            e = e-20;
        end

        for k = 1:nbc(i)
            %local severity - 3dB
            local_dB =
20*log10(local_severity(p,i,k)/local_severity(1,i,k));
            if local_dB >= 3

                if i <= length(Sb)
                    texto_prin = sprintf('3dB local - Canal %g e
%g',Sa(i),Sb(i));
                else
                    texto_prin = sprintf('3dB local - Canal %g',Sa(i));
                end

                fig_3dB_global = figure('Position',[h,f,300,100],...
%posicao horizontal, vertical,largura, altura
                    'Name',texto_prin,...
                    'MenuBar','none',...   %'units','normalized',...
%,...figure - exibe os menus padroes
                    'NumberTitle','off'); %on - numera as figuras


                janela1 = uicontrol(fig_3dB_global,'style','frame',...
                    'units','normalized',...
                    'Position',[ 0.03 0.09 0.94 0.8 ]);

                texto_l = sprintf('ALARM LOCAL - BANDA %g ULTRAPASSOU
3dB',k);
                texto2 = uicontrol(fig_3dB_global,'Style','text',...
                    'String',texto_l,...
                    'Units','normalized',...
                    'Fontweight','normal',...
                    'ForeGroundColor',[0.5 0 0],...
                    'fontsize',12,...
                    'fontweight','bold',...
                    'Position',[0.1 0.2 0.8 0.5]);

                f = f-20;
            end
```

```
            if p > 1
                local_dB_i =
20*log10(local_severity(p,i,k)/local_severity(p-1,i,k));
                if local_dB_i >= 3

                    if i <= length(Sb)
                        texto_prin = sprintf('3dB local - Canal %g e
%g',Sa(i),Sb(i));
                    else
                        texto_prin = sprintf('3dB local - Canal
%g',Sa(i));
                    end

                    fig_3dB_global = figure('Position',[n,m,400,100],...
%posicao horizontal, vertical,largura, altura
                        'Name',texto_prin,...
                        'MenuBar','none',...   %'units','normalized',...
%,...figure - exibe os menus padroes
                        'NumberTitle','off'); %on - numera as figuras


                    janela1 =
uicontrol(fig_3dB_global,'style','frame',...
                        'units','normalized',...
                        'Position',[ 0.03 0.09 0.94 0.8 ]);

                    texto_l = sprintf('ALARM INSTANTANEO LOCAL - BANDA %g
ULTRAPASSOU 3dB',k);
                    texto2 = uicontrol(fig_3dB_global,'Style','text',...
                        'String',texto_l,...
                        'Units','normalized',...
                        'Fontweight','normal',...
                        'ForeGroundColor',[0.5 0 0],...
                        'fontsize',12,...
                        'fontweight','bold',...
                        'Position',[0.1 0.2 0.8 0.5]);

                    m = m-20;
                end
            end
        end
        h = h + 400;
        f = 400;
        n = n + 400;
        m =200;
    end
end
```

APÊNDICE E

ROTINA UTILIZADA PARA GERAR AS AMOSTRAS TEÓRICAS E TREINAMENTO DAS RNA'S

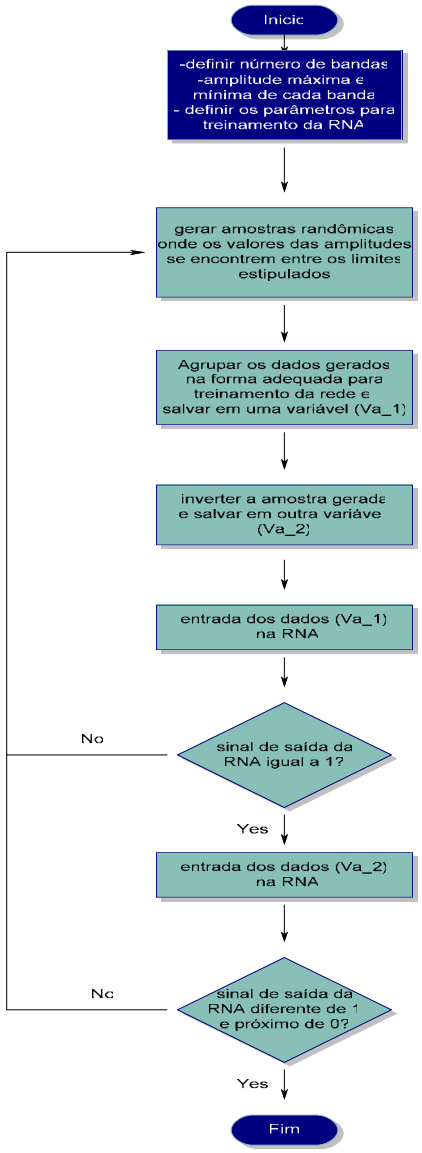


Figura A5 – Fluxograma da rotina de geração de amostras e treinamento das RNA's

```
%defeito desalinhamento
clear
clc
%numero de frequencias
n_freq = 4;
%numero total de colunas que o vetor treinamento deve conter
tot_col = 100;


pf = rand(n_freq-1,tot_col);
tamanho_p = 2;
p = ones(n_freq,tot_col);
%numero da coluna inicial para criacao do vetor treinamento
col = 100;
%vetor frequencia para conferencia dos dados criados para o treinamento
freq = [3; 6; 9;13;];

%linha que comeca a criacao do zero
lin_zero = 2;
%somente criar o vetor onde um dos valores seja zero
k = 1;

sp = 1;

%========= Light ======================
%minimum value of the band2
min2 = 0.4;
%maximum value of the band2
max2 = 1;


%minimum value of the band3
min3 = 0.4;
%maximum value of the band3
max3 = 1;


%minimum value of the band4
min4 = 0.4;
%maximum value of the band4
max4 = 0.7;

%=====================================
%minimum value of the band2
min21 = 1;
%maximum value of the band2
max21 = 5;


%minimum value of the band3
min31 = 0.7;
%maximum value of the band3
max31 = 2;
```

```
%minimum value of the band4
min41 = 0.4;
%maximum value of the band4
max41 = 0.7;


a = 1;
if sp == 1
    for j = 1:tot_col
        %a = max(pf(:,j));
        for i = 2:n_freq
            if a == 1
                %first harmonic
                if i == 2
                    if pf(i-1,j) >= min2 & pf(i-1,j) <= max2
                        p(i,j) = pf(i-1,j);
                    else
                        while pf(i-1,j) <=min2 | pf(i-1,j)>=max2
                            pf(i-1,j) = rand(1,1);
                        end
                        p(i,j) = pf(i-1,j);
                    end
                end

                %second harmonic
                if i == 3
                    if pf(i-1,j) >= min3 & pf(i-1,j) <= max3
                        p(i,j) = pf(i-1,j);
                    else
                        while pf(i-1,j) <=min3 | pf(i-1,j)>=max3
                            pf(i-1,j) = rand(1,1);
                        end
                        p(i,j) = pf(i-1,j);
                    end
                end

                %third harmonic
                if i == 4
                    if pf(i-1,j) >= min4 & pf(i-1,j) <= max4
                        p(i,j) = pf(i-1,j);
                    else
                        while pf(i-1,j) <= min4 | pf(i-1,j) >= max4
                            pf(i-1,j) = rand(1,1);
                        end
                        p(i,j) = pf(i-1,j);
                    end
                end

                a=0;
            else

                %first harmonic
                if i == 2
                    if pf(i-1,j) >= min21 & pf(i-1,j) <= max21
                        p(i,j) = pf(i-1,j);
                    else
                        while pf(i-1,j) <=min21 | pf(i-1,j)>=max21
                            pf(i-1,j) = rand(1,1)*10;
                        end
```

```
                    p(i,j) = pf(i-1,j);
                end
            end

            %second harmonic
            if i == 3
                if pf(i-1,j) >= min31 & pf(i-1,j) <= max31
                    p(i,j) = pf(i-1,j);
                else
                    while pf(i-1,j) <=min31 | pf(i-1,j)>=max31
                        pf(i-1,j) = rand(1,1)*10;
                    end
                    p(i,j) = pf(i-1,j);
                end
            end

            %third harmonic
            if i == 4
                if pf(i-1,j) >= min41 & pf(i-1,j) <= max41
                    p(i,j) = pf(i-1,j);
                else
                    while pf(i-1,j) <= min41 | pf(i-1,j) >= max41
                        pf(i-1,j) = rand(1,1);
                    end
                    p(i,j) = pf(i-1,j);
                end
            end
            a=1;
        end
    end
end
save hard_p p -mat
else
load hard_p -mat
end

[m,n] = size(p)
for i = 1:n
    a = figure
    set(a,'color',[1 1 1])
    bar(freq,p(:,i))
    xlabel('Frequencia (Hz)','fontweight','bold','fontsize',12)
    ylabel('Amplitude (Adimensional)','fontweight','bold','fontsize',12)
    Title(sprintf('Grupo numero: %g',i))
    axis([0 16 0 5]);
end

return

t = ones(1,tot_col);

mima = [0 1;
        min2 max2;
        min3 max3;
        min4 max4];
```

```
net = newff(mima, [3,15,15,1],{ 'tansig', 'tansig',
'purelin','purelin'},'trainlm','learngd');
net = init(net);
net.trainParam.show = 50;
net.trainParam.lr = 0.09;
net.trainParam.epochs = 100;
net.trainParam.goal = 100e-1000;

[net_desa,tr_desa,y] = train(net,p,t);

%onde grava os parametros da rede neural
%save rede_neural_desalinhamento_light_ijme net_desa tr_desa -mat
%save rede_neural_desalinhamento_light_ijme2 net_desa tr_desa -mat
%save rede_neural_desalinhamento_light_ijme3 net_desa tr_desa -mat
%save rede_neural_desalinhamento_light_ijme4 net_desa tr_desa -mat

%sinal bom
resposta_rn = sim(net_desa,p)

load local_severity_burity_good -mat

for i = 1:4;
    a(i) = local_severity(:,:,i);
    %c(i) = local_severity(:,:,i);
    if i == 1
        b = a(i);
    end

    a(i) = a(i)/b;

end
resposta_rn_def = sim(net_desa,a')

clear a

load local_severity_burity_light -mat


for i = 1:4;
    a(i) = local_severity(:,:,i);
    if i == 1
        b = a(i);
    end

    a(i) = a(i)/b;

end
resposta_rn_def = sim(net_desa,a')


load local_severity_burity_hard -mat

clear a

for i = 1:4;
    a(i) = local_severity(:,:,i);
    if i == 1
```

```
        b = a(i);
    end

    a(i) = a(i)/b;

end
resposta_rn_def = sim(net_desa,a')

clear a

c = [0.2; 0.5; 0.7; 1];
resposta_rn_def = sim(net_desa,c)

clear c

c = [0.2; 1; 0.1; 0.1];
resposta_rn_def = sim(net_desa,c)
```